申报	系列：实验技术
	专业：生态学
	职称：高级实验师

业绩成果材料

（申报人的业绩成果材料包括论文、科研项目、获奖以及其他成果等）

单　位（二级单位）：林学与风景园林学院

姓　名　洗丽铧

材料核对人：　　单位盖章：

核对时间：

华南农业大学制

目　录

一、教学研究业绩

二、科研项目

三.论文

四、科研成果

五、其他业绩

一、教学研究业绩

1、教学研究项目：关于新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系创新研究

广 东 省 教 育 厅

粤教高函〔2021〕29号

广东省教育厅关于公布2021年广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目立项名单的通知

各本科高校、相关教指委:

按照《广东省教育厅关于开展2021年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目申报推荐工作的通知》等文件安排，经学校遴选、公示、推荐及省教育厅审核、评审、公示，现将2021年省本科高校质量工程建设项目立项名单予以公布，并就有关事项通知如下:

一、立项情况

确定立项建设省级实验教学示范中心37个、校企联合实验室20个、科产教融合实践教学基地65个、大学生社会实践教学基地49个、教师教学发展中心6个、课程教研室119个、现代产业学院26个、专项人才培养计划59个、高等教育教学改革项目762个（含委托类高等教育教学改革项目6个)。项目详细名单见附件。

二、项目管理

（一）本次公布项目均为省质量工程建设项目，项目经组织建设、校内（教指委）结题并通过省教育厅统一组织项目验收后，正式认定为省级项目。

（二）项目正式实施前，请确保已对项目建设目标、建设举措、预期成果、建设进度安排等进行科学论证，论证专家应不少于5人，且至少有三分之一来自外校（单位）。论证后的目标、任务等将作为项目结题验收时的重要依据。

（三）项目日常管理由学校（教指委）负责，请统筹做好项目中期检查、校内结题验收等工作。项目结题时，邀请校外（外单位）评审专家人数不得少于专家总人数的三分之二。满足以下条件的项目，可以参与省教育厅统一组织的项目验收：

1.项目已完成立项时设定的主要建设任务和目标；

2.项目已取得标志性建设成果，并已在教学实践中得到检验和有效应用；

3.已按照要求完成项目结题；

4.符合当年度省统一验收规定的其他条件。

各校质量工程建设项目管理情况，将作为学校下一年度项目立项限额的参考依据。

（四）项目实施过程中，其名称、建设内容（任务）、建设目标、建设周期、主要负责人、预期成果等发生重大变更的，需由时任项目负责人在发生变更后及时提出，经学校项目主管部门

审核后由学校正式来函说明原因，并附相关材料，擅自变更上述事项的，验收评定时列为不通过；原则上，项目结题前6个月内，不得变更项目负责人、建设目标或预期成果等。

三、其他事项

（一）2021年度各校（教指委）向省教育厅推荐并获得立项的项目，须将项目校内评审、推荐及论证相关材料妥善保存，留底备查。

（二）各校要统筹本校“冲补强”提升计划资金及自有资金对立项项目予以资助，项目获得学校资助情况将作为项目结题验收时重要考察因素之一。如项目建设中取得具有推广价值的优秀成果，请及时形成书面材料报省教育厅高教处。

联系人：赵琪、李成军，联系电话：020-37627703、37626882。

附件：2021年广东省本科高校教学质量与教学改革工程建设项目立项名单

广东省教育厅

2021年12月31日

公开方式：依申请公开

校对人：李成军

高等教育教学改革建设项目立项名单

序号	学校	项目名称	负责人
1	中山大学	粤港澳大湾区国际化人才培养视域下的全球史课程双语教学改革	曹鸿
2	中山大学	儿科学基于BOPPPS模型的SPOC教学与高素质创新型人才培养评价体系的构建与实践	陈纯
3	中山大学	构建标准化妇检三维动画和智能化妇检反馈模型在妇科检查教学中的应用	陈圣福
4	中山大学	基于“五个融合”的《海洋生态学》一流本科课程改革与实践	何蕾
5	中山大学	Simodont虚拟仿真系统在口腔修复学临床实习教学中的应用	黄雪清
6	中山大学	新时代大学生劳动教育的价值向度与实践路径	胡莹
7	中山大学	中国共产党广东历史融入高校思政课教学研究	姜帆
8	中山大学	创新实践能力的团队化、探索式、自主性培养创新模式	刘昆
9	中山大学	“中山大学”号科考船实践教学体系的构建和实施	黎伟标
10	中山大学	基于转化医学理念与临床深度融合的病理生理学教学模式改革	陆立鹤
11	中山大学	大类培养背景下新工科类基础课程-大学化学课程改革与实践	乔正平
12	中山大学	配位超分子笼物理化学研究方法——化学强基班实验教材建设	苏成勇
13	中山大学	以加强数学应用能力与提升数学素养为抓手的高校公共数学课教学改革与实践	万安华
14	中山大学	人工智能背景下肺结节影像诊断教学模式改革研究	王国杰
15	中山大学	面向新农科的《微生物学实验》“四引导三拓展”教学改革探索与实践	魏蜜
16	中山大学	广州管圆线虫病动物模型建立虚拟仿真实验教学	吴忠道
17	中山大学	虚拟仿真教学在营养与食品卫生学教学中的构建与应用	夏敏
18	中山大学	数字岩矿石手标本三维交互虚拟实习系统开发及实践教学应用	肖凡
19	中山大学	适应“新工科”发展的电子技术实验教学改革研究	谢洪途
20	中山大学	《民族学概论》课程思政教学体系的建设	杨小柳
21	中山大学	基于MOOC的翻转课堂联合模拟教学构建急诊临床思维课程混合式教学的新模式	叶子
22	中山大学	“耕读研学”劳动课程建设与探索	张伟
23	中山大学	以临床胜任力为导向的外科实习医师课程改革	张信华
24	中山大学	临床医学人文课程建设	赵志新
25	中山大学	斜视与弱视多模块远程教学平台的建立与应用	卓业鸿
26	中山大学	线上线下混合式一流课程《组织学与胚胎学》的建设与实践	朱永红
27	中山大学	面向工科的理论物理导论的教学模式探索——以态叠加原理的讲解为例	李岩
28	华南理工大学	基于“费曼学习法”建设大学物理课程	程运华
29	华南理工大学	新文科建设背景下管理案例的开发与应用的模式创新研究	陈明
30	华南理工大学	在线虚拟教学平台辅助《现代生物分析仪器原理与实践》课程的研究与实践	范茁
31	华南理工大学	基于PBL教学法进行创意创新创业人才培养的探索与实践——以广告学学科为例	付佳
32	华南理工大学	基于OBE和翻转课堂的《微积分》生成性教学研究与实践	高文华
33	华南理工大学	混合式教学环境中的协作学习成效研究	黄露
34	华南理工大学	基于计算机视觉和数据科学的“工程管理”专业核心课程教学辅助技术研究	黄文炜
35	华南理工大学	基于处理器在环的嵌入式课程实验教学方案的研究	黄智聪
36	华南理工大学	基础与临床融合、线上线下结合的 多环节《病理生理学》教改探索	雷俊馥
37	华南理工大学	创新创业背景下电子工艺实习课程思政教学研究与实践	廖继海
38	华南理工大学	中国艺术歌曲演唱教学对中国传统文化的传承和传播意义研究	黎丹
39	华南理工大学	线下课程混合式教学满意度评价和改进研究	李家春
40	华南理工大学	智能汽车虚拟仿真实验探索与实践	李利平
41	华南理工大学	面向集成电路拔尖创新人才培养的数字电子技术课程改革	刘琲贝
42	华南理工大学	面向工程实践能力培养的《计算机控制技术》课程综合教学改革	刘屿
43	华南理工大学	在固废实验教学中融入思政与安全教育研究与实践	马伟文
44	华南理工大学	《风景园林美学》差异化联动式教改研究与实践	唐孝祥
45	华南理工大学	多维度进阶式电工电子实验实习教学的探索与实践	肖君
46	华南理工大学	“以学生为中心”的“三位一体”机械制图课程教学改革与实践	熊巍

95	华南农业大学	大数据专业集群背景下产教深度融合的探索与实践：以大数据管理与应用专业为例	张大斌
96	华南农业大学	华南农业博物馆专业实践教学初探-以林学专业为例	刘明赛
97	华南农业大学	基于思政的“互联网+赛教融合”《养牛学》课程改革与实践	李耀坤
98	华南农业大学	《家畜环境卫生学》课程思政的建设与实践	米见对
99	华南农业大学	混合互动式课堂过程化考核机制探索与实践	王小龙
100	华南农业大学	新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系创新研究	冼丽铧
101	华南农业大学	面向经管类专业本科生的《机器学习》课程体系建设与教学模式优化探索与实践	文乐
102	南方医科大学	融合课程思政的临床护理混合式教学实践改革	包良奕
103	南方医科大学	高阶能力导向的《神经病学》混合式课程设计及实践	陈金玉
104	南方医科大学	混合式教学中的形成性评价策略及效果研究	陈泽璇
105	南方医科大学	“法医病理-法医现场-法医毒物分析”整合式实验教学改革实践	杜思昊
106	南方医科大学	翻转课堂下多维互动教学模式在《牙周病学》课堂教学中的应用研究	房付春
107	南方医科大学	基于SPOC模式的医学生泛信息素养教育体系构建与实践	顾辉
108	南方医科大学	“一体两院三课四导五合”课程思政协同育人机制研究与实践	洪亦卿
109	南方医科大学	新医科和新工科背景下医学生交叉学科课程教学方法改革研究与实践-以《组织工程学》为例	侯鸿浩
110	南方医科大学	《麻醉生理学》课程思政教学改革与实践	李偲
111	南方医科大学	基于多元协同的医学院校课程思政育人体系探索与实践	刘辉
112	南方医科大学	基于“课堂革命”走向“育人革命”——中药学专业核心课程混合式教学改革探索与实践	刘莉
113	南方医科大学	基于微课的传染病学-基础医学结合课堂教学模式探索与实践研究	李咏茵
114	南方医科大学	基于CDIO教学模式的《新药开发概论》课程教学改革和实践	李珍
115	南方医科大学	后疫情时代基于线上线下混合式教学模式下的临床流行病学课程体系探索及效果评价研究	毛琛
116	南方医科大学	基于中医优势病种的中西医结合5M临床实践教学模式改革研究与实践	聂晓莉
117	南方医科大学	《医学英语口译》课程思政教学改革与实践	宁静
118	南方医科大学	基于《小儿临床技能学》课程的儿科学“5+3”一体化人才培养衔接机制改革与实践	钱丹丹
119	南方医科大学	新冠疫情下基于CBL的全英混合式教学模式在Obstetrics and Gynecology课程中的探索与实践	史潇
120	南方医科大学	基于OBE《中医诊断学》实践教学模式改革	王静
121	南方医科大学	职业素养与临床能力深度融合的妇产科学临床实践教学改革与实践	王雪峰
122	南方医科大学	基于“新医科”整合理念的《临床检验基础》实验课混合式教学实践探索	余楠
123	南方医科大学	新医科背景下医学生学业支持辅导体系的研究与实践	余喜
124	南方医科大学	课程思政背景下联合SP和OCSE构建康复治疗学专业《心肺物理治疗》的联合式教学模式	曾庆
125	南方医科大学	“新文科”背景下大学英语分级教学改革与教学评价研究	邹润
126	广州中医药大学	应用线上线下混合式教学模式构建药理学立体知识结构的课程实践	白莎莎
127	广州中医药大学	基于BOPPPS的案例式教学模式在《中医骨伤科学》中的教学实践研究	蔡群斌
128	广州中医药大学	课程思政背景下“以学为中心”的课程设计 在《中医妇科学》中的应用探索	曹蕾
129	广州中医药大学	基于大学生体质监测预警机制的公共体育课堂教学创新模式研究	陈道睿
130	广州中医药大学	基于PACS的超声教学图库的构建与应用	陈铃
131	广州中医药大学	基于中医药复合型人才培养的“一体两翼”大学英语教学模式研究	陈媛
132	广州中医药大学	人类卫生健康共同体背景下以全球健康胜任力为导向的中医国际化护理课程体系优化整合与实践	高婧
133	广州中医药大学	构建以岗位胜任力为导向的《官语评定与治疗学》课程体系	古琨如
134	广州中医药大学	基于病案导入的教学模式在《针灸治疗学》教学中的设计与应用研究	林涵
135	广州中医药大学	药用植物室外教学基地数字化平台的构建研究	林小桦
136	广州中医药大学	中医基础课程3+3育人模式探索与实施	刘成丽
137	广州中医药大学	基于 ICN 指南的《灾难护理学》课程研究与实践	谭益冰
138	广州中医药大学	基于“双导制”、突出中医护理核心能力培养临床实习护生带教模式的探索与实践	王慧
139	广州中医药大学	疫情背景下思政元素与多元读写能力培养深度融合的医药院校大学英语教学实践研究	吴倩
140	广州中医药大学	以微课程为载体的CBL教学法在ICU规培护士临床思维能力培养中的教学改革与实践	吴巧娟
141	广州中医药大学	深度学习理念下中医药院校物理学课程思政的探索与研究	冼慧敏
142	广州中医药大学	创新融合教育模式构建应用型医学人才培养体系	许晓伍

2. 教学研究项目：关于基于园艺疗法理念的《观赏植物栽培》课程教学改革与实践

华南农业大学文件

华南农教〔2018〕43 号

关于华南农业大学 2018 年度教育教学改革与研究项目立项的通知

各学院、部处、各单位：

为进一步推进我校教育教学改革与研究，提高人才培养质量，根据教育部、财政部《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》（教高〔2007〕1 号）精神，结合我国高等教育教学发展形势和学校实际，学校组织开展了 2018 年度教育教学改革与研究项目申报工作。经各单位推荐申报、学校教学指导委员会专家评审，主管校领导同意，决定对“面向生态文明建设与乡村振兴战略的资源环境生态类专业教学综合改革研究”等 40 个校级教改重点项目予以立项资助，对“人工智能背景下信息管理与信息系统专业综合实践教学模式探究与实践”等 51 个校级教改一般项目予以立项资助，对“新媒介环境下古代文学课

—1—

程教学优化研究与实践”等 40 个校级教改自筹项目予以立项，对“园林建筑学”等 3 个校级教改继续教育类项目予以立项资助（详见附件）。

请各项目负责人务必按项目计划要求及时开展研究工作，确保研究工作如期完成，并力争取得高水平的研究成果。

附件：华南农业大学 2018 年度教育教学改革与研究项目一览表

华南农业大学

2018 年 8 月 31 日

（联系人：林宇健、曹广祥，电　话：85280052）

公开方式：主动公开

华南农业大学校长办公室　　2018 年 8 月 31 日印发

—2—

附件

华南农业大学2018年度教育教学改革与研究项目一览表

编号	项目名称	项目类别	主持人	经费（单位：元）
JG18001	面向生态文明建设与乡村振兴战略的资源环境生态类专业教学综合改革研究	重点项目	章家恩	10000
JG18002	基于产教融合的人才培养改革探索与实践	重点项目	曹广祥	10000
JG18003	林学专业卓越农林人才培养实践体系的构建	重点项目	何　茜	10000
JG18004	新时代高校《大学语文》“课程思政”的探索与实践研究	重点项目	刘红娟	10000
JG18005	基于 OBE 的风景园林专业阶梯式实践教学体系优化与实践	重点项目	刘小蓓	10000
JG18006	艺术类专业人才培养的创新创业教育改革研究	重点项目	陈志远	10000
JG18007	融合 PBL 的翻转课堂在《城市规划原理》中的应用研究与实践	重点项目	王　婷	10000
JG18008	基于雨课堂支持的中文专业语言学课程智慧课堂建设	重点项目	高列过	10000
JG18009	农林高校基层督导队伍组织建设机制研究与实践	重点项目	林　楠	10000
JG18010	VR 动画数字交互与民俗艺术融合传承的“双擎式”动画教学研究与实践	重点项目	李雷鸣	10000
JG18011	以创新创业能力培养为核心的土木工程专业人才培养模式改革与实践	重点项目	何春保	10000
JG18012	大学生革命文学素养教育课程建设与教学改革	重点项目	傅修海	10000
JG18013	雨课堂在公共《物理化学》课程教学中的应用研究	重点项目	刘　维	10000
JG18014	学分制改革背景下高校本科生导师制改革与实践研究	重点项目	刘玲娣	10000
JG18015	基于慕课的混合教学模式在《农产品加工学》课程教学中的应用	重点项目	陈　佩	10000
JG18016	《商业银行业务与管理》沙盘模拟实训课程的研究	重点项目	莫易娴	10000

编号	项目名称	项目类别	主持人	经费（单位：元）
JG18112	基于提高实践能力与创新精神的数学教学实践与研究	自筹项目	金玲玉	自筹
JG18113	基于需求分析的大学英语课程体系建设与优化研究	自筹项目	刘　华	自筹
JG18114	基于沉浸理论的茶艺实训课程教学改革研究与实践	自筹项目	张凌云	自筹
JG18115	基于素质教育的传统文化课程建设研究	自筹项目	余格格	自筹
JG18116	《生物化学》教学中慕课设计与建设的探索	自筹项目	巫光宏	自筹
JG18117	学分制改革下特色农业史课程群建设与教学模式探索	自筹项目	赵艳萍	自筹
JG18118	《植物病原真菌学》教学标本资源的整合与编目研究	自筹项目	习平根	自筹
JG18119	以法律诊所为载体的法学实践教学改革探索	自筹项目	王　慧	自筹
JG18120	家蚕解剖生理图谱制作与教学实践	自筹项目	黄志君	自筹
JG18121	需求视角下的全英课程教学改革研究	自筹项目	李　慧	自筹
JG18122	《动物繁殖学》全英课程教学改革研究与实践	自筹项目	孟　立	自筹
JG18123	新时代高校思政课教学实效性的提升路径研究	自筹项目	杨　菁	自筹
JG18124	“新工科”背景下高等数学的教学改革和创新	自筹项目	尤雪莲	自筹
JG18125	发挥院（所）资料室在本科实践教学作用之初探——以中国农业历史遗产研究所特藏室为例	自筹项目	杨　柳	自筹
JG18126	基于园艺疗法理念的《观赏植物栽培》课程教学改革与实践	自筹项目	冼丽铧	自筹
JG18127	性别、微积分与《微观经济学》教学实践及改革研究	自筹项目	吕立才	自筹
JG18128	基于实验设计提升《鱼类行为生态学》教学效果的研究	自筹项目	王　庆	自筹
JG18129	农业工程学科交叉渗透的工业设计专业实验教学研究	自筹项目	曾志雄	自筹
JG18130	基于乡村振兴战略人才需求的本科水电专业实验教学模式创新研究	自筹项目	胡　威	自筹

结题证明

编号：JXJT20110

我校教师**冼丽铧**主持的校级教学改革项目《**基于园艺疗法理念的《观赏植物栽培》课程教学改革与实践**》（项目编号：JG18126），经学校组织验收，已于2020年12月结题。

特此证明。

华南农业大学本科生院

2020年12月

3. 教改论文：关于新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系研究

双一流·中文核心期刊
中国人文社会科学核心期刊（A刊扩展）
科学引文数据库（SCD）来源期刊
国家哲学社会科学文献中心最受欢迎期刊
国务院发展研究中心信息网转载源刊

高教学刊

Journal of Higher Education

- 《科学引文数据库》(SCD)收录期刊(2023)
- 《中国人文社会科学引文数据库》收录期刊
- 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
- 《国家哲学社会科学学术期刊数据库》收录期刊
- CNKI系列数据库收录期刊
- 《中国期刊全文数据库》收录期刊
- 《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
- "万方数据—数字化期刊群"全文上网
- 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
- 《中文科技期刊数据库》收录期刊
- 《中教数据库》收录期刊
- 《超星期刊域出版系统》全文收录期刊

第9卷 第34期
Vol.9 No.34
2023年12月(上)

高教学刊

旬刊　　2015年创刊

第9卷　第34期　总第264期　2023年12月

目　次

期刊基本参数:CN23-1593/G4 * 2015 * t * A4 * 196 * zh * P * ¥40.00 * 2000 * 45 * 2023-12

【教海探新】

【教改新论】

【人才培养】

【思政研究】

【调查分析】

DOI:10.19980/j.CN23-1593/G4.2023.34.020

新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系研究

洗丽铧,阙青敏,翁殊斐,高 伟*
(华南农业大学,广州 510642)

摘 要:在新工科和新时代生态文明建设背景下,传统的实践教学体系人才培养模式已不能满足当前的行业需求以及以学生为主的实践教学目标。该文基于专业特色与优势,在生态融合的改革理念下,提出优化实践教学体系,重视实践课程之间衔接;革新实践教学手段,强调场景式教学模式;完善教学考核标准,制定多方位实践教学质量评价体系等改革方法。通过实践教学体系的改革与创新,学生的实践与创新能力等方面有良好的改革成效,完善风景园林专业实践教学体系,全面提升实践教学水平与质量。

关键词:新工科;生态融合;风景园林;实践教学;改革

中图分类号:G642 **文献标志码**:A **文章编号**:2096-000X(2023)34-0086-04

Abstract: Under the background of new engineering and ecological civilization construction in the new era, the traditional talent training mode of practical teaching system can no longer meet the current industry needs and student-centered practical teaching objectives. Based on the professional characteristics and advantages, under the reform concept of ecological integration, this paper puts forward the optimization of practical teaching system and attaches importance to the connection between practical courses and proposes to innovate practical teaching methods while emphasizing scene teaching mode, innovate practical teaching methods while emphasizing scene teaching mode, improve the teaching assessment standards, and formulate diversified practical teaching quality evaluation system and other reform methods. Through the reform and innovation of the practical teaching system, students' practical and innovative abilities have achieved good results. The research has improved the practical teaching system of landscape architecture and comprehensively improved the level and quality of practical teaching.

Keywords: new engineering; ecological integration; landscape architecture; practical teaching; reform

为应对新一轮科技和产业变革,教育部提出了新工科理念,旨在培养卓越工程科技人才,为我国产业发展与国际竞争提供智力支持和人才保障。该理念基于国家战略发展新需求、新形势及立德树人的根本任务,并通过"抓理论、建专业、改课程、变结构、促融合"的新思路来实现培养目标。其中,六大理念包括:问产业需求建专业,问技术发展改内容,问学校主体推改革,问学生志趣变方法,问内外资源创条件,问国际前沿立标准[1]。当前,全面深化新工科,多主体协同育人,产教融合协同育人平台,提升专业硬实力已成为新工科高等教育的时代背景。

风景园林学是一门注重实践应用的综合性学科,旨在通过科学和艺术手段,研究、规划、设计和管理自然与建成环境,以协调人与自然的关系,保护和恢复自然环境,打造美丽健康的人居环境[2]。学科建设是提高办学效率和培养质量的关键[3],融合各种资源,尤其是信息技术资源,整合课程,促进专业生态的融合。现代信息技术对知识的生产、传播和应用方式的变革,提高了学科组织效率,促进了专业生态的重组与融合[4]。创新实践教育需要从生态学角度出发,分析构成要素,并通过战略规划和组织保障,整合环境、资源、主体和过程等要素[5],形成创新实践教育的生态环境,充分利用学校、企业、政府和资本等生态资源,提高专业实践教育的效果和效率,是当前风景园林专业创新实践教育改革的重要途径。

一 当前实践教学存在的主要问题

风景园林专业是一个涵盖综合和实践的专业,其中实践教学是至关重要的。近年来,国内的高校对该专业的实践教学进行了多次探索与实践。中国高校通常采用5种不同类型的实践教学,包括课程实习、认知实习、综合实习、调研实习和业务实习等。国内几所大学在风景园林专业的实践教学方面的改革值得借鉴,比如华中农业大学实行"情·境育人"理念,采用"五阶"实践教学模式和创新的课程形式加深学生对自然、生活和社会的认识和情感体验,培养了综合生境、画境和意境的设计思

基金项目:国家自然科学基金面上项目"基于垂直绿化应用的木质藤本攀援生长机制与生态绩效评价"(32171852);2021年度广东省高等教育教学改革项目"新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系创新研究"(JG21009)
第一作者简介:洗丽铧(1987-),女,汉族,广东广州人,博士研究生,实验师。研究方向为风景园林植物应用。
* **通信作者**:高伟(1982-),男,汉族,云南昆明人,博士,教授,风景园林专业主任。研究方向为风景园林遗产保护、风景园林与公共健康。

维和创新能力[6]。西安建筑科技大学注重生态学与规划设计的结合，培养学生的实践能力和“营造的生态思维”，校园生态实践也为学生提供了各种实践机会[7]。同济大学在教学中将理论、设计和实践课程相融合，采用复合物理环境和社会人文的实验手法，让学生能够更全面地体验和理解现场。这些学校的实践教学都取得了好的效果，能够提高学生的实践性和学习能力[8-9]。

华南农业大学（简称“我校”）风景园林学科作为华南地区生态文明和城乡人居环境建设的主力军，已在粤港澳大湾区建设中发挥巨大的作用。“善境”是我校风景园林学科的价值取向和目的，即通过人类善待自然达到自然善待人类的“人与天调”的生态实践过程，是学科处理生产、生活、生态环境中“人天关系”的核心途径[10]。实践教学总计 36 学分，主要由 42 周实践周组成，实践环节占总学分比例是 30.2%，包括通用技能实践、专业技能实践、创新创业实践和劳动教育，自主实验学分较少，仅有 32 学时，其中生态实践内容和体系尚未充分体现在实践教学体系中。

二　生态融合的实践教学体系是实现新发展理念的重要途径

随着我国生态文明建设和美丽中国战略的推进，风景园林行业从过去单纯的绿化和美化逐渐转变为解决城市生态问题、塑造可持续性生态景观的重要力量。自党的十八大以来在相关工作中，我们将生态文明建设作为中华民族永续发展的根本大计，强调绿水青山就是金山银山，要切实贯彻新发展理念，以此树立强烈的意识，努力走向社会主义生态文明新时代。2021 年，我校的风景园林专业被列为国家一流专业建设点，承担着平衡人类与自然的关系、让国土实现绿水青山的任务，在中国的新时代生态文明建设、贯彻新发展理念的工作中肩负着极为重大的责任[11]。

生态融合是生态文明建设的关键步骤，因为人类活动与自然系统的相互作用、人类自身发展的内在逻辑以及工业社会的缺陷都反映出了它的必然性。这一理论基于人类对自然规律的认识、认识到改善人类与自然的关系的重要性以及生态科学的迅速发展。实现生态融合需要通过绿色技术的研发和应用、生态创新的突破以及生态生活世界的建设来实现。生态融合的核心是技术的生态观，因此需要在技术环境下实现教育流程的革新和改造，建立人本信息化教育空间，使信息技术与教育最终实现生态融合并落脚于“以人为本”的思想。最终，生态融合的目标是构建起人类生态命运共同体[12-14]。在党的十九大精神、生态文明、人类生命共同体建设的时代背景下，如何在风景园林专业教育中培养复合应用型创新人才、引导和改善自然和人工环境质量是一个必须面对的任务。实践型课程和实践环节是风景园林课程体系的重要组成部分。风景园林教育活动的过程更加注重身心感知与体悟，以实际应用技能、人文历史和创新思维为导向的实践教学，也是人才培养中不可分割的组成部分。实践教学活动是培养学生分析问题、发现问题、创新性地解决问题等能力的重要手段[15]。

三　生态融合的风景园林专业实践教学体系建设

（一）　加强“善境”思想融入实践，开展创新实践探索与实践检验

加强课程思政建设，是落实立德树人根本任务的关键，坚持知识传授与价值引领相统一、显性教育和隐性教育相统一，根据本学科核心价值观推动教学改革，全过程贯穿“善境”思想教育，充分挖掘专业实践课程和教学方式中蕴含的思想政治教育资源[16]，全过程厚植爱专业、爱国的情怀。

（二）　采集国内外最新的优秀生态实践案例，创新应用于生态实践环节

基于岭南地域生境与生态环境特色，把符合办学理念的优秀案例引入实践教学环节，基于基础生态学、场地生态学以及景观生态学的理论基础构建生态实践环节，并逐步组建具有本土特色的风景园林专业生态实践案例库，举办生态实践系列论坛、研讨与宣教等活动。

以“基础生态学+场地生态学+景观生态学”的理论知识体系为基础（图 1），应用案例教学与“现场教学”相结合的教学方法，以参与南粤古驿道、广州海珠国家湿地公园、华南国家植物园、北京路历史文化核心区、粤剧艺术博物馆等重点实践项目为实施载体，以“研究性与引导式学习”为导向，开展实践教学，组织学生参与生态实践主题教学活动、研讨、竞赛，如“南岭杯”生态修复设计竞赛等相关主题活动，发挥专业特长，展现本专业的生态实践教学特色。

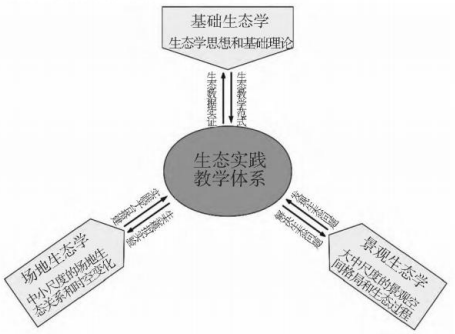


图 1　生态实践环节构建途径设想

（三） 革新实践教学方法，重构、优化专业实践教学课程体系

加强课程系统化，在教学过程中以实践类课程承前启后，以微观尺度—中微观尺度—中观尺度—中宏观尺度—宏观尺度的序列，融会贯通理论类课程与设计类课程，并以场地生态学课程实践为例，结合虚拟数字化实验手法，提高专业的实践性和学生学习的主观能动性。

以数字化和虚拟仿真实验手法，鼓励学生动手验证自主的设计，全方位地体验和理解实践环节，提高学生的专业实践能力和主观能动的积极性。引导学生自主地进行专业实践和尝试开放式创新训练平台，加大实验室平台建设和实践教学管理，依托校内外实践教学基地，引导学生以“合作、互学、互教”的方式，开展多项课外创新实践活动，以产学合作项目为课题，参与项目研究和实战训练，建立产学研一体化实践教学模式。

（四） 创造多元化的实践环节和模块，多管道进行创新实践训练

通过探索共享型实习基地建设，加强校企共建的实践教育基地建设，鼓励学生参与大学生创新创业实践训练、各类学科及行业竞赛，如广东省“南岭杯”等生态修复主题竞赛，同时持续推进创新创业教育教学模块和建设完善风景园林实践教学平台（实验室），全面提升实践与实习效果。

优化传统实践教学模式和教学环节，建立与人才培养目标相适应的实践教学体系，以理性认识、感性认知以及理论专业知识解决实际问题。主要包括公共实践、各类专业课程实习/实训、主干设计课程与课程设计工作室、毕业设计及课外第二课堂活动等方面，在实践教学体系构建中，教师指导大学生研究性与创新性项目的申报与研究，实现学生创新能力、创新知识和创新人格的完整构建[17-18]。

（五） 改革全过程考核标准，建立多形式多方位的评价方式

从课程实践能力、实验室实践操作、基地实践活动、社会实践技能四方位（图2）建构复合型的全过程实习实践教学环节考核标准，在专任教师、实验师、企业导师以及工匠师的多方位实践培养过程中，实施多元化考核管理，系统地全程监管实践教学的设计、实施和教学效果，全面评价学生参与实践的积极性和主观性。

受新冠感染疫情影响以及随着“互联网+教育”时代推进，逐步开展线上线下或虚实融合的实践教学模式，多方位激发学习动力，多角度培养专业志趣，建立线上线下、课内课外、挑战性主题实践等多方位的评价机制，探索非标准化、探究性、综合性的考核评价体系，提升实践课程的创新性和挑战度。

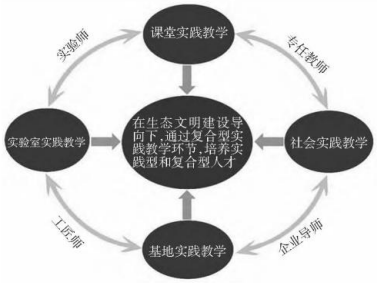


图2 “四位一体”实践教学模式

四 生态融合的实践教学改革成效评价

（一） 生态实践案例应用成效评价

通过创新生态实践案例的有序引入，把生态价值观、风景园林核心价值观“善境”思想、风景园林生态规划与设计辨析思维等价值观融入专业实践教学课程体系，全方位地把课程思政融入实践教学体系的全过程，提高学生思想水平和文化素养，达到“价值塑造、能力培养、知识传授”的立德树人目的。在本研究中，以本校风景园林2019级—2022级四个年级学生以及已毕业的120名同学为研究对象设置问卷对改革成效进行评价，问卷调查结果表明：学生对实践项目案例的接受度普遍很高，85%的学生认为增强了对理论知识的转化和拓展，如对发展创新意识和创新能力、提高个人素养和能力等方面有较大提升。

（二） 专业创新实践教学平台改革成效评价

通过专业创新实践教学平台的建设，构建起“以学生发展为中心”的现代生态实践教学范式。进行场地生态学等课程的虚拟仿真实验室数字化建设，依托互联网信息化技术，解决学生现实“做不到”的问题，实现“网上做实验”，同时加强风景园林专业实验室建设管理，保障实验室安全、有序、高效地开展实践教学活动，提高教学质量和办学效率。问卷调查结果显示：学生对创新创业项目实践设置的满意较高，其中国内外专业竞赛和大创项目实践占比较高，占比84%，其实操性和匹配度更贴合学生的学习实践。

（三） 风景园林专业实践教学活动改革成效评价

通过校企合作的联合工作坊/工作室、邀请行业专家进行专业教育及学术讲座、校企“双导师”联合指导大学生创新创业实践项目、参与校企科学研究项目等实践教学活动形式，帮助学生和教师及时了解行业需求、专业发展方向等，拓展专业和创新创业相融合的实践活动

内容，提高了学生的创新思维，创新创业能力得到了训练，问卷结果显示：90%以上的调查结果是正向反馈，进一步反映了我校风景园林专业实践改革的有效性和可持续性，该实践教学活动有助于提高风景园林专业人才培养质量。

五 结束语

中国乃至国际的生态实践均有各自的实际情况，即使是在中国当代的生态教育和生态实践，西北、东北、华东及华南等地的生态实际问题都不一样，而如何建构以大湾区生态文明建设为导向的，满足市场和行业需求的创新实践教学体系，是一个兼具复杂性和挑战性的问题。因此，如何提供基于岭南地域性人文-生态环境的覆盖专业全方位全过程生态融合的实习实践教学环节，充分发挥和应用本专业在棕地修复、城市生态效能监测、湿地修复及污泥资源化利用等生态研究领域的学科特色与优势融入实践教学体系，是本文探讨的关键问题。在实践课程环节构建、实践教学活动组织、实践教学形式应用以及实践全过程考核方式等方面开展的生态元素融合的有益探索，不仅有助于培养园林专业、林学专业等相关专业的学生具备生态视野、创新思维和实践技能，其构建理念、创新方法、实施方案、教师实践教学协同机制对我校其他专业乃至省内外其他高校开展生态融合的新工科，甚至新农科、新文科、新医科建设也有一定的借鉴作用。

1）挖掘创新生态实践案例，应用于专业实践全过程。依托风景园林学科特色，展现华南农业大学农林院校的办学特色，发现与挖掘华南棕地修复、生态效能监测、生态修复和园林植物应用方面的优势特长，基于“基础生态学+场地生态学+景观生态学”的理论体系，以“善境”为价值取向和培养目的，通过人类善待自然达到自然善待人类的“人与天调”的生态实践路径，建构和创新生态实践教学体系。

2）构建创新实践环节，形成“四位一体”的实践教学模式。通过理论教学、实验室实践教学、基地实践教学以及社会实践的生态融合教学场景，在专业教师、企业导师、工匠师和实验师的交叉教学实践下，使学生在专业技能模块中培养综合素质能力，在创新创业实践模块中成长创新思维和创业能力，在社会实践模块中得到技能拓展和满足社会需求，最终达到培养设计实践型和复合型人才的培养目标。

3）整合实践教学资源，搭建数字化创新实践平台。基于本科实践平台建设项目，应用先进的生态实测仪器设备，搭建数字化虚拟仿真平台，利用联合培养基地资源，引入产业最新生态项目资源与融入企业实践经验，开展国内外各类型的设计竞赛、专业展览、联合教学、国际工作坊和创新实践项目等实践活动，突出学生中心地位，激发学生参与创新实践。

参考文献：

[1] 张美亚，马成龙.基于 BIM 的工程管理专业实践课程教学改革研究[J].教育教学论坛，2022(13)：74-77.

[2] 高等学校风景园林学科专业指导委员会.高等学校风景园林本科指导性专业规范(2013 年版)[M].北京：中国建筑工业出版社，2013.

[3] 薛其坤.基础研究突破与杰出人才培养[J].清华大学教育研究，2021，42(3)：1-6.

[4] 张业茂.文化生态学视域下西方视唱练耳在中国的接受与认同机制[J].华中师范大学学报(人文社会科学版)，2021，60(1)：111-120.

[5] 罗骏，周小丁，杨杰.高校实验室与创新创业教育生态融合研究[J].实验技术与管理，2021，38(4)：15-17，35.

[6] 裘鸿菲，叶阳，周诗若.中英两国大学风景园林专业实践教学比较研究——以爱丁堡大学和华中农业大学为例[J].风景园林，2018，25(S1)：75-79.

[7] 李莉华，董芦笛，武毅，等.西安建筑科技大学风景园林专业课堂内外的生态实践教学与教育研究[J].城市建筑，2018(36)：53-56.

[8] 刘悦来.现场与营造——同济大学景观设计教学实践探索[J].园林，2014(11)：87-89.

[9] 刘悦来，董楠楠，王敏，等.传承与渗透——同济大学风景园林学科的实践教学剖析——以景观环境测绘实习为例[J].中国园林，2013，29(12)：71-75.

[10] 高伟.王绍增先生的善境思想[J].中国园林，2018，34(2)：80-83.

[11] 解爽.北京市海淀区公园绿地游憩服务评价与优化[D].北京：北京林业大学，2020.

[12] 衡孝庆.论生态融合[J].自然辩证法通讯，2020，42(2)：17-22.

[13] 董怀宏.生态融合：网络时代高校思想政治教育的新境界[J].华南师范大学学报(社会科学版)，2015(5)：139-144，192.

[14] 余胜泉.推进技术与教育的双向融合——《教育信息化十年发展规划(2011—2020 年)》解读[J].中国电化教育，2012(5)：5-14.

[15] 高翅，杜雁，吴雪飞，等.全人教育目标下的风景园林专业“情·境育人”培养体系——华中农业大学的探索与实践[J].风景园林，2018，25(S1)：9-12.

[16] 陆舒湄.“三全育人”格局下高校课程思政实践路径研究[D].杭州：浙江理工大学，2020.

[17] 毛学伟.高职人力资源管理课程实践教学体系构建分析[J].时代教育，2014(22)：61-62，70.

[18] 黄琛，余红兵.地方本科院校风景园林专业实践教学体系的构建[J].福建建筑，2015(8)：138-140.

融合·汇智·传播·共享

高教学刊

（旬刊，2015年创刊）

第9卷 第34期 总第264期 2023年12月

Journal of Higher Education

(Thrice-monthly, started in 2015)

Vol.9, No.34 Total No.264, December 2023

主　　管　黑龙江省科学技术协会
主　　办　黑龙江省创联文化传媒有限公司
　　黑龙江省教育评估院
出　　版　黑龙江省创联出版有限公司
编　　辑　《高教学刊》编辑部
总 编 辑　杨大伟
主　　编　尹艳凌
编辑部主任　闫士玉
责任编辑　陈晓乐
英文审校　赵玉闪　王丹丹
美术设计　赵　双
总编室电话　0451-82613427
编辑部电话　0451-82614854
投稿信箱　gjxkzzs@163.com
网　　址　www.gjxkzzs.com　www.gjxk.cbpt.cnki.net
微信公众号　gjxkzzs
刊　　期　旬刊（每月8日、18日、28日）
地　　址　(150076) 哈尔滨市道里区建国北六道街66号
印　　刷　哈尔滨松龙印务有限公司

Administrated by Heilongjiang Association for Science and Technology
Sponsored by Heilongjiang Chuanglian Cultural Media Co., Ltd. and Heilongjiang Education Evaluation Institute
Publisher by Heilongjiang Chuanglian Publishing Co., Ltd.
Edited by Editorial Department of Journal of Higher Education
General Editor: Yang Dawei
Editor-in-Chief: Yin Yanling
Managing Editor: Yan Shiyu
Copy Editors: Chen Xiaole
English Editors: Zhao Yushan, Wang Dandan
Art Designer: Zhao Shuang
General Editor's Telephone: 0451-82613427
Editorial Office Telephone: 0451-82614854
Email: gjxkzzs@163.com
Website: www.gjxkzzs.com　www.gjxk.cbpt.cnki.net
WeChat: gjxkzzs
Frequency of Publication: Published thrice a month (on the 8th, 18th and 28th of each month)
Address: 66 Jianguo North Sixth Street, Daoli District, Harbin City (150076)
Printed by Harbin Songlong Printing Co., Ltd.

邮局发行：黑龙江省邮政报刊发行局　　中国标准连续出版物号 ISSN 2096-000X / CN 23-1593/G4
邮发代号：14-357　定价：40元/册
自办发行：黑龙江智汇高教学刊编辑有限公司　　校对服务：黑龙江创联高教学刊编辑服务有限公司
法律顾问：北京大成(哈尔滨)律师事务所石江锋律师

ISSN 2096-000X

SCAULIB202405320

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人华南农业大学林学与风景园林学院/冼丽铧 3 篇论文收录情况如下表。

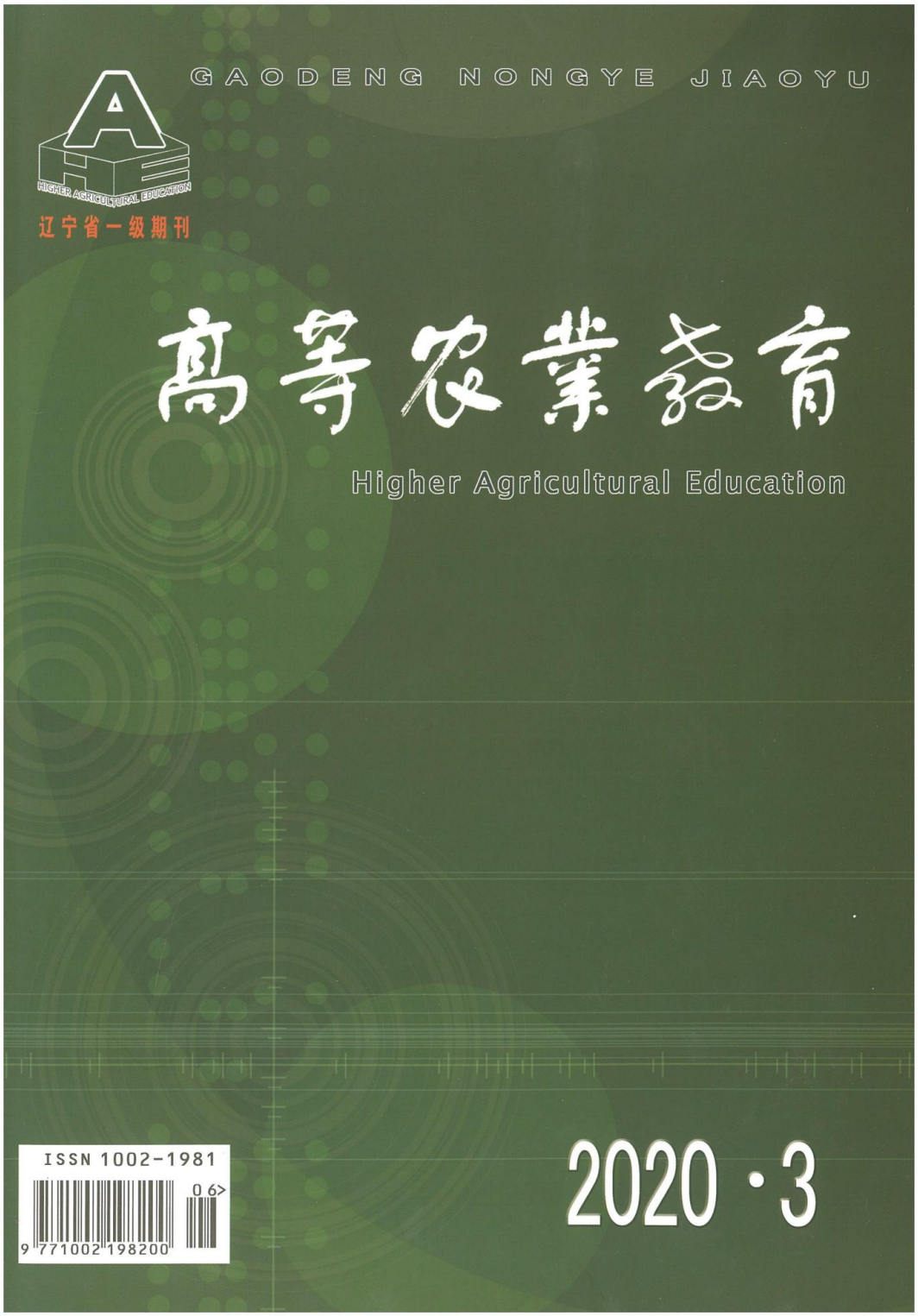
序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系研究	高教学刊 出版年：2023 卷期：2023,9(34) 34 页码：86-89 文献号： 文献类型：期刊论文	第一作者	无	华南农业大学	CNKI	无	无
2	9 种园林植物幼苗光合特性及固碳释氧能力研究	林业与环境科学 出版年：2023 卷期：2023,39(02) 02 页码：46-53 文献号： 文献类型：期刊论文	通讯作者	无	华南农业大学林学与风景园林学院	CNKI	无	无
3	广东云开山国家级自然保护区人为干扰对环境土壤理化性质的影响	林业与环境科学 出版年：2023 卷期：39 2 页码：37-45 文献号： 文献类型：期刊	通讯作者	无	华南农业大学林学与风景园林学院	CNKI	无	无

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：张进

4. 教改论文：关于基于园艺疗法理念的农事训练教学改革与实践



辽宁省一级期刊
JST日本科学技术振兴机构数据库
《中国期刊网》全文收录期刊
《中国学术期刊（光盘版）》全文收录期刊
中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
《中国核心期刊（遴选）数据库》来源期刊
中文科技期刊数据库收录期刊

主　管:辽宁省教育厅
主　办:沈阳农业大学
编　辑:《高等农业教育》编辑部
地　址:沈阳市沈河区东陵路120号
邮　编:110161
电　话:(024)88487051
网　址:http://gdnj.cbpt.cnki.net

刊名题字

出版发行:高等农业教育杂志社
国外发行:中国国际图书贸易集团有限公司(北京399信箱)
印刷:沈阳中科印刷有限责任公司
刊号:ISSN 1002-1981 / CN21-1088/G4

目　录

MU　LU

高等农业教育(双月刊)
2020年第3期(总321期)

教育发展研究

教育教学管理

课程与教学

学位与研究生教育

高等职业教育

Higher Agricultural Education
(Bimonthly)
No. 3, 2020 (Total 321)

Sponsor:
Shenyang Agricultural University

Edited by:
Editorial Department of Higher Agricultural Education

Address:
No. 120 Dongling Road
Shenhe District, Shenyang

Post Code: 110161
Tel: (024)88487051

Chief Editor:
Liu Guanglin
Executive Editor:
Zhang Yan
Associate Editor:
Sun Ke　*Yang Siyao*

四封设计:杨思尧
版式设计:杨思尧
英文责编:王　岩

期刊基本参数:CN21-1088/G4 * 1984 * b * A4 * 128 * zh * P * ¥20.00 * 1000 * 22 * 2020-03

高等农业教育,2020-3,3:84-87
Higher Agricultural Education,2020-3,3:84-87
DOI:10.13839/j.cnki.hae.2020.3.015

基于园艺疗法理念的农事训练教学改革与实践

冼丽铧,翁殊斐,陈红跃,吴楠烨,刘天颐

(华南农业大学,广东 广州 510642)

摘要:大学生亚健康问题是高等教育关注的焦点问题,学生心理和生理的健康状况是高校良好教学质量和水平的重要保障。针对当前大学生普遍存在的亚健康问题,以华南农业大学非农专业学生为研究对象,分析大学生的情绪症状现状,以提高学生身心健康状况和综合实践能力为目标,整合观赏植物认知、园艺种植实操、课前课后体验评价三大模块,提出围绕园艺疗法理念的农事训练实践教学体系,从实践教学层面提高大学生身体素质和健康水平,为提高高校实践训练教学水平提供参考。

关键词:农事训练;实践教学体系;园艺疗法;观赏植物栽植

中图分类号:G642.0　　文献标识码:B　　文章编号:1002-1981(2020)03-0084-04

伴随着经济全球化的发展,社会文化也呈现出多元化趋势,大学生的心理健康问题已成为高等教育工作的焦点[1]。在作为社会活跃力量的当代大学生群体中,有相当一部分学生存在心理健康问题,亚健康现象在大学生中较为普遍,疲劳等症状发生率较高,直接影响着社会的发展[2-3]。在校学习生活环境、饮食习惯、运动情况及自身评价尤其是压力等因素与亚健康医学症状间均有较强相关性[4]。园艺疗法是现代园林园艺的一个新兴产物[5],是对于有必要在其身体以及精神方面进行改善的人们,利用植物栽培与园艺操作活动,从其社会、教育、心理以及身体诸方面进行调整更新的一种有效的方法,对健康、亚健康人群具有保健效果[6-7]。

农事训练是面向全校非农专业的本科生开设的实践教育课程,以田间地头为课堂,以植物为对象,以学生为主体,教师将学生要理解并掌握的内容及生产措施技能进行现场示范,展示给学生并辅以讲解,然后让学生现场进行操作、演练,直至其理解、掌握为止的一种教学方法[8],是大学生通识教育课程之一。通过创新实践教学方法改革,提高实践教学质量,已经成为国内外高校教学改革与实践的重点方向之一。开展农事训练活动,培养非农专业学生"识农、尊农、爱农"的精神,提高学生的实践技能,有助于培养综合素质优良的应用型人才[9-11]。本教学改革研究将针对当代大学生心理健康存在的主要问题,基于园艺疗法的相关理论和教育方法,改革创新实践教育环节中课程教学内容设置、教学方法以及评价体系等,研究对大学生心理健康有所提高和改善的教学新途径,探讨园艺疗法在大学生教育环节中的应用和疗效,以期为实践教学环节的教学优化提供有益参考,引导大学生基于园艺疗法理念的健康生活方向。

一、非农业类专业学生情绪现状

本研究采用症状自评量表(SCL-90)对授课的354名大学二年级非农业类专业的本科生进行课前问卷调查,学生专业包括电子信息工程、电子信息科学与技术、食品科学与工程、水产养殖等,其中男生236人,占66.7%,女生118人,占33.3%;参与过园艺活动的有151人,占42.7%,没有参与过园艺活动的有203人,占57.3%。学生在课前对自己当前或过去一周的情绪情况进行评定,由收集到的数据可知,参与测试的学生自我感觉总分均介于1—3之间(1:没有,2:很轻,3:中等,4:偏重,5:严重),92.1%

基金项目:华南农业大学教改项目:基于园艺疗法理念的农事训练教学改革与实践(JG18126)
收稿日期:2019-11-23
作者简介:冼丽铧(1987-),女,林学与风景园林学院,实验师,博士研究生。研究方向:风景园林植物应用。通讯作者:刘天颐(1976-),女,林学与风景园林学院,副教授,博士。研究方向:树木育种及繁育。

的学生没有情绪症状，7.6% 的学生有很轻的情绪症状，0.3% 的学生自我感觉不佳。从躯体化、强迫、人际关系敏感、抑郁、焦虑、敌意、恐怖、偏执、精神病性、其他（饮食、睡眠）共 10 个因子分析结果可知（图 1），大部分学生的心理是健康的，少部分学生有亚健康的心理状态，体现在人际关系敏感、强迫、饮食或睡眠等方面表现较差；个别学生在人际关系敏感、饮食或睡眠、强迫等方面有心理问题；有极个别的学生表现出较强焦虑症状，显示出存在严重的心理健康问题。

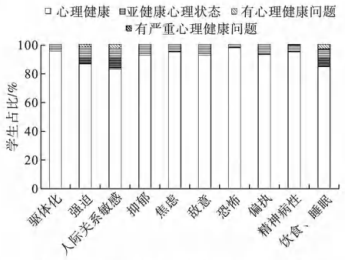


图 1　大学生 10 个情绪因子评价结果

根据学生专业可分为渔业类、电子类、食品类（图 2），总的来说，各专业学生在 10 个情绪症状因子的表现趋势一致，在饮食、睡眠、人际关系敏感以及强迫症状上的得分明显高于其它因子；从三个不同的专业类别来看，电子类专业学生的情绪症状得分均低于渔业类和食品类专业，表明该类专业学生的心理健康状况相对较好，其次是渔业类专业，而食品类专业在 10 个情绪症状因子得分均高于其它专业，尤其在饮食和睡眠上，这可能与就读食品类专业的学生更关注食品安全等社会敏感问题有关。

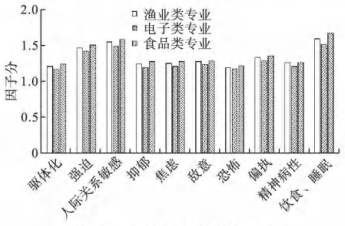


图 2　各专业学生情绪因子得分

二、构建基于园艺疗法的实践课程体系

（一）农事训练“观赏植物栽植”课程教学内容

通过植物、植物的生长环境以及与植物相关的各种活动，维持和恢复人们身体与精神技能[12]，从而达到园艺疗法的功能。在课程教学内容上，课程介绍观赏植物栽植需要用到的各种形态和材质的容器、不同功能的栽植基质、植物生长环境与条件、植物栽植技巧等内容，在理论教学中进行实践，通过实践加强对理论的体验和深入理解，二者相互渗透[13]，结合园林苗圃观赏植物、栽植方式等的参观考察，加深学生对观赏植物的认识，从而使得学生在观赏植物栽植的认知上有所收获，提高实践学习效果。

当植物对人们的五官体验建立联系时，观赏植物往往对人心理和生理产生积极的影响，无意识中产生满足感[14]，观赏植物材料的选择是课程内容的重要部分。对于非农专业的学生来说，选择养护管理相对容易的植物种类是保证疗愈保健效果持久性的关键因素之一。课程依据不同开课学期，即季节的变化，除了配置一年四季常绿的观叶植物，如绿萝（*Epipremnum aureum*）、吊兰（*Chlorophytum comosum*）外，搭配选择不同花期的观赏植物，如春学期选择金盏菊（*Calendula officinalis*）、栀子花（*Gardenia jasminoides*）、百合（*Lilium brownii*）等春夏型花卉，秋学期选择菊花（*Dendranthema morifolium*）、茉莉花（*Jasminum sambac*）等秋冬型花卉，使得学生能感知四季节律的自然变化。同时搭配多肉植物，如碰碰香（*Plectranthus 'Cerveza'n Lime'*）、子宝（*Gasteria gracilis*）；芳香植物，如薰衣草（*Lavandula angustifolia*）、迷迭香（*Rosmarinus officinalis*）、罗勒（*Ocimum basilicum*）、薄荷（*Mentha haplocalyx*）、紫苏（*Perilla frutescens*）等。从植物的质地、形态、嗅觉和味觉上等给学生带来感官体验，对其身心健康产生积极的作用。

课程最后一个程序是园艺操作活动，园艺操作活动对人身心健康的促进作用是园艺疗法最基本的内涵[15]，提供给每位学生一次观赏植物栽植实操的机会。每个人亲自选择喜欢的植物种类，在华农大园林公司的苗圃温室大棚进行栽植实训，包括分株、换盆、移植、修剪、施肥、浇水等园艺活动。栽植的过程给学生带来感官的刺激，包括触觉（用手触碰泥土、植物）、嗅觉、视觉、味觉等，从而使得学生的感官能力得到放松，在动手操作及栽培管理过程中体验生命的价值，感悟世间万物的美好，培养学生乐观自信的人生态度[16]。当学生完成课程操作内容，课后把自己栽植的小盆栽带回宿舍养护，待植物长大、开花，会增加对植物的关心，并产生成就感与自信，从而达到疗愈效果。

（二）重新构建农事训练“观赏植物栽植”课程体系

课程从教学内容、实操、评价三个层次，融入园艺疗法的理论与实践经验，建立农事训练“观赏植物栽植”的教学体系（图 3）。通过基础知识、内容、理论的讲授，循序渐进地使得学生获得新知识、新技能，主要扩宽学生的知识面，培养学生对未知事物的好奇心；

组织园艺实操活动，不仅是理论教学的必要补充，更是提高学生学习积极性、参与度的重要环节。学生亲自动手与探究，建立人与植物的自然关系，主要培养学生专注力与创造性，学会分享与交流，愉悦心情；课后植物盆栽的养护管理，主要培养学生学习与生活的兴趣，使得园艺疗法的积极影响得以持续，最终达到精神上、情感情绪上、身体上成长的教学目的。同时，课后对学生的心情状况、课程内容及体系进行问卷调查，及时反馈教学效果与质量，对教学体系及课程的园艺疗效具有促进的作用。

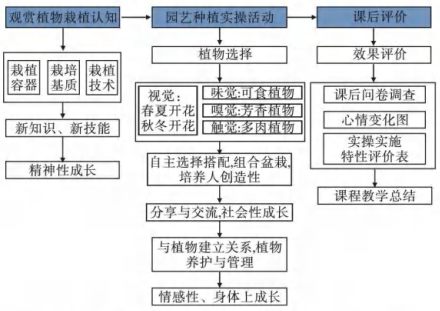


图 3　农事训练“观赏植物栽植”教学体系架构

三、建立融入园艺疗法理念的实践教学评价方法

每位学生在课前与课后的问卷调查中，利用表情符号表示心情由坏向好的变化程度，有伤心、郁闷、内心毫无波澜、喜悦、超级开心共 5 个心情，学生分别于课前与课后选出代表自己心情的表情，从而量化地评价融入了园艺疗法理念的教学效果，验证实践训练的功效。调查结果（图 4）显示，课前 57.3% 的学生心情是平静的，心情愉悦的有 35.9%，7.6% 的学生感觉郁闷或伤心，但是经过 3 小时的农事训练，可以明显地看出，学生心情变化趋向喜悦甚至超级开心的情绪状态，感受到喜悦和超级开心的学生数量明显增加，增加至 74.6%，增加了一倍以上，疗愈效果显著，而感到郁闷或伤心的学生人数呈下降趋势，只占 3.1%，比课前减少了 59.3%。从专业来看，食品类专业的学生课前与课后的心情变化明显，76.5% 食品类专业的学生课后感到喜悦和超级开心，相比课前增加了 42.8%，疗效显著。

园艺操作过程中采用的植物种类是园艺疗法的关键，根据植物的生物学特性及多方面的感官体验，本次选择了碰碰香、绿萝、薄荷、罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*、吊兰共 5 种观赏植物作为实验材料供学生自由选择。从调查结果（图 5）来看可知，39.3% 的学生选择了多肉兼香草植物碰碰香，30.0% 的学生选择了可食用的香草植物薄荷，18.9% 的学生选择了清雅挺拔的室内盆栽植物罗汉松，而相对比较少学生选择绿萝和吊兰，两者均属于室内观叶植物，可见多肉植物、香草植物、观叶植物对学生的情绪影响是有差别的，学生对多肉植物、香草植物比观叶植物更加有兴趣，对人情绪的影响也更加积极。

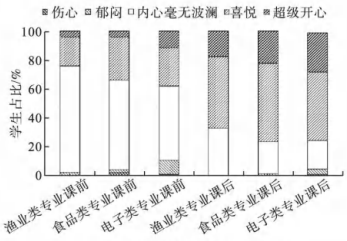


图 4　学生上课前后的心情变化

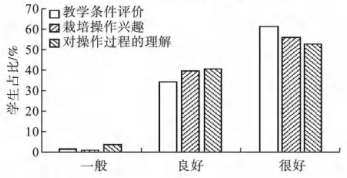


图 5　园艺操作活动的观赏植物材料选择

在园艺活动操作结束后，指导教师根据学生的观赏植物种植效果进行点评和质量评分，学生农事训练的总评成绩的评价指标包括：(1) 学生操作训练的参与度；(2) 植物栽植的规范度；(3) 植物栽植的美观度。

在农事训练结束后，学生通过对农事训练教学条件、栽培操作内容的兴趣、对操作过程的理解三方面进行课后评价，教师通过评价结果及时对教学内容进行调整。课后的评价结果（图 6）显示，学生对农事训练教学条件的满意率达 98.3%，这说明教学场地、工具设备等硬件设施较为完备，98.6% 的学生对本课程的栽培操作感兴趣、非常感兴趣的达 57.9%，96.0% 的学生能对操作过程能理解，约有 4% 的学生表示理解一般。

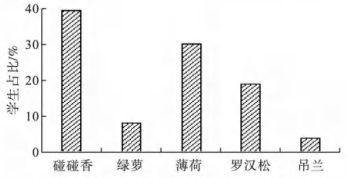


图 6　学生对教学条件与内容的评价

四、结语

农事训练课程帮助大学生身心与情绪状况的改善，观赏植物栽植作为日常生活的一个重要角色，将对学生日常生活和兴趣爱好的培养有持续的疗效与影响。学生可以通过在宿舍、家庭栽植观赏植物，获得五感体验，使其学业压力得以放松，体悟自然四季变化，尊重与热爱自然。通过课程设计，融入了园艺疗法理念的模块化实践教学改革，学生的心理或情绪状况都有所改善，农事训练教学改革取得初步成效，可以推广应用到其它实践课程的设计与教学改革中。

由于参加农事训练的学生，是非农业类学生，其观赏植物栽植的理论基础和操作技能相对农科类学生的薄弱，在实训过程中，应用新的教学理念，对植物栽植的专业理论知识和技能进行通俗易懂地讲授显得非常重要。新形势下，不断更新实践教学理念，完善教学体系，加大实训中心的建设，满足各专业的实践要求。本教学改革探索项目由于经费及气候等因素影响，以及考虑到植物栽植容易程度，课程未加入观花植物作为植物材料，有研究表明观花植物对人的感情，如气质和自信等，有更加积极的影响[17]，今后将争取在植物材料选择上的完善，充分发挥园艺疗法在农事训练课程中的积极作用。

参考文献：

[1] 穆宏浪，陈春晓. 大学生心理健康教育理论与实践研究 [M]. 北京：中国文史出版社，2015.

[2] 张高超，孙睦泓，吴亚妮. 具有改善人体亚健康状态功效的微型芳香康复花园设计建造及功效研究 [J]. 中国园林，2016，32(6)：94－99.

[3] 刘勇军，尹淑金. 珠三角高校学生亚健康的成因及对策 [J]. 广东医学，2016，37(24)：3742－3745.

[4] 晋晋. 大学生亚健康症状及成因调查 [J]. 中国科学技术大学学报，2014，44(6)：531－534.

[5] [6] 宋禹辉，鞠园华，杨超，等. 校园园艺疗法——维护大学生心理健康的新方向 [J]. 中国园艺文摘，2017，(12)：213－216.

[6] [12] [14] [15] 李树华，张文秀. 园艺疗法科学研究进展 [J]. 中国园林，2009，25(8)：19－23.

[7] 李树华. 尽早建立具有中国特色的园艺疗法学科体系(上) [J]. 中国园林，2000，16(3)：17－19.

[8] 朱翠林，海江波，冯炜. 《农事操作》课程现场教学法的探索与实践 [J]. 高教论坛，2014，(2)：66－68.

[9] 冯发强，陈益培，张秀香，等. 华南农业大学非农专业学生农学站农事训练教学研究与实践 [J]. 安徽农业科学，2013，41(36)：14137－14138.

[10] 张巨明，宋华伟. 高等农业院校草业科学专业农事训练体系的构建 [J]. 生态科学，2015，34(4)：196－200.

[11] 李新华. 德国大学植物学野外实践教学的案例分析及其启示 [J]. 实验室研究与探索，2013，32(4)：176－179.

[13] 韩彬，雷毅. 全面深化实践教学改革 培养学生工程实践能力 [J]. 实验室研究与探索，2015，34(9)：196－199.

[17] Yamane K. Effects of cut flowers on physiological and psychological parameters of human being under stress [J]. Horticultural Science，2000，14(2)：97－100.

Reform and Practice of Agricultural Training and Teaching by Horticultural Therapy

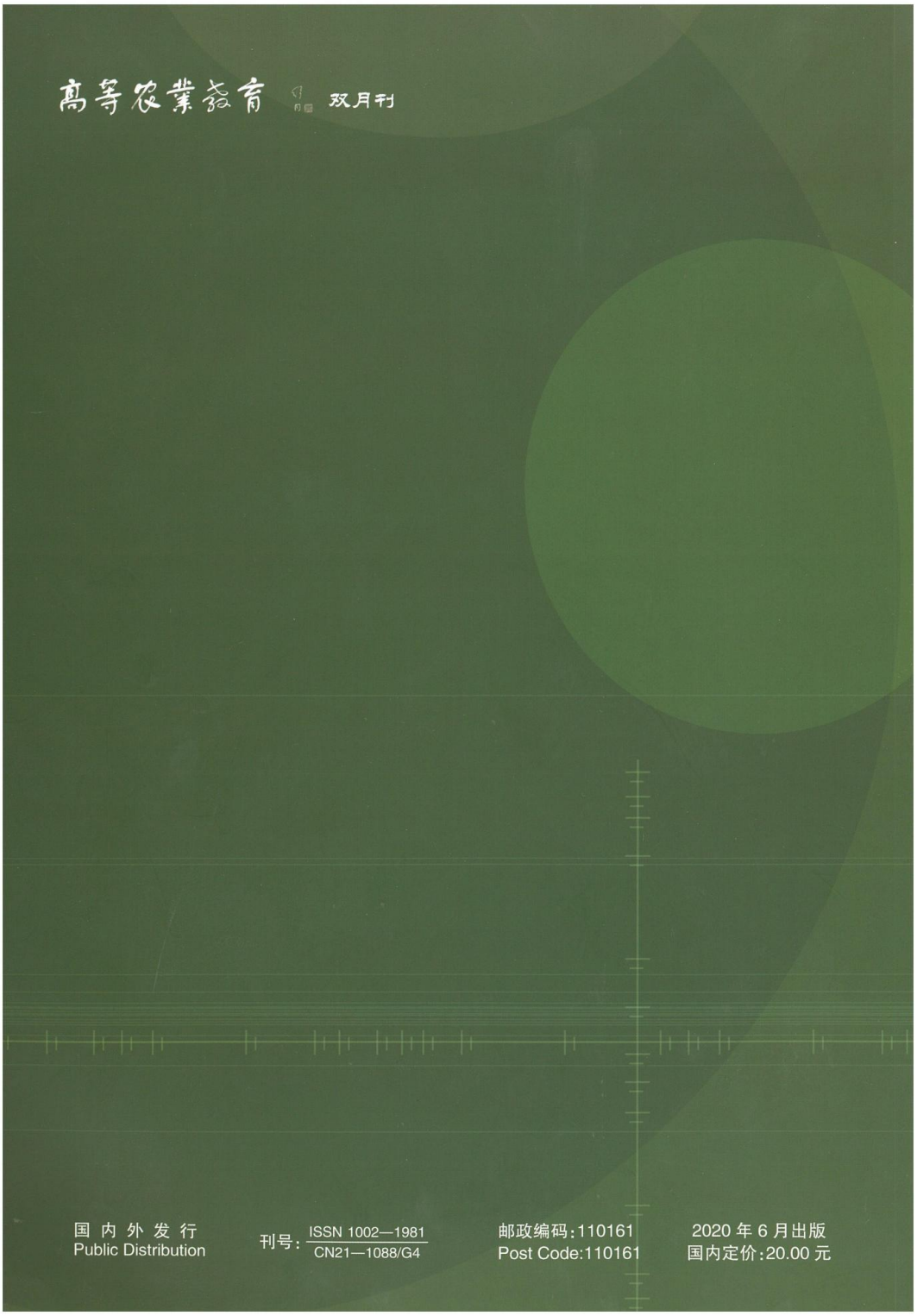
Xian Lihua，Weng Shufei，Chen Hongyue，Wu Nanye，Liu Tianyi

(*South China Agricultural University*，*Guangzhou* 510642，*Guangdong*，*China*)

Abstract：The sub-health of college students is the focus of higher education. The psychological and physiological health of students is an important guarantee for good teaching quality and level. In view of the current widespread sub-health problems of college students，this study takes the non-agricultural major students of South China Agricultural University as the research object to analyze the current situation of emotional symptoms，in order to improve the students physical and mental health and comprehensive practice ability. Three major modules，ornamental plant cognition，horticultural planting practice activity，and experience evaluation before and after class were integrated. This research proposes a practical teaching system of agricultural training centering on the concept of horticultural therapy，by improving the physical quality and health level of college students from the perspective of practical teaching，so as to provide reference for improving the teaching level of practical training in colleges and universities.

Key words：agricultural training；practical teaching system；horticulture therapy；ornamental plant planting

(责任编辑 杨思尧)


高等农業教育
双月刊
国内外发行
Public Distribution
刊号：ISSN 1002—1981
CN21—1088/G4
邮政编码：110161
Post Code:110161
2020 年 6 月出版
国内定价：20.00 元

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人**华南农业大学林学与风景园林学院冼丽铧**7篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	土壤养分、种植年限和种植方式对巴戟天寡糖含量的影响	华南农业大学学报 出版年：2021 卷期：42 3 页码：75-85 文献类型：	第一作者	B类	华南农业大学	北大核心		
2	广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造	中南林业科技大学学报 出版年：2020 卷期：40 2 页码：142-147 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
3	广州市公园棚架式植物景观评价	西北林学院学报 出版年：2019 卷期：34 1 页码：261-266 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
4	28种防火林带树种树叶抗火性能研究	河南农业大学学报 出版年：2020 卷期：54 4 页码：575-581 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
5	重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展	林业与环境科学 出版年：2021 卷期：37 3 页码：124-132 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		
6	基于无人机航拍的校园植物景观美景度评价——以华南农业大学为例	亚热带植物科学 出版年：2019 卷期：48 3 页码：285-290 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		
7	基于园艺疗法理念的农事训练教学改革与实践	高等农业教育 出版年：2020 卷期： 3 页码：84-87 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：尹银怀
华南农业大学图书馆
2023-02-27

5.教学成果奖证书

获奖成果：“传善境之道，营植景之境”风景园林植物应用课程教学改革创新与实践

获 奖 者：翁殊斐、冯志坚、冼丽铧、李自若、高　伟、秦新生、姜春宁

获奖等级：二等奖

证书编号：JXCG21065

华南农业大学

二〇二一年六月

6. 国家级一流本科课程证书

国家级一流本科课程

证书

课程类别：线下一流课程

课程名称：风景园林植物应用

课程负责人：翁殊斐

课程团队其他主要成员：冯志坚、冼丽铧、秦新生、姜春宁

主要建设单位：华南农业大学

中华人民共和国教育部

2023年5月

证书编号：2023231520

7.广东省一流本科课程证书

广东省一流本科课程

证书

课 程 名 称：风景园林植物应用

课 程 类 别：线下一流课程

课 程 负 责 人：翁殊斐

课程团队其他主要成员：（前五） 冯志坚、冼丽铧、李自若、秦新生、姜春宁

主 要 建 设 单 位：华南农业大学

广东省教育厅

2020年12月

证 书 编 号：202013070

广东省一流本科课程

证书

课 程 名 称：园林植物栽植与养护

课 程 类 别：线下一流课程

课 程 负 责 人：翁殊斐

课程团队其他主要成员：刘天颐、陈红跃、黄永芳、冼丽铧

主 要 建 设 单 位：华南农业大学

广东省教育厅

2022年10月

证 书 编 号：202210133

二、科研项目

1. 主持：广东省自然保护地典型低效林现状调查和森林质量精准提升方案编制项目

广东省林业局

粤林函〔2023〕245号

广东省林业局关于下达2024年度省级财政事业发展性支出项目计划的通知

各有关项目单位，局机关有关处（室）、直属有关单位：

为夯实项目前期准备，靠前抓好支出执行，根据《广东省人民政府关于深化预算管理改革切实提高省级年初预算到位率和资金使用效益的通知（粤府函〔2022〕236号）》、《广东省林业局林业项目全过程绩效管理办法（试行）》和《广东省林业局关于进一步规范项目绩效管理的通知》，现将2024年度省级财政事业发展性支出中，安排给省本级单位的项目计划下达给你们，并将有关事项通知如下：

一、制定资金支出计划和项目实施计划

（一）请各项目单位认真填报《项目实施工作计划统计表》和《资金支出计划统计表》（详见附件6），于1月20日前报送省林业局项目归口处室。

（二）请各项目归口业务处室审核后，连同自身承担项目的资金支出计划和项目实施计划，加盖处室公章后，于1月30日报局

规划财务处。

（三）资金支出计划自2024年1月起分月填报，每月填累计额度，原则上6月底不低于50%，10月底不低于90%，11月底支付完毕。

二、编制项目实施方案（作业设计、科研项目合同）

（一）请按照《广东省林业局关于进一步规范项目绩效管理的通知》（详见附件7）要求，根据项目计划额度以及绩效目标编写。该项目实施方案（作业设计、科研项目合同）作为项目实施、监控及验收的重要依据。

（二）项目单位编制的项目实施方案（作业设计、科研项目合同），报省林业局归口处室备案或审批；业务处室自身承担项目实施方案报分管局领导审定。

三、其他要求

涉及政府采购的项目，请根据该项目计划，抓紧开展政府采购意向公开等项目前期工作，确保资金下达后可以立即形成支出。

附件：1.2024年绿美广东生态建设重点任务保障专项资金（森林资源培育、森林资源管护、林业生态保护建设）项目计划

2.2024年绿美广东生态建设重点任务保障专项资金（国家公园）项目计划

3. 2024 年绿美广东生态建设重点任务保障专项资金（穿山甲研究中心建设）项目计划

4. 2024 年海洋事业费及海洋环境损失赔偿款项目计划

5. 2024 年省财政省级以上公益林效益补偿资金项目计划

6. 项目实施工作计划统计表及资金支出计划统计表

7. 广东省林业局关于进一步规范项目绩效管理的通知

8. 各二级项目绩效目标表

广东省林业局

2023 年 12 月 27 日

公开方式：不公开

校稿：翁迪君

附件1

2024年绿美广东生态建设专项资金（省级组织实施）分配方案（按项目单位）

序号	项目单位	一级项目名称	二级项目名称	建议安排金额	归口处室	备注1
合计				5,736.50		
	115017-广东省环境科学研究院			**90.00**		
1	广东省环境科学研究院	林业生态保护建设	广东省典型自然保护地生态环境状况监测评估	90.00	保护地处	
	140001-广东省妇女联合会			**200.00**		
2	广东省妇女联合会	森林资源管护	广东省巾帼油茶园（2024年）	200	改革发展处	根据局党会组意见，2024年安排200万元。
	156003-华南农业大学			**1,090.00**		
3	华南农业大学	林业生态保护建设	广东省自然保护地典型低效林现状调查与森林质量精准	120.00	保护地处	
4	华南农业大学	林业生态保护建设	自然保护地建设与乡村振兴的融合机制及实现模式	20.00	保护地处	该项目共110万元，其中2023年安排90万元；2024年计划安排20万元。
5	华南农业大学	林业生态保护建设	连南大叶茶林麝等四种珍稀濒危动植物种质资源发掘与	140.00	动植物处	
6	华南农业大学	森林资源管护	松材线虫病防控成效评估与疫情检测鉴定	150.00	防治检疫处	
7	华南农业大学	森林资源管护	广东省松材线虫病生物防治微生物制剂效能评价与示范	70.00	防治检疫处	
8	华南农业大学	森林资源管护	装配式圆竹建材绿色制备关键技术研究及应用	300.00	科技处	科研项目
9	华南农业大学	森林资源培育	全省林木种质资源调查（5个市）	150.00	林场种苗处	该项目共750万元，其中2022-2023年各已安排250万元；2024年计划安排150万元。
10	华南农业大学	森林资源培育	森林质量精准提升和大径材培育示范林建设森林资源本	90.00	生态修复处	
11	华南农业大学	森林资源管护	绿美广东科技团队支撑	50.00	绿美工作专班	
	156015-仲恺农业工程学院			**150.00**		
12	仲恺农业工程学院	森林资源管护	高州油茶分子标记辅助育种技术体系构建与应用	150.00	科技处	科研项目
	156086-广东生态工程职业学院			**390.00**		
13	广东生态工程职业学院	林业生态保护建设	广东省湿地公园科普宣教体系建设研究	120.00	湿地处	
14	广东生态工程职业学院	森林资源管护	林业有害生物检测鉴定及松材线虫病新发疫情排查	40.00	防治检疫处	
15	广东生态工程职业学院	森林资源管护	广州市小微湿地生态现状评价及保护修复关键技术研究	130.00	科技处	科研项目
16	广东生态工程职业学院	森林资源管护	基于mNGS和CRISPR-Cas12a监测福田国际重要湿地鸟类新	50.00	科技处	科研项目
17	广东生态工程职业学院	森林资源管护	植物源杀松材线虫活性成分的筛选及其应用技术研究	50.00	科技处	科研项目
	199001-广东省林业局			**3,816.50**		
18	广东省林业局	林业生态保护建设	广东省自然保护地地理空间数据（标准化）治理	199.00	保护地处	
19	广东省林业局	林业生态保护建设	自然保护地生态旅游及新建、调整、占用自然保护地技	130.00	保护地处	
20	广东省林业局	林业生态保护建设	广东省保护地建设管理能力提升	120.00	保护地处	
21	广东省林业局	森林资源管护	广东省林长制实施情况第三方评估（2024年）	480.00	林长办	
22	广东省林业局	森林资源管护	林业项目管理	200.00	规财处	
23	广东省林业局	森林资源管护	广东省“南粤红绿径”品牌建设与推介	145.00	机关党委	
24	广东省林业局	森林资源管护	全国森林消防员职业技能竞赛选拔组训经费	96.00	林火预防处	
25	广东省林业局	森林资源管护	内部审计业务	73.50	审计办	
26	广东省林业局1	森林资源管护	广东省森林保险险情分析与监控	63.00	规财处	
27	广东省林业局	森林资源管护	广东省林长制体制机制研究与成果转化项目（2024）	35.00	林长办	
28	广东省林业局	森林资源管护	党建工作学习与宣传	30.00	机关党委	
29	广东省林业局	森林资源管护	广东省森林保险结算审核	25.00	规财处	
30	广东省林业局	森林资源管护	林业普法宣传	20.00	政策法规处	
31	广东省林业局	森林资源管护	第五届中国绿化博览会广东参展工作	710.00	生态修复处	该项目共1200万元，其中2024年计划安排710元；2025年计划安排440万元；2023年已安排
32	广东省林业局	森林资源管护	绿美广东生态建设能力提升	480.00	绿美工作专班	
33	广东省林业局	森林资源管护	广东林业博览会（2024年）	550.00	改革发展处	
34	广东省林业局	森林资源管护	广东省村庄绿化状况调查	340.00	生态修复处	该项目共1588万元，其中2020年已安排228万元；2021-2024年每年计划安排340万元。
35	广东省林业局	森林资源管护	组织参展参加林业重点展会、节会活动	120.00	改革发展处	

2024年自然保护地入库项目

广东省自然保护地典型低效林现状调查与森林质量精准提升方案编制

实施方案

项目名称：广东省自然保护地典型低效林现状调查与森林质量精准提升方案编制

项目执行单位（盖章）：华南农业大学

编制时间：2024.1.5

目　　录

第二章 项目建设内容

（1）广东省自然保护地典型低效林现状调查

根据《广东省林业局关于印发森林质量精准提升行动技术指南的通知》等技术规范要求，通过查阅国内外文献资料、二类调查数据等，充分收集与广泛调查广东省自然保护地典型低效林的现状情况，包括低效林的界定、现状、林分组成、形成原因等。

（2）提出基于适地适树的低效林质量精准提升技术措施

基于上述的广泛低效林现状调查，整理归类低效林的类型、林分特征、立地条件、主要功能等资料，从适地适树的视角，制定改造技术措施和建设措施，集成广东省自然保护地典型低效林林分改造技术措施，包括采伐、抚育、造林和更新等技术措施，充分发挥森林的多目标、多功能效益。

（3）编制一套广东省自然保护地典型低效林质量精准提升方案

应用上述基于适地适树的低效林质量精准技术措施，围绕“突出特色、设计美观、科学施策”原则，遵循“适地适树”、“多做加法、少做减法”的措施，分类施策，采取相应的森林精准提升技术进行改造，丰富林分组成，提升森林景观与生态效益，提供更多优质生态产品，不断满足人民日益增长的优美生态环境需要，最终形成一套全省自然保护地低效林森林质量精准提升方案，得以全面推广应用，为全省自然保护地森林质量精准提升提供技术指导。

第三章 项目实施方案

3.1 项目建设技术路线

见图 1。

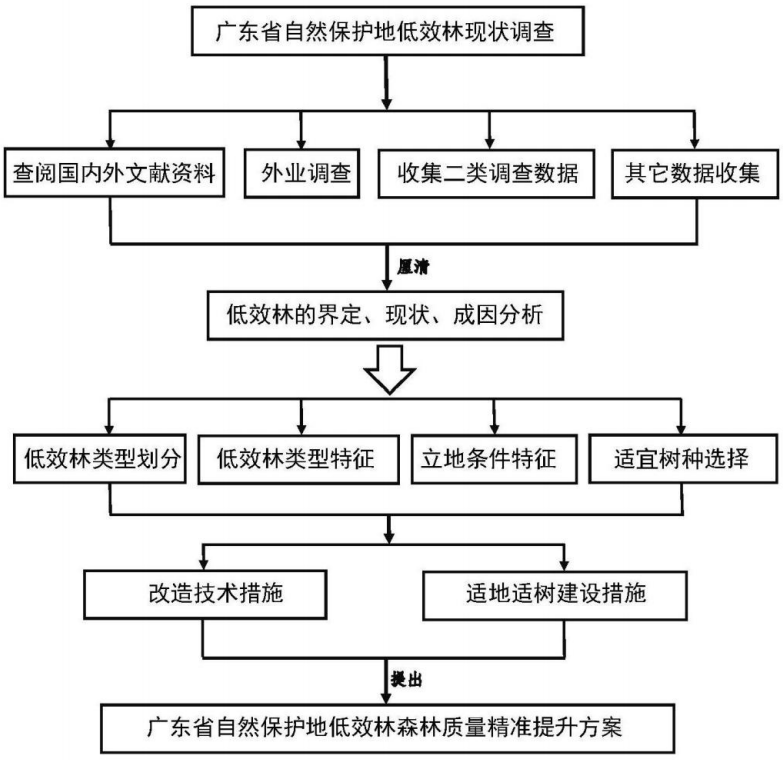


图 1 技术路线图

3.2 项目工作方案

（1）摸底调查，厘清广东省自然保护地低效林的现状

1. 向各类型的保护地收集低效林的资料信息，收集二类调查数据，结合调查现状，进行综合分析，总结和分析出保护地低效林的主要类型、特征等。

2. 调查全省典型保护地低效林现状。主要内容包括：低效林的

现状、成因、低效林类型及特征、立地条件特征、树种选择等。

3．重点调查面积大、数量多的低调林现状、面积、形成原因、立地条件、树种选择、改造措施等文献资料。

（2）归纳总结，提出广东省自然保护地不同类型的低效林质量精准提升技术

根据典型低效林各种类型的特征，充分利用原有林分的条件，分析保护地天然林群落和树种组成，借鉴省内优秀的低效林改造案例以及建设点，细化人工造林、全面优化、块状优化、带状优化、林窗优化、森林抚育等6大主要技术措施，提出一套可操作的、具有推广应用价值的结构合理、林分稳定、质量优化的多树种、多层次的地带性森林群落提升技术，提出适地适树对策。

（3）技术集成，实施精准提升的适地适树示范点建设

围绕上述“突出特色、设计美观、科学施策”原则，遵循“适地适树”、“多做加法、少做减法”的措施，分类施策，设计精准改造技术，丰富林分组成，提升森林景观与生态效益，建成森林质量精准提升的示范点。

6.2 项目负责人及主要参加人员

项目负责人

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
冼丽铧	女	36	研究生	实验师	森林培育	项目主持与实施	华南农业大学
陈红跃	男	59	研究生	教授	森林培育	项目主持与指导	华南农业大学

项目主要参加人员

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
吴道铭	男	36	研究生	副教授	森林生态	数据分析	华南农业大学
潘澜	女	36	研究生	副教授	森林培育	外业调查	华南农业大学
曾曙才	男	52	研究生	教授	森林生态	技术指导	华南农业大学
赵倩	女	32	研究生	讲师	森林生态	数据分析	华南农业大学
孙同高	男	33	研究生	工程师	森林培育	资料收集和示范点建设	广州紫荆林业规划设计有限公司
温益章	男	28	研究生	助理工程师	林业	资料收集和示范点建设	广州紫荆林业规划设计有限公司
陈旭	男	31	研究生	工程师	林业	资料收集和外业调查	广州草木蕃环境科技有限公司
曾江	男	28	研究生	助理工程师	林业	资料收集和外业调查	广州草木蕃环境科技有限公司
方健波	男	30	研究生	学生	生态学	数据处理和报告撰写	华南农业大学
卢德浩	男	28	研究生	学生	林业	数据处理和报告撰写	华南农业大学
郑锋霖	男	29	研究生	学生	林业	外业调查	华南农业大学
古佳玮	女	25	研究生	学生	林业	外业调查	华南农业大学
帅晓迈	女	24	研究生	学生	风景园林	外业调查	华南农业大学
杨佳曼	女	25	研究生	学生	林学	外业调查	华南农业大学
李程	男	25	研究生	学生	林业	外业调查	华南农业大学

2. 主持：森林生态科技研究与推广项目

2021 年省级生态公益林效益补偿资金省统筹经费项目实施方案

项目名称：森林生态科技研究与推广

申报单位：华南农业大学（盖章）

项目负责人：冼丽铧 苏志尧 刘天颐 手机：13760755892

项目联系人：冼丽铧 手机：13760755892

项目起止年限：2021 年 1 月 至 2021 年 12 月

广东省林业局

2020 年 6 月

目　　录

益林样地调查技术规程》（广东省地方标准，DB 44/ T 1389-2014，广东省质量技术监督局，2014）。参与完成的项目《江门市市区园林绿地植物群落及其生态效益研究》2014 年获江门市科学技术奖,二等奖（排名第 2），《森林冰雪灾害损失评估、减灾及次生灾害防控技术研究》2014 年获广东省科学技术奖（排名第 8）。近 2 年来，其研究团队在粤东的河源地区开展生态公益林森林生态效能监测和计量，建立了可长期复查的固定样地，并以该样地为研究对象已发表 SCI 论文 3 篇，中文核心 3 篇，博士论文 2 篇，硕士论文 3 篇。

项目负责人刘天颐，博士，副教授，硕士生导师。长期从事松树遗传改良研究工作，参与广东省英德木荷初级无性系种子园的营建工作。主持和参加多项国家重点研发专项子课题、国家自然科学基金项目、广东省重点研发领域项目子课题、中央财政林业科技推广项目。获第十届梁希林业科学科技进步奖二等奖、2017 年度广东省农业技术推广二等奖；获审定的广东省林木良种 8 个；在《林业科学》、《林业科学研究》、《Tree Genetics & Genomes》、《Silvae Genetica》等期刊发表论文 10 多篇。

7.2 项目负责人及主要参加人员

项目负责人

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
冼丽铧	女	33	研究生	实验师	森林培育	项目主持与实施	华南农业大学
苏志尧	男	57	研究生	教授	森林生态	森林生态系统功能研究与评价	华南农业大学

刘天颐	女	44	研究生	副教授	林木育种	木荷种质收集与评价	华南农业大学

项目主要参加人员

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
陈红跃	男	56	研究生	教授	森林培育	技术统筹指导	华南农业大学
黄少伟	男	57	研究生	教授	林木育种	木荷种质收集	华南农业大学
曾曙才	男	49	研究生	教授	森林生态	生态监测指导	华南农业大学
孙　思	男	40	研究生	副教授	森林保护	无人机技术指导	华南农业大学
翁殊斐	女	51	研究生	副教授	风景园林	景观生态	华南农业大学
贾小容	女	42	研究生	副教授	森林生态	森林生态	华南农业大学
陈燕明	男	45	本科	副教授	风景园林	景观生态	华南农业大学
李镇魁	男	52	研究生	副教授	植物学	植物分类	华南农业大学
吴道铭	男	33	研究生	副教授	森林生态	生态监测	华南农业大学
王金榜	男	58	大专	高级工程师	林木育种	木荷种质收集	英德市林业科学研究所
孙同高	男	30	研究生	工程师	森林培育	监测技术研究	广州紫荆林业规划设计有限公司
潘　澜	女	33	研究生	讲师	森林培育	生态监测	华南农业大学
赵　倩	女	31	研究生	讲师	森林生态	生态监测	华南农业大学
温益章	男	25	研究生	技术员	林业	内外业	广州紫荆林业规划设计有限公司
林　娜	女	34	研究生	讲师	森林培育	无人机技术指导	华南农业大学
唐　婕	女	25	本科	研究生	风景园林	内外业	华南农业大学
肖可菁	女	23	本科	研究生	林业	内外业	华南农业大学
郭彩霞	女	25	本科	研究生	风景园林	内外业	华南农业大学

区卓贤	男	25	本科	研究生	农艺与种业	内外业	华南农业大学
朱铧楠	女	23	本科	研究生	风景园林	内外业	华南农业大学
李　铄	男	23	本科	研究生	林业	内外业	华南农业大学
吴楠烨	男	23	本科	本科生	园林	内外业	华南农业大学

8 项目风险分析及对策

项目实施中，无人机遥感技术的应用存在一定的风险，主要有：（1）各种野外条件和自然灾害可能对无人机设备构成威胁；（2）密林区的林下数据往往由于遮挡存在缺失；（3）基于拍摄的照片来肉眼辨识图像工作效率偏低。木荷是生态公益林主要造林树种，对其开展种质资源收集与研究无生态效益风险。

上述问题的对策：（1）避免下雨天、大风天使用设备；（2）必要时补充地面调查；（3）通过无人机技术培训，学习无人机影像分析软件或方法，与无人机遥感专家的合作挖掘影相中更多的信息。

9 课题组发表的相关研究成果附件

[1]冼丽铧,吴楠烨,陈红跃*,梁婉莹,黄子航,甘洪旭.基于无人机航拍的校园植物景观美景度评价——以华南农业大学为例[J].亚热带植物科学,2019,48(3):285-290.

[2]杜澄举,李赛楠,孙思,宁华珙,黄少伟.无人机低空遥感技术辅助高精度造林[J].林业与环境科学,2019,35(1):49-53.

[3]王上上,王军,孙思.无人机遥感技术对园林树木的计数统计[J].

10 项目单位责任

项目单位责任	该申请项目拟在广东省重点生态公益林区域开展基于无人机遥感技术的林木生长、生物入侵、自然灾害等调查，形成无人机监测生态公益林体系；设置监测样地，对公益林进行自然度指标的调查，并对其生态效益进行了定位监测森林自然度及生态系统服务功能研究和评价，提出广东生态公益林自然度和生态系统服务评价指标体系，并据此完成相关的评价；广泛收集木荷种质资源，拓展木荷遗传基础，评估木荷种质资源的繁育特性，筛选出能高效繁育的优良种质。项目的开展将对广东省林业生态建设具有重要的应用价值。项目负责人和项目组成员研究基础扎实，学风严谨，已积累了相关的研究工作经验。该研究主题新颖，研究目标明确，内容有特色，技术路线和措施明确，研究方法可行，经费预算合理，有能力取得预期成果。 项目单位（盖章）：　　法人代表（签字）： 2020 年 9 月 21 日

3. 主持：广东省造林树种功能性状筛选和固碳机制分析项目

子课题编号：2023KJCX001-02

基于高碳汇目标的造林树种筛选和林分结构研究项目
子课题

子课题名称：广东省造林树种功能性状筛选和固碳机制分析

所属项目/编号：基于高碳汇目标的造林树种筛选和林分结构研究（2023KJCX002）

项目牵头承担单位：华南农业大学

子课题承担单位：华南农业大学

子课题负责人：冼丽铧

联系方式：13760755892

起止年限：2023 年 1 月至 2026 年 12 月

二〇二〇年制

一、子课题任务分工
1、与收集 50 种以上广东省造林树种的叶结构、生物化学指标、水力特性、气体交换、生态习性等指标数据，构建造林树种在不同林分结构中的“植物功能性状网络”（Plant trait networks, PTNs）指标体系，分析功能性状网络与碳汇和立地条件之间的相关关系，建立广东省常用造林树种功能性状数据库 1 个。 2、基于广东省常用造林树种功能性状数据库，针对广东省高碳汇树种和组合筛选，及其林分结构优化的情况，并进一步通过栽培试验和林分改造试验验证，集成一套旨在提高广东省人工林固碳效益的树种筛选和林分结构优化技术体系，最终提出高固碳造林树种筛选技术标准草案1项。

二、子课题业绩指标
1、约束性指标 （1）总结归纳出广东省常用造林树种功能性状数据库 1 个； （2）提出高固碳造林树种筛选技术标准草案 1 项； （3）发表论文 3 篇； （4）项目团队成员晋升高级职称 1-2 名； （5）培养硕士研究生 2-3 名。
2、预期性指标 **经济效益**：基于高固碳目标的人工造林可能无法通过木材产生直接的经济效益，但可以引入企业资金进行碳汇交易或补偿，另外还可以为区域经济发展提供更大的环境承载力，产生巨大的直接经济效益和间接经济价值。 **生态效益**：人工造林是一种基于自然的应对气候变化且具有成本效益的解决方案，通过营建功能性状协调稳定、固碳潜力突出的林分结构，不仅可以减缓气候变化，还可以促进人工林生态服务功能的提升，包括释放氧气、水源涵养、保育土壤、净化大气、维持生物多样性、减轻或减少自然灾害和病虫害等。 **社会效益**：通过高固碳树种和组合筛选、以及林分结构优化研究，可进一步提升广东省人工林整体的碳汇功能，为国家“双碳”战略贡献广东森林的碳汇能力。

2

三、子课题年度计划	
月份	工作内容
1 月实施计划	研究方案制定和细化
2 月实施计划	广东省固碳树种功能性状文献资料收集
3 月实施计划	广东省固碳树种功能性状文献资料收集
4 月实施计划	广东省固碳树种功能性状文献资料收集
5 月实施计划	树种功能性状分析
6 月实施计划	树种功能性状分析
7 月实施计划	筛选高固碳功能树种
8 月实施计划	筛选高固碳功能树种
9 月实施计划	筛选高固碳功能树种
10 月实施计划	提出高固碳功能树种组合
11 月实施计划	提出高固碳功能树种组合
12 月实施计划	撰写高固碳造林树种筛选技术标准草案

四、子课题研究人员					
子课题负责人					
姓名	性别	年龄	职务/职称	工作单位	任务分工
冼丽铧	女	36	实验师	华南农业大学	子课题统筹开展与项目财务管理
子课题成员					
潘澜	女	36	讲师	华南农业大学	林分结构优化

胡文涛	男	36	讲师	华南农业大学	林分结构优化
陈红跃	男	59	教授	华南农业大学	项目协调实施
孙同高	男	33	工程师	广州紫荆林业规划设计有限公司	样地调查
古佳玮	女	26	研究生	华南农业大学	数据收集与梳理
郑锋霖	男	26	研究生	华南农业大学	数据收集与梳理
帅小迈	女	24	研究生	华南农业大学	样地调查
李程	男	24	研究生	华南农业大学	样地调查
杨佳曼	女	24	研究生	华南农业大学	数据收集与梳理

五、经费来源与支出预算			万元
预算科目名称	**合计**	**省财政科技资金**	**自筹经费**
一、经费来源	60.0	60.0	0
二、经费支出			
（一）直接费用	48	用途说明	
1.设备费	4.0	购买图形工作站 1 台	0
2.材料费	5.0	购买相关实验耗材等费用	0
3.出版/文献/信息传播/知识产权事务费	2.0	论文发表版面费、资料复印打印费	0
4.会议培训费	0.0	无	0
5.差旅费	4.0	赴广东省各地进行植物功能性状调查	0
6.劳务费	13.0	直接人力劳务费	0
7.委托业务费	15.0	委托华南植物园进行植物功能性状机器学习运算。	0
8. 专家咨询费	5.0	项目评审和咨询的专家费	0
9. 直接费用其他支出	0.0	无	0
（二）间接费用	12	/	0
10.管理成本	0		0
11．绩效支出	12		0

七、子课题签订各方盖章

项目承担单位（甲方）：华南农业大学（盖章）

项目负责人（签字）：

单位负责人（签章）薛红卫

2024年3月12日

任务承担单位（乙方）：华南农业大学（盖章）

项目负责人（签字）：

单位负责人（签章）薛红卫

2024年 3月12 日

4. 主持：广东省自然保护区人为干扰对生态退化的影响与修复项目

项目实施方案

自然资源事务管理-生态林业建设专项资金

（自然保护地建设）项目

项目名称：广东省自然保护区人为干扰造成的生态退化评估及修复对策

项目单位：华南农业大学（公　章）

项目申报部门 林业主管部门（公章） 财政局（公章）

项目申报文号

项目申报日期 2021 年 7 月 5 日

一、项目基本信息

1.项目名称	广东省自然保护区人为干扰造成的生态退化评估及修复对策
2.项目属性	√新建　o扩建　o改建
3.立项情况	1.发改部门立项情况 2.政数局立项情况
4.总投资	80.0 万元
(1)申请财政补助	80.0 万元
① 省级资金	80.0 万元
②地方财政	
(2)项目单位自筹	
(3)银行贷款	
(4)其他投入	
5.项目单位	项目单位主要负责人及电话: 韩雨辰 020-85283435
	项目单位财务负责人及电话: 肖斐 020-85288381
	项目负责人及电话: 冼丽铧 陈红跃 13760755892 13802446788

二、项目可行性研究报告摘要（1）

1.项目总论	主要包括：项目单位概要，项目建设地点概要，项目规划布局，等。 **1.1 项目单位概要** 华南农业大学林学与风景园林学院（原林学院）是华南农业大学最早设立的学院之一，历史悠久，源远流长。学院学术积淀深厚。著名林学家、林业教育家沈鹏飞、陈焕镛、侯过、蒋英、徐燕千等一大批教授曾在学院潜心教学和从事科研，为推动新中国林业教育与林业事业发展作出了巨大贡献。 学院学科和专业建设优势突出。现有林学一级学科博士学位授权点，植物学、生态学学科覆盖下的 2 个博士学位授予点，林学、草学和风景园林学 3 个学术硕士学位授予点，涵盖林木遗传育种、森林培育学、森林经理学、森林保护学、森林生态学、野生动植物保护与利用、园林植物与观赏园艺等方向，林业、农艺与种业和风景园林 3 个专业硕士学位授予点。现有林学、风景园林、园林、城乡规划、森林保护、旅游管理、草业科学、中药资源与开发、野生动物与自然保护区管理等 9 个本科专业。林学学科为国家林业局重点学科，林学、风景园林和园林 3 个专业被教育部批准为国家一流本科专业建设点。学院科研条件良好。有“亚热带农业生物资源利用与保护国家重点实验室（部分）”“农业部能源植物资源与利用重点实验室”“广东省森林植物种质创新与利用重点实验室”“广东省木本饲料工程技术研究中心”“广东省农林生物质工程技术研究中心”“广东省自然保护区研究中心”和“广东鹅凰嶂野外科学观测研究站”7 个省部级科研平台。 学院师资力量雄厚。现有教职工 219 人，其中教授 44 人，副教授 69 人，博士生导师 28 人，学术型硕士生导师 81 人，专业学位硕士生导师 137 人。有国家杰出青年科学基金获得者等国家级人才 2 人，全国模范教师 1 人，广东省“特支计划”百千万工程青年拔尖人才 1 人。

二、项目可行性研究报告摘要（2）

<table>
<tr>
<td>5.目标合理性</td>
<td>项目总体绩效目标（定性描述）（该部分以表格和文字的形式说明，表样详见附 2）

表 3 项目总体绩效目标　　单位：万元
<table>
<tr><td>资金总额度</td><td colspan="6">80.0</td></tr>
<tr><td>资金分年度额度</td><td>2022 年</td><td>80.0</td><td>2023 年</td><td>0.0</td><td>2024 年</td><td>0.0</td></tr>
<tr><td>项目绩效总体目标</td><td colspan="6">人类对生态系统干扰作用的方式和变化规律具有很强的现实性和紧迫性，本研究拟在广东云开山国家级自然保护区、广东大埔丰溪省级自然保护区和东莞马山市级自然保护区开展人为干扰方式和干扰强度等研究，建立自然保护区人为干扰风险评价体系。项目建设内容如下：
（1）样地调查自然保护区人为干扰的类型和方式；
（2）初步建立自然保护区干扰性质及特点的监测方案；
（3）设置监测样地，对自然保护区进行森林植被、土壤理化指标等跟踪调查，定位监测其生态退化影响；
（4）建立对退化生态系统的评价指标体系，综合评价人为干扰下广东省自然保护区的生态退化情况，研究人为干扰对自然保护区自然环境和生态系统的影响，提出生态系统退化诊断方法，研究出发挥自然保护区的生态效益和社会效益的修复策略。</td></tr>
<tr><td>项目绩效年度目标</td><td colspan="6">（1）样地调查自然保护区人为干扰的类型和方式；
（2）初步建立自然保护区干扰性质及特点的监测方案；
（3）设置监测样地，对自然保护区进行森林植被、土壤理化指标等跟踪调查，定位监测其生态退化影响；
（4）建立对退化生态系统的评价指标体系，综合评价人为干扰下广东省自然保护区的生态退化情况，研究人为干扰对自然保护区自然环境和生态系统的影响，提出生态系统退化诊断方法，研究出发挥自然保护区的生态效益和社会效益的修复策略。</td></tr>
</table>
</td>
</tr>
</table>

二、项目可行性研究报告摘要（3）

<table>
<tr><td>7.资金筹措</td><td>主要包括：项目筹资渠道是否明确和合法合规，筹资方式是否合理，是否属于公共财政支持范围，投入方式是否最优，除财政资金以外自筹资金情况等。

本项目资金共 80.0 万元，资金来源主要依靠省财政的 2022 年自然资源事务（生态林业建设）专项资金。其中实验室的研究工作除省财政专项外，其它资金来自本单位实验室维持经费，因数额小，不确定，故未列入配套资金数量。</td></tr>
<tr><td rowspan="2">8.资金支出计划</td><td>资金分年度实施计划，主要表述项目分几年实施，每年可支出资金额度。

项目分 3 年实施，第 1 年计划 80.0 万元，占总经费的 100%。</td></tr>
<tr><td>资金当年度支出计划（该部分以表格和文字的形式说明，表样详见附 3）
表 5 项目资金支出计划统计表
（每月的支出计划额度为累计额度） 单位：万元
<table><tr><td>年度</td><td>2022 年</td><td>2023 年</td><td>2024 年</td></tr><tr><td>截至 1 月底</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>截至 2 月底</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>截至 3 月底</td><td>10</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>截至 4 月底</td><td>15</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>截至 5 月底</td><td>20</td><td>5</td><td>5</td></tr><tr><td>截至 6 月底</td><td>25</td><td>10</td><td>10</td></tr><tr><td>截至 7 月底</td><td>30</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>截至 8 月底</td><td>30</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>截至 9 月底</td><td>30</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>截至 10 月底</td><td>35</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>截至 11 月底</td><td>35</td><td>15</td><td>15</td></tr><tr><td>截至 12 月底</td><td>35</td><td>20</td><td>20</td></tr><tr><td>资金额度合计</td><td>40</td><td>20</td><td>20</td></tr></table></td></tr>
</table>

二、项目可行性研究报告摘要（4）

10.项目单位责任	项目单位（盖章）：　　法人代表（签字）： 二〇二一年七月六日 项目单位法人代表对报告的准确性、真实性负责。

县级林业部门意见	县级财政部门意见
项目及所附相关材料的真实性和可行性审核意见： （局公章） 二〇　年　月　日	项目申报条件、资金扶持范围、资金用途等合规性审核意见： （局公章） 二〇　年　月　日
地级以上市林业部门意见	**地级以上市财政部门意见**
项目及所附相关材料的真实性和可行性审核意见： （局公章） 二〇　年　月　日	项目申报条件、资金扶持范围、资金用途等合规性审核意见： （局公章） 二〇　年　月　日

备注：1.该申报文本适用省本级单位申报项目；2.该申报文本适用市县申报未纳入涉农资金统筹整合范围的项目；3.省本级单位无需市县主管部门出具意见和加盖公章。4.项目申报过程中有其他规定的，以具体文件通知为准。

華南農業大學

华南农业大学关于报送2022年自然保护地项目入库申报的函

广东省林业局：

根据《广东省林业局关于做好2022年有关自然保护地项目入库申报的通知》（广东省林业局，2021年6月）的要求，我校林学与风景园林学院冼丽铧与陈红跃老师申报“广东省自然保护区人为干扰造成的生态退化修复对策”项目。该项目材料真实、齐全和有效，研究目的明确，研究方法可行，经费预算合理，取得预期成果。

现将申报材料上报，请审批。

附件：

1. 项目申报单位的申报请示文件
2. 项目申报汇总表
3. 项目资金额度测算表
4. 项目绩效目标申报表
5. 项目资金支出计划统计表
6. 项目实施工作计划统计表
7. 项目申报文本

华南农业大学

2021年7月5日

2022年度自然资源事务专项资金-生态林业建设（省级组织实施）项目计划

单位：万元

序号	项目单位	项目名称	业务处室	立项总金额	子项目		备注
					项目内容	金额	
		总计		49,401.62			
	156003-华南农业大学 汇总			1,805.00			
1	156003-华南农业大学	广东省自然保护区人为干扰对生态退化的影响与修复	保护地处	80.00			
2	156003-华南农业大学	基于比较基因组学的紫萍水政护与繁育图谱	动植物处	30.00			
3	156003-华南农业大学	粤北珍稀和重要濒危种质资源调查与遗传材料保存	动植物处	30.00			
4	156003-华南农业大学	城中和背景下广东省典型乡土树种组大径材培育关键技术体系构建与示范	科技处	300.00			科研项目，2021年已下达300万元
5	156003-华南农业大学	广东省典型红树林与社区渔业生态模式研究及示范	科技处	150.00			科研项目
6	156003-华南农业大学	基于桉树修枝剩余物高效利用关键技术研究与示范	科技处	150.00			科研项目
7	156003-华南农业大学	水稻黄萎病防控资源挖掘与应用研究（2022年）	科技处	75.00			科研项目
8	156003-华南农业大学	粤西地区优质高产林分碳汇潜力提升的集团经营体系构建	科技处	50.00			科研项目
9	156003-华南农业大学	基于功能性状筛选南亚热带城市绿化和抗干旱性乔灌木树种	科技处	30.00			科研项目
10	156003-华南农业大学	林木种质资源调查	林场种苗处	250.00			
11	156003-华南农业大学	石榴含笑和诗歌湖水杉抗逆性育种与繁育	林场种苗处	20.00			
12	156003-华南农业大学	大叶桉和木荷良种选育繁育	林场种苗处	20.00			
13	156003-华南农业大学	油茶良种选育与繁育	林场种苗处	20.00			
14	156003-华南农业大学	华南农业大学自然教育基地建设和完善项目	政务中心	100.00			

5. 主持：广东省自然保护地主要自然资源调查监测技术体系研究项目

广东省财政厅文件

粤财资环〔2021〕15号

广东省财政厅关于安排2021年度自然资源事务管理-生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批的通知

省有关单位：

根据省林业局《关于报送2021年度自然资源事务管理—生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批分配方案及绩效目标的函》（粤林函〔2020〕367号），经研究，现将2021年度自然资源事务管理—生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批及绩效目标下达给你们（具体项目、金额、支出科目详见附件1，绩效目标详见附件2），并将有关事项通知如下：

此项资金请按照《广东省人民政府关于印发广东省省级财政专项资金管理办法（试行）的通知》（粤府〔2018〕120号）及

－ 1 －

《广东省涉农资金统筹整合管理办法》（粤财农〔2019〕115号）的有关规定使用。各有关单位应抓紧将资金安排到具体项目，切实加快预算执行，年终按规定编报支出决算。请按照有关规定做好资金管理工作，确保专款专用，加强资金绩效管理，确保资金发挥效益。

附件：1.2021年度自然资源事务管理-生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批安排情况表

2.2021年度自然资源事务管理-生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批绩效目标表

广东省财政厅

2021年3月25日

附件1

2021年度自然资源事务管理-生态林业建设专项资金（省级组织实施）第一批安排情况表

单位：元

单位名称	单位编码	资金编码	项目名称	功能分类科目	部门经济分类科目	政府经济科目	金额	备注
合计							447,457,300.00	
各省直部门合计							447,457,300.00	
省教育厅小计	156						15,215,000.00	
华南农业大学	156003		林下药用植物栽培的光环境选择及高效栽培技术研究	2130299 其他林业和草原支出			500,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	500,000.00	
华南农业大学	156003		森林康养构建关键技术及其功能产品开发与示范	2130299 其他林业和草原支出			400,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	400,000.00	
华南农业大学	156003		珍稀濒危植物紫荆木保护基因组学研究及应用	2130299 其他林业和草原支出			300,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	300,000.00	
华南农业大学	156003		广东省自然保护地主要自然资源调查监测技术体系研究	2130299 其他林业和草原支出			500,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	500,000.00	
华南农业大学	156003		广东省典型红树林与林区渔业生态模式的研究及示范	2130299 其他林业和草原支出			500,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	500,000.00	
华南农业大学	156003		油茶果壳全组分复合材料的关键技术及应用	2130299 其他林业和草原支出			1,000,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	1,000,000.00	
华南农业大学	156003		木麻黄青枯菌群体感应和群体淬灭研究与应用.	2130299 其他林业和草原支出			400,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	400,000.00	
华南农业大学	156003		木麻黄青枯病防控资源挖掘与应用研究.	2130299 其他林业和草原支出			250,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	250,000.00	
华南农业大学	156003		粤北古驿道沿线生态修复与景观提升技术研究与示范	2130299 其他林业和草原支出			1,000,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	1,000,000.00	
华南师范大学	156004		广东省中华穿山甲种群现状调查监测与适宜栖息地分布研究	2130299 其他林业和草原支出			300,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	300,000.00	
仲恺农业工程学院	156015		基于鸟类保护的湿地植物景观研究	2130299 其他林业和草原支出			600,000.00	
					30299 其他商品和服务支出	50502 商品和服务支出	600,000.00	

2021年度自然资源事务管理—
生态林业建设专项资金项目

实 施 方 案

项目名称：广东省自然保护地主要自然资源调查监测技术体系研究

申报单位：华南农业大学（盖章）

项目负责人：冼丽铧 陈红跃 手机：13760755892

项目联系人：冼丽铧 手机：13760755892

项目起止年限：2021 年 1 月 至 2021 年 12 月

广东省林业局

二〇二〇年六月

1

目　　录

7.2 项目负责人及主要参加人员

项目负责人

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
冼丽铧	女	33	研究生	实验师	森林培育	项目主持与实施	华南农业大学
陈红跃	男	56	研究生	教授	森林培育	技术统筹指导	华南农业大学

项目主要参加人员

姓　名	性别	年龄	学历	职务/职称	从事专业	任务分工	所在单位
郭盛才	男	51	研究生	教授级高级工程师	林业	自然保护地监测技术指导	广东省林业调查规划院
曾曙才	男	49	研究生	教授	森林生态	生态监测指导	华南农业大学
黄久香	女	45	研究生	副教授	树木学	植物资源体系	华南农业大学
佟富春	女	47	研究生	副教授	野生动植物保护	动物资源体系	华南农业大学
孙同高	男	30	研究生	工程师	森林培育	监测技术研究	广州紫荆林业规划设计有限公司
吴道铭	男	33	研究生	副教授	森林生态	土壤监测	华南农业大学
潘　澜	女	33	研究生	讲师	森林培育	生态因子监测	华南农业大学
高中旺	男	36	研究生	工程师	森林培育	林分监测	华南农业大学
温益章	男	25	研究生	技术员	林业	外业调查	广州紫荆林业规划设计有限公司
杜澄举	男	26	本科	本科生	农艺与种业	外业调查	华南农业大学
肖可菁	女	23	本科	研究生	林业	外业调查	华南农业大学
李静	女	37	研究生	研究生	风景园林	外业调查	华南农业大学
常博文	男	29	研究生	研究生	风景园林	外业调查	华南农业大学
朱铧楠	女	23	本科	研究生	风景园林	外业调查	华南农业大学
李　铄	男	23	本科	研究生	林业	外业调查	华南农业大学

项目单位意见	该项目针对广东省自然保护地的现状，以新时代社会主义特色生态文明观为指导，以协调生态环境保护与社会经济发展为出发点，充分依托自然保护地优化方案，依托现有工作基础，广泛收集国内外自然保护地自然资源调查监测技术资料，通过现场调研、专家咨询等技术集成，综合各类自然保护地自然资源调查监测技术，提出广东省可操作的、具有示范性和推广性的调查监测规程、规范和标准，编制相关技术指南。项目的开展将对广东省生态林业建设具有重要的应用价值。项目负责人和项目组成员研究基础扎实，学风严谨，已积累了相关的研究工作经验。该研究主题新颖，研究目标明确，内容有特色，技术路线和措施明确，研究方法可行，经费预算合理，有能力取得预期成果。 项目单位（盖章）：　　法人代表（签字）： 2020年 6 月 18 日

6.主参：污泥-植物联合作用下采矿废弃地土壤团聚和重金属迁移转化机制

项目批准号	42177011
申请代码	D0701
归口管理部门	
依托单位代码	51064208A0499-0932

42177011002806

国家自然科学基金
资助项目计划书
（预算制项目）

资助类别：面上项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：污泥-植物联合作用下采矿废弃地土壤团聚和重金属迁移转化机制

直接费用：57万元　　执行年限：2022.01-2025.12

负 责 人：吴道铭

通讯地址：广东省广州市天河区五山路483号

邮政编码：510642　　电　　话：020-85280263

电子邮件：dmwu@scau.edu.cn

依托单位：华南农业大学

联 系 人：唐家林　　电　　话：020-85280070

填表日期：2021年10月16日

国家自然科学基金委员会制

Version：1.002.806

简表

项目负责人信息	姓　　名	吴道铭	性 别	男	出生年月	1987年10月	民 族	汉族
	学　　位	博士			职称	副教授		
	是否在站博士后	否		电子邮件		dmwu@scau.edu.cn		
	电　　话	020-85280263		个人网页				
	工 作 单 位	华南农业大学						
	所 在 院 系 所	林学与风景园林学院						
依托单位信息	名　　称	华南农业大学					代码	51064208A0499
	联 系 人	唐家林		电子邮件		kycjhk@scau.edu.cn		
	电　　话	020-85280070		网站地址		http://kjc.scau.edu.cn/		
合作单位信息	单 位 名 称							
项目基本信息	项 目 名 称	污泥-植物联合作用下采矿废弃地土壤团聚和重金属迁移转化机制						
	资 助 类 别	面上项目				亚 类 说 明		
	附 注 说 明							
	申 请 代 码	D0701:环境土壤学				C1606:森林土壤学		
	基 地 类 别							
	执 行 年 限	2022.01-2025.12						
	直 接 费 用	57万元						

项目组主要成员

编号	姓名	出生年月	性别	职称	学位	单位名称	电话	证件号码	项目分工	每年工作时间（月）
1	吴道铭	1987.10	男	副教授	博士	华南农业大学	020-85280263	440882198710221518	项目负责人	10
2	赵倩	1989.11	女	讲师	博士	华南农业大学	02085280263	330781198911110526	土壤微环境改变分析和新的胶结物挖掘	6
3	冼丽铧	1987.07	女	实验师	硕士	华南农业大学	02085280263	440181198707132122	采矿废弃地现场试验	6
4	龙凤玲	1990.02	女	实验师	硕士	华南农业大学	02085280263	430321199002088341	土壤团聚体和重金属分析	6
5	冯嘉仪	1991.07	女	博士生	硕士	华南农业大学	02085280263	440106199107011823	土壤重金属迁移转化分析	10
6	杨源通	1994.10	男	博士生	硕士	华南农业大学	02085280263	360702199410283917	采矿废弃地现场实验	10
7	王思佳	1995.10	女	博士生	学士	华南农业大学	02085280263	230125199510285525	土壤微环境改变分析和新的胶结物挖掘	10
8	赖明丽	1997.02	女	硕士生	学士	华南农业大学	02085280263	440223199702162521	原位观察和模型构建	10
9	鲍利安	1997.07	男	硕士生	学士	华南农业大学	02085280263	362227199707241218	污泥添加培养条件筛选	10
10	阮可瑾	1997.12	女	硕士生	学士	华南农业大学	02085280263	451029199712123649	污泥粘结作用验证	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生

7.主参：基于垂直绿化应用的木质藤本攀援生长机制与生态绩效评价

申请代码	C1612
接收部门	
收件日期	
接收编号	3217140398

3217140398

国家自然科学基金

申 请 书

（2 0 2 1 版）

资助类别：面上项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：基于垂直绿化应用的木质藤本攀援生长机制与生态绩效评价

申 请 人：翁殊斐　　电 话：020-85280256

依托单位：华南农业大学

通讯地址：广东广州天河华南农业大学林学与风景园林学院

邮政编码：　　单位电话：020-85280070

电子邮箱：shufeiweng@scau.edu.cn

填写日期：2021年01月31日

国家自然科学基金委员会

基本信息

申请人信息	姓名	翁殊斐	性别	女	出生年月	1969年11月	民族	汉族
	学位	博士	职称	副教授		每年工作时间（月）		8
	是否在站博士后	否		电子邮箱		shufeiweng@scau.edu.cn		
	电话	020-85280256		国别或地区		中国		
	个人通讯地址	广东广州天河华南农业大学林学与风景园林学院						
	工作单位	华南农业大学/林学与风景园林学院						
	主要研究领域	风景园林植物应用						
依托单位信息	名称	华南农业大学						
	联系人	倪慧群	电子邮箱	kycjhk@scau.edu.cn				
	电话	020-85280070	网站地址	http://kjc.scau.edu.cn/				
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	基于垂直绿化应用的木质藤本攀援生长机制与生态绩效评价						
	英文名称	The Climbing Mechanism and Evaluation of Ecological Performance in Lianas Underlying Vertical Greening						
	资助类别	面上项目	亚类说明					
	附注说明							
	申请代码	C1612.园林学						
	基地类别							
	研究期限	2022年01月01日 -- 2025年12月31日	研究方向：风景园林规划设计与森林康养					
	申请直接费用	63.4000万元						
中文关键词		园林绿地规划设计；生态效益；木质藤本植物；攀援生长；支持物						
英文关键词		Landscape planning and design; Ecological performance; Lianas; Climbing habits; External support						

项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作时间（月）
1	李自若	1985-10-21	女	讲师	博士	华南农业大学	15989277753	45777864@qq.com	3**********1	8
2	冼丽铧	1987-07-13	女	实验师	硕士	华南农业大学	13760755892	xianlihua@scau.edu.cn	4**********2	8
3	张波	1973-05-27	男	高级农艺师	硕士	华南农业大学	13602755695	157959127@qq.com	4**********9	8
4	李剑	1980-07-28	男	讲师	硕士	华南农业大学	13570300698	233108583@qq.com	5**********X	8
5	邵京豫	1995-08-26	女	硕士生	学士	华南农业大学	15581770223	897304431@qq.com	4**********2	10
6	陈俊廷	1996-12-27	男	硕士生	学士	华南农业大学	18219550893	1012194247@qq.com	4**********4	10
7	秦昊林	1995-11-21	女	硕士生	学士	华南农业大学	18789779391	779213871@qq.com	1**********6	10
8	张绮翠	1985-04-28	女	硕士生	学士	华南农业大学	13246826211	495607642@qq.com	4**********5	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
9	2	3	0	0	0	4

项目名称： 基于垂直绿化应用的木质藤本攀援生长机制与生态绩效评价
资助类型： 面上项目
申请代码： C1612.园林学

国家自然科学基金项目申请人和参与者科研诚信承诺书

本人**在此郑重承诺**：严格遵守中共中央办公厅、国务院办公厅《关于进一步加强科研诚信建设的若干意见》规定，所申报材料和相关内容真实有效，不存在违背科研诚信要求的行为；在国家自然科学基金项目申请、评审和执行全过程中，恪守职业规范和科学道德，遵守评审规则和工作纪律，杜绝以下行为：

（一）抄袭、剽窃他人科研成果或者伪造、篡改研究数据、研究结论；

（二）购买、代写、代投论文，虚构同行评议专家及评议意见；

（三）违反论文署名规范，擅自标注或虚假标注获得科技计划等资助；

（四）购买、代写申请书；弄虚作假，骗取科技计划项目、科研经费以及奖励、荣誉等；

（五）在项目申请书中以高指标通过评审，在项目计划书中故意篡改降低相应指标；

（六）以任何形式探听尚未公布的评审专家名单及其他评审过程中的保密信息；

（七）本人或委托他人通过各种方式及各种途径联系有关专家进行请托、游说，违规到评审会议驻地游说评审专家和工作人员、询问评审或尚未正式向社会公布的信息等干扰评审或可能影响评审公正性的活动；

（八）向评审工作人员、评审专家等提供任何形式的礼品、礼金、有价证券、支付凭证、商业预付卡、电子红包，或提供宴请、旅游、娱乐健身等任何可能影响评审公正性的活动；

（九）其他违反财经纪律和相关管理规定的行为。

如违背上述承诺，本人愿接受国家自然科学基金委员会和相关部门做出的各项处理决定，包括但不限于撤销科学基金资助项目，追回项目资助经费，向社会通报违规情况，取消一定期限国家自然科学基金项目申请资格，记入科研诚信严重失信行为数据库以及接受相应的党纪政纪处理等。

申请人签字：

编号	参与者姓名 / 工作单位名称（应与加盖公章一致）/ 证件号码	签字
1	**李自若** / 华南农业大学 / 3**********1	
2	**冼丽铧** / 华南农业大学 / 4**********2	
3	**张波** / 华南农业大学 / 4**********9	
4	**李剑** / 华南农业大学 / 5**********X	
5	**邵京豫** / 华南农业大学 / 4**********2	
6	**陈俊廷** / 华南农业大学 / 4**********4	
7	**秦昊林** / 华南农业大学 / 1**********6	
8	**张绮翠** / 华南农业大学 / 4**********5	
9		

8.主参：园林树木和地被植物混种降低污泥重金属污染的根系作用机理

申请代码	D070107
接收部门	
收件日期	
接收编号	4180070106

4180070106

国家自然科学基金

申 请 书

（2 0 1 8 版）

资助类别：青年科学基金项目

亚类说明：

附注说明：

项目名称：园林树木和地被植物混种降低污泥重金属污染的根系作用机理

申 请 人：吴道铭　　电 话：020-85280263

依托单位：华南农业大学

通讯地址：广东省广州市天河区五山路483号

邮政编码：510642　　单位电话：020-85280070

电子邮箱：dmwu@scau.edu.cn

申报日期：2018年01月18日

国家自然科学基金委员会

基本信息

申请人信息	姓名	吴道铭	性别	男	出生年月	1987年10月	民族	汉族
	学位	博士	职称	副教授		每年工作时间（月）		10
	是否在站博士后	否		电子邮箱		dmwu@scau.edu.cn		
	电话	020-85280263		国别或地区		中国		
	个人通讯地址	广东省广州市天河区五山路483号						
	工作单位	华南农业大学/林学与风景园林学院						
	主要研究领域	逆境根系生理生态学；土壤重金属污染						
依托单位信息	名称	华南农业大学						
	联系人	全锋		电子邮箱		kycjhk@scau.edu.cn		
	电话	020-85280070		网站地址		http://web.scau.edu.cn/kjc/		
合作研究单位信息	单位名称							
项目基本信息	项目名称	园林树木和地被植物混种降低污泥重金属污染的根系作用机理						
	英文名称	Root system mechanism of mixed planting of landscape tree and ground cover plant for reducing the heavy metal pollution of sludge						
	资助类别	青年科学基金项目		亚类说明				
	附注说明							
	申请代码	D070107.土壤污染与修复		C160702.人工林培育				
	基地类别							
	研究期限	2019年01月01日 -- 2021年12月31日		研究方向：重金属污染与修复				
	申请直接费用	23.0000万元						
中文关键词		植物修复；重金属；根际修复；城市土壤；污泥资源利用						
英文关键词		phytoremediation; heavy metal; rhizoremediation; urban soil; recycling sludge						

项目组主要参与者（注：项目组主要参与者不包括项目申请人）

编号	姓名	出生年月	性别	职 称	学 位	单位名称	电话	电子邮箱	证件号码	每年工作时间（月）
1	赵倩	1989-11-11	女	讲师	博士	华南农业大学	020-85280263	zhaoqian@scau.edu.cn	330781198911110526	6
2	冼丽铧	1987-07-13	女	实验师	硕士	华南农业大学	020-85280263	xianlihua@scau.edu.cn	440181198707132122	6
3	冯嘉仪	1991-07-01	女	博士生	硕士	华南农业大学	020-85280263	345374842@qq.com	440106199107011823	10
4	欧阳健辉	1994-11-23	男	硕士生	学士	华南农业大学	020-85280263	641426347@qq.com	440111199411230933	10
5	廖丹丹	1995-08-16	女	硕士生	学士	华南农业大学	020-85280263	1920136243@qq.com	450802199508161325	10

总人数	高级	中级	初级	博士后	博士生	硕士生
6	1	2			1	2

签字和盖章页

接收编号：4180070106

申 请 人： 吴道铭　　依托单位： 华南农业大学

项目名称： 园林树木和地被植物混种降低污泥重金属污染的根系作用机理

资助类别： 青年科学基金项目　　亚类说明：

附注说明：

申请人承诺：

我保证申请书内容的真实性。如果获得资助，我将履行项目负责人职责，严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，认真开展工作，按时报送有关材料。若填报失实和违反规定，本人将承担全部责任。

签字：

项目组主要成员承诺：

我保证有关申报内容的真实性。如果获得资助，我将严格遵守国家自然科学基金委员会的有关规定，切实保证研究工作时间，加强合作、信息资源共享，认真开展工作，及时向项目负责人报送有关材料。若个人信息失实、执行项目中违反规定，本人将承担相关责任。

编号	姓名	工作单位名称（应与加盖公章一致）	证件号码	每年工作时间（月）	签字
1	赵倩	华南农业大学	330781198911110526	6	
2	冼丽铧	华南农业大学	440181198707132122	6	
3	冯嘉仪	华南农业大学	440106199107011823	10	
4	欧阳健辉	华南农业大学	440111199411230933	10	
5	廖丹丹	华南农业大学	450802199508161325	10	
6					
7					
8					
9					

依托单位及合作研究单位承诺：

已按填报说明对申请人的资格和申请书内容进行了审核。申请项目如获资助，我单位保证对研究计划实施所需要的人力、物力和工作时间等条件给予保障，严格遵守国家自然科学基金委员会有关规定，督促项目负责人和项目组成员以及本单位项目管理部门按照国家自然科学基金委员会的规定及时报送有关材料。

依托单位公章　　合作研究单位公章1　　合作研究单位公章2

日期：　　日期：　　日期：

9.主参：植物-污泥联合作用下稀土矿土壤团聚重塑和重金属迁移转化机制

受理编号：c22140500000090

项目编号：2022A1515010909

文件编号：粤基金字〔2022〕3号

广东省基础与应用基础研究基金项目

任务书

项目名称：植物-污泥联合作用下稀土矿土壤团聚重塑和重金属迁移转化机制

项目类别：广东省自然科学基金-面上项目

项目起止时间：2022-01-01 至 2024-12-31

管理单位（甲方）：广东省基础与应用基础研究基金委员会

依托单位（乙方）：华南农业大学

通讯地址：广东省广州市天河区五山路483号

邮政编码：510642 单位电话：020-85283435

项目负责人：吴道铭 联系电话：02085280263

（广东科技微信公众号） （查看任务书信息） （受理纸质材料二维码）

广东省基础与应用基础研究
基金委员会
二〇二〇年制

一、主要研究内容和要达到的目标

1、 研究内容：本研究旨在解析和验证植物混种与污泥如何共同作用于稀土矿废弃地土壤团聚重塑和重金属迁移转化。研究思路为优选污泥添加条件，并结合前期已获得的混种筛选结果，首先构建植物-污泥联合作用体系；然后重点从污泥胶结、根系空间构型和土壤生态等角度解析植物-污泥联合作用促进稀土矿废弃地土壤团聚重塑和降低重金属污染的机制。具体研究内容如下：

（1）优选促进稀土矿土壤团聚的污泥添加培养条件，构建植物-污泥联合作用体系：选用稀土矿废弃地土壤、压干污泥和烘干污泥为试验材料，以污泥种类和添加量、相对含水量以及培养时间为试验条件，采用L9（34）正交试验方案，借助原位可视培养箱，开展室内培养实验。动态分析土壤团聚体形态、数量和稳定性以及团聚体形成处断面孔隙度变化，以水稳性大团聚体（>0.25 mm）质量、MWD、PADO.25和可蚀性因子K值为参数进行隶属函数评价，筛选出最优污泥添加培养条件。结合已获得的植物混种筛选结果，构建基于植物混种的植物-污泥联合作用体系。

（2）探究植物-污泥联合作用促进稀土矿土壤团聚的机理：基于已构建的联合作用体系，开展植物-污泥联合作用的盆栽和可经纬网格化观测的裂区根箱实验。通过分析污泥和团聚体的微区形貌、胞外聚合物组分、能谱和红外光谱特征等的差异来验证污泥黏结作用；网格化原位动态观察根系生长和团聚体形成，构建根系空间构型团聚土壤的作用模型，探明根系空间构型对土壤团聚的影响；整合土壤的环境因子和微生物组成等分析结果，建立作用关联网络，解析土壤微环境与土壤团聚的关系；关联能谱、代谢组和13C-NMR分析的结果，结合KEGG功能路径和随机森林分析，挖掘关键微生物和潜在发挥功能的胶结物。整合上述的污泥、根系和土壤生态的分析结果，阐明植物-污泥联合作用促进稀土矿土壤团聚的机理，挖掘未知的胶结物。

（3）分析植物-污泥联合作用对重金属迁移转化的影响：结合植物-污泥联合作用室外裂区根箱实验，定期分析植物重金属吸收、土壤和下渗水的重金属迁移和形态变化，并结合根系空间构型和土壤微环境分析结果，明确植物-污泥联合作用对重金属迁移转化的影响并阐明其机理。

2、研究目标：从污泥胶结、根系空间构型和土壤生态等角度解析污泥-植物联合作用促进采矿废弃地土壤团聚重塑和降低重金属污染的机理，挖掘未知的团聚体胶结物，建立根系空间构型团聚土壤的作用模型。探索解决生态修复矿山和合理处置污泥等难题的方法，为土壤改良和重金属修复提供新思路。

四、项目总经费及省基金委经费预算

1.省基金委经费下达总额： （大写）壹拾万圆整；（小写 ）10万元；					
2.省基金委经费年度下达计划：					
年度	2022 年	年	年	年	年
经费(万元)	10.00				
3.总经费及省基金委经费开支预算计划：					
经费筹集情况：					（单位：万元）
省基金委经费	自筹资金				合计
	自有资金	贷款	地方政府投入	其它	
10.00	0.00	0.00	0.00	0.00	10.00
政府部门、境外资金及其他资金投入情况说明：	无				

与本项目相关的其他经费来源	（单位：万元）
其他计划资助经费：	0.00
单位配套经费：	0.00
其他经费资助：	0.00
其他经费来源合计：	

五、人员信息

项目负责人

姓名	证件号码	年龄	性别	职称	学历	在项目中承担的任务	所在单位	签名
吴道铭	440882198710221518	35	男	副教授	博士研究生	项目负责人	华南农业大学	吴道铭

项目组主要成员

姓名	证件号码	年龄	性别	职称	学历	在项目中承担的任务	所在单位	签名
冼丽铧	440181198707132122	35	女	实验师	硕士研究生	重金属分析	华南农业大学	冼丽铧
赵倩	330781198911110526	33	女	讲师	博士研究生	土壤微生物分析	华南农业大学	赵倩
冯嘉仪	440106199107011823	31	女	未取得	博士研究生	团聚体分析	华南农业大学	冯嘉仪
赖明丽	440223199702162521	25	女	未取得	硕士研究生	团聚体分析	华南农业大学	赖明丽
鲍利安	362227199707241218	25	男	未取得	硕士研究生	种植管理和根系观察	华南农业大学	鲍利安
董晓全	370285199903266838	23	男	未取得	硕士研究生	种植管理和根系观察	华南农业大学	董晓全

六、工作分工及经费分配

承担/参与单位名称（盖章）	工作分工	总经费分摊（万元）	省基金委经费分配（万元）
华南农业大学	承担本项目全部研究工作	10.00	10.00
	合计	10.00	10.00

八、本任务书签约各方

管理单位（甲方）：　　广东省基础与应用基础研究基金委员会　（盖章）

法定代表人（或法人代理）：　曾晓　（签章）

2022 年　04 月　21 日

依托单位（乙方）：　华南农业大学　（盖章）

法定代表人（或法人代理）：　刘雅红　（签章）

联系人（项目主管）姓名：　倪慧群　（签章）

Email：　kjcgxk@scau.edu.cn

电话：　020-85283435　/　15920301530

开户单位名称：　华南农业大学

开户银行名称：　广东广州工行五山支行

开户银行帐号：　3602002609000310520

2022年 04月 28日

联系人（项目负责人）姓名：　吴道铭　（签名）

Email：　dmwu@scau.edu.cn

电话：　02085280263

2022 年 4 月 22日

三、论文

1. 检索证明

SCAULIB202515187

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人华南农业大学林学与风景园林学院 冼丽铧 2篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区	引用
1	Plant litter as a heavy metal migration strategy following application of sewage sludge to subtropical forest soils	SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT 出版年：2024 出版日期：OCT 20 卷期：948 页码：- 文献号：174820 文献类型：Article	第一作者	T2类	华南农业大学林学与风景园林学院	SCI	IF2-year=8.2 IF5-year=8.6 （2023）	环境科学与生态学 1区 Top期刊：是 （2023）	SCI 核心合集 总引：0
2	Effects of woodland slope on heavy metal migration via surface runoff, interflow, and sediments in sewage sludge application	SCIENTIFIC REPORTS 出版年：2024 出版日期：JUN 12 卷期：14 1 页码：- 文献号：13468 文献类型：Article	第一作者	A类	华南农业大学林学与风景园林学院	SCI	IF2-year=3.8 IF5-year=4.3 （2023）	综合性期刊 2区 Top期刊：否 （2023）	SCI 核心合集 总引：0

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：田成
华南农业大学图书馆
2025-03-20

第 1 页/共 1 页

SCAULIB202515180

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人华南农业大学林学与风景园林学院 冼丽铧 1篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区	引用
1	联合运用多光谱和激光雷达技术构建的林分生物量估算模型	东北林业大学学报 出版年：2024 出版日期：2024-07-12 卷期：52 8 页码：85-94 文献号： 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心	无	无	CNKI 总引：2

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：张进
华南农业大学图书馆
2025-03-20

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人**华南农业大学林学与风景园林学院冼丽铧**7篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	土壤养分、种植年限和种植方式对巴戟天寡糖含量的影响	华南农业大学学报 出版年：2021 卷期：42 3 页码：75-85 文献类型：	第一作者	B类	华南农业大学	北大核心		
2	广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造	中南林业科技大学学报 出版年：2020 卷期：40 2 页码：142-147 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
3	广州市公园棚架式植物景观评价	西北林学院学报 出版年：2019 卷期：34 1 页码：261-266 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
4	28种防火林带树种树叶抗火性能研究	河南农业大学学报 出版年：2020 卷期：54 4 页码：575-581 文献类型：	第一作者	C类	华南农业大学	北大核心		
5	重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展	林业与环境科学 出版年：2021 卷期：37 3 页码：124-132 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		
	基于无人机航拍的校园植物景观美景度评价——以华南农业大学	亚热带植物科学 出版年：2019						

1页（共2页）

6	为例	卷期：48 3 页码：285-290 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		
7	基于园艺疗法理念的农事训练教学改革与实践	高等农业教育 出版年：2020 卷期： 3 页码：84-87 文献类型：	第一作者		华南农业大学	CNKI		

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明：如未盖章，报告无效

检索员：尹银怀
华南农业大学图书馆
2023-02-27

SCAULIB202405320

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人**华南农业大学林学与风景园林学院 洗丽铧** 3 篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系研究	高教学刊 出版年：2023 卷期：2023,9(34) 34 页码：86-89 文献号： 文献类型：期刊论文	第一作者	无	华南农业大学	CNKI	无	无
2	9 种园林植物幼苗光合特性及固碳释氧能力研究	林业与环境科学 出版年：2023 卷期：2023,39(02) 02 页码：46-53 文献号： 文献类型：期刊论文	通讯作者	无	华南农业大学林学与风景园林学院	CNKI	无	无
3	广东云开山国家级自然保护区人为干扰对环境土壤理化性质的影响	林业与环境科学 出版年：2023 卷期：39 2 页码：37-45 文献号： 文献类型：期刊	通讯作者	无	华南农业大学林学与风景园林学院	CNKI	无	无

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：张进

检索证明

根据委托人提供的论文材料，委托人**华南农业大学林学与风景园林学院冼丽铧**8篇论文收录情况如下表。

序号	论文名称	发表刊物及发表的年月卷期/页码等	作者排名	论文等级	作者文中单位	收录情况	影响因子	中科院大类分区
1	北京与广州城市公园花境植物应用调查研究	广东园林 出版年：2019 卷期：41 5 页码：81-85 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
2	广州市适应小学高年级儿童的自然植物教育研究	广东园林 出版年：2019 卷期：41 4 页码：47-51 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
3	保健植物在广州市居住区的应用研究	中国城市林业 出版年：2019 卷期：17 3 页码：55-59 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
4	广州市多肉植物种类及其在城市绿地的应用	热带农业科学 出版年：2019 卷期：39 4 页码：98-103 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
5	广州公园花境植物种类和配置模式	林业与环境科学 出版年：2017 卷期：33 3 页码：80-85 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
	广州市可食用植物色彩特点及造	亚热带植物科学 出版年：2020	共同通讯					

6	景应用	卷期：49 3 页码：208-214 文献类型：	作者	/	华南农业大学	CNKI		
7	园林植物科普微视频设计制作探索	新媒体研究 出版年：2022 卷期：8 14 页码：34-39 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		
8	广州城市形象研究回顾与展望	绿色科技 出版年：2022 卷期：21 07 页码：24-7 文献类型：	通讯作者	/	华南农业大学	CNKI		

说明：论文等级和中科院大类分区按《华南农业大学学术论文评价方案（试行）》划分。

报告免责声明:如未盖章,报告无效

检索员：杨穗旎
华南农业大学图书馆
2023-02-27

2. 以第一作者发表本专业论文情况

2.1. Plant litter as a heavy metal migration strategy following application of sewage sludge to subtropical forest soils

Science of the Total Environment 948 (2024) 174820

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Plant litter as a heavy metal migration strategy following application of sewage sludge to subtropical forest soils

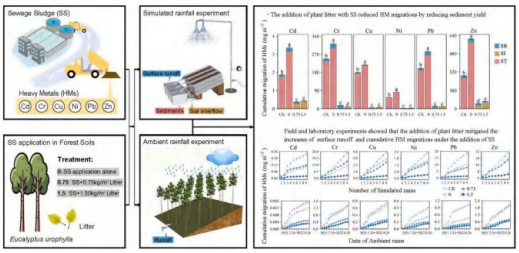
Lihua Xian [a], Jianbo Fang [b], Dehao Lu [a], Yuantong Yang [a], Jiayi Feng [c], Daoming Wu [a], Josep Peñuelas [d,e], Shucai Zeng [a,*]

[a] College of Forestry & Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China
[b] Eco-Environmental Monitoring and Research Center, Pearl River Valley and South China Sea Ecology and Environment Administration, Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, Guangzhou, 510611, China
[c] Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510520, China
[d] CREAF, Campus Universitat Autònoma de Barcelona, Cerdanyola del Vallès, Barcelona 08193, Catalonia, Spain
[e] CSIC, Global Ecology Unit CREAF - CSIC-UAB, Bellaterra, Barcelona 08193, Catalonia, Spain

HIGHLIGHTS

- Sediment was the dominant pathway for the migration of heavy metals (HMs) under the addition of sewage sludge (SS).
- The addition of plant litter with SS mitigated soil erosion and reduced HM migrations.
- Plant litter mitigation of ecological risks of Cd by reducing surface runoff and sediment yield.
- Both in laboratory and field experiments, plant litter reduced HMs migration via surface runoff.

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Editor: Bo Gao

Keywords:
Sewage sludge
Plant litter
Forest soil
Heavy metal
Migration pathway
Ecological risk

ABSTRACT

The environmental risks of migration of heavy metals (HMs) following applications of sewage sludge (SS) to forest soils are garnering increased attention. Plant litter at the forest floor may modify HM migration pathways through impacts on soil aggregates and water/soil erosion; however, HM migration responses to plant litter are poorly understood. The aim of this study was to determine the effects of plant litter cover on HMs migration, and water and soil erosion following the application of SS to subtropical forest soils. Effects of addition of SS along and SS plus plant litter at 0.75 or 1.5 kg m^{-2} on the migration of cadmium, chromium, copper, nickel, lead, and zinc in surface runoff, soil interflow, and sediments were quantified across nine simulated rainfall events in a laboratory experiment and following natural intense rain events in a field experiment. Addition of SS elevated HM concentrations in surface runoff by 38.7 to 98.5 %, in soil interflow by 48.3 to 312.5 %, and in sediment by 28.5 to 149.4 %, and increased the production of sediment aggregates <0.05 mm that led to greater cumulative migrations of HMs in surface runoff and sediment; sediment accounted for 89.5 % of HM migrations. Addition of plant litter reduced cumulative migration of HMs by 87.1–97.27 %; however, the higher rate of plant litter led to

* Corresponding author.
E-mail address: sczeng@scau.edu.cn (S. Zeng).

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174820
Received 16 May 2024; Received in revised form 30 June 2024; Accepted 13 July 2024
Available online 19 July 2024

a decrease in surface runoff and sediment yield, and an increase in soil interflow. Addition of plant litter shifted the main pathway of HM migration from sediment to surface runoff and soil interflow. The potential ecological HM risk index was "low" for each treatment. We found consistency in HM concentrations and migrations via surface runoff between the field and laboratory experiments. Overall, the addition of plant litter with SS mitigated soil erosion and reduced total migration of HMs, resulting in a 88.7–97.3 % decrease in the ecological risk index of the six HMs. We conclude that the addition of plant litter may provide a management strategy for the mitigation of HM risks to environmental safety for the disposal of SS in subtropical forest systems.

1. Introduction

Sewage sludge (SS) is widely used as a soil amendment that reduces soil bulk density and shear strength of the surface layer, while increasing soil porosity, structural coefficient, permeability, and water-holding capacity (Zoghlami et al., 2020), and acts as an exogenous source of nitrogen (N) and phosphorus (P) (Leila et al., 2017; Hoang et al., 2022), enhancing soil fertility and accumulation of plant biomass (Chu et al., 2017; Chu et al., 2023a, 2023b). Forest land is increasingly utilized for the disposal of SS (Abreu-Junior et al., 2017; Badzmierowski et al., 2021; Li et al., 2024), resulting in greater tree height, diameter, and biomass, including timber yield (Chu et al., 2017), due to greater soil content of N, P, potassium, and organic matter (Chow and Pan, 2020). However, forest inputs of SS are associated with greater content of heavy metals (HMs), such as copper (Cu), and zinc (Zn) (Chow and Pan, 2020), within the soil profile (Marguí et al., 2016; Chu and He, 2021; Li et al., 2024). The migration of HMs through soils mediated by surface water runoff and soil interflow pathways poses a potential threat to the environmental safety of rivers and groundwater (Koyuncu, 2022).

While soil adsorption and surface runoff migration of soluble or exchangeable state HMs tend to be negatively associated with soil particle size (Deng et al., 2018; Huang et al., 2018; Zhu and Cheng, 2022) and time since SS application (Rostagno and Sosebee, 2001), respectively. Studies have reported contrasting effects of SS application on HM migration in surface runoff. For example, Joshua et al. (1998) showed increases in rainwater soil infiltration under SS addition led to reductions in surface water runoff and sediment yield, and a lower associated risk of HM migration in surface runoff water, whereas Yang et al. (2023) found that applications of SS increased the risk of HM migration in the surface runoff, soil interflow, and sediment pathways, where risk was greatest through smallest aggregate fraction in sediment flow.

Dynamics of these soil pathways vary with ecosystem; for example, the greater biomass of plant litter at the soil surface of forests than in agricultural systems mitigates soil erosion by raindrops, leads to greater stability of soil aggregates (Li et al., 2014) and reduces the velocity of surface runoff, resulting in lower associated sediment transport (Zhu and Cheng, 2022). Thus, there is a need to understand the effects of litter cover on migration risks of SS HMs in forest soils, across forest soil flow pathways, to improve the environmental risk assessment and mitigation of potentially toxic soil amendments (Chu et al., 2021).

In this study, we quantified effects of SS application under contrasting levels of plant litter on concentration and cumulative migration of HMs in three soil flow pathways following field ambient and laboratory simulated rainfall events to assess the ecological risk of SS HMs. The objectives of the study are to: (1) test for effects of level of plant litter cover on forest surface water runoff, interflow, and sediment following SS addition; (2) test for relationships between of level of plant litter cover and HM migration in the three soil flow pathways; (3) check for consistency in HM runoff migrations between field and laboratory experiments; and, (4) provide a theoretical basis for the management of forest soil HM pollution following SS application.

2. Materials and methods

2.1. Ambient rainfall experimental design

The field ambient rainfall experiment was located in a *Eucalyptus urophylla* plantation created with tree spacings of 3 × 2 m in 1998 at Jiuzhuan Lake in the Dalingshan Forest Park, Guangdong Province, China (22°51′18.99″N, 113°45′22.44″E), where soils comprise a sandy loam derived from granite (56.7 % sand; 27.7 % silt; 15.6 % clay). In July 2021, we selected twelve 10 × 2 m experimental plots with comparable site conditions (east-facing, 15° slope) and equal tree density that were oriented with the longer sides aligning with slope direction; herbaceous plants were removed and irregular terrain was smoothed. The experimental plots comprised a surrounding boundary wall, runoff collection pool, and water diversion channel. The 20-cm high boundary wall was constructed from cement bricks to prevent surface runoff to adjacent plots, while the runoff collection pool (1 × 1 × 1 m) situated at the down-slope plot edge and water diversion channel were covered with a PVC plastic board and gridded PVC film, respectively, to exclude rainwater and falling plant debris/litter, respectively.

2.2. Simulated rainfall experimental design

We simulated rainfall intensity of the climatic conditions of southern China, to emulate scenarios of heavy rainfall and intense soil erosion. The simulated rainfall experiments were carried out at the Institute of Eco-environment and Soil Sciences, Guangdong Academy of Sciences using soils collected from depths of 0–10, 10–20, and 20–30 cm in the *E. urophylla* plantation at Jiuzhuan Lake in November 2020. The soils were air-dried at room temperature in the laboratory for 2 weeks, when organic residues, roots, and large sand grains were manually extracted; then, the soils were passed through a 10-mm nylon sieve and mixed by profile depth, to ensure uniformity of distribution in soil aggregates within each layer.

The experiment comprised 12 stainless-steel soil flumes (1 m long × 0.3 m wide × 0.3 m high; 15° slope) filled with the collected soils arranged by layer and fitted with a water tank (1.2 m long × 0.4 m wide × 0.12 m high) with 150 holes (0.8 mm diameter) distributed across its base. Between March and August 2022, nine simulation rainfall events were conducted with a two-week interval between each simulated rainfall, where each event was administered at 0–5 L·min^{-1} for 60 min (120 mm·h^{-1}) using a variable power pump. A channel was fixed to the front of the flumes to collect surface runoff and accompanying sediment, and a hole at the lowest downstream point of the flumes facilitated the collection of interflow. Full details of the experimental design are reported by Yang et al. (2023).

2.3. Treatments

Four treatments, comprising the addition of 6 kg·m^{-2} of SS at litter cover levels of 0, 0.75, and 1.5 kg m^{-2}, plus a control of zero SS and zero litter (CK), were applied to three replicates of the simulated rainfall soil flumes and ambient rain field plots. "0, 0.75, 1.5, CK" and "0F, 0.75F, 1.5F, CKF" were used to represent these treatments in the laboratory and field experiments, respectively. We sourced SS from the Guangzhou Datansha Wastewater Treatment Plant, Guangzhou City, Guangdong

Province, China that was subjected to anaerobic composting for 60 days, followed by air-drying and sieving through a 10-mm nylon screen. The SS was mixed thoroughly, before it was incorporated with the top 10-cm soil profile and spread across the surface of the field plots and flumes. Dry plant litter was collected from a *E. urophylla* plantation in the arboretum of South China Agricultural University (23°15′56″N, 113°26′05″E) and applied it to the surface of experimental plots and flume, as appropriate; for field plots, plant litter levels were maintained at monthly intervals.

2.4. Sample collection and analysis of heavy metals

For the field experiment, we collected 12 samples of surface runoff in 200-mL polyethylene plastic bottles from the collection pools on the day following heavy rainfall events, from July 2021 to August 2022; immediately prior to collection, the runoff water in the collection pools was thoroughly mixed. Water samples were stored at 4 °C with 1 mL of HNO_3 to inhibit microbial activity and prevent the precipitation of heavy metal ions prior to analysis.

For the rainfall simulation experiments, we collected total surface runoff and soil interflow following each simulated event. Surface runoff and soil interflow were collected separately and left undisturbed for 30 min; then, the suspensions were transferred into 200-mL polyethylene plastic bottles, to which 1 mL of HNO_3 was added to inhibit microbial activity and prevent the precipitation of heavy metal ions. The treated samples were then stored at 4 °C prior to analysis.

Sediment deposited in the runoff collection pool was collected and then segregated into four size classes of aggregate (>1 mm; 1–0.25 mm; 0.25–0.05 mm; <0.05 mm) using the wet sieve method (Xiao et al., 2016; Huang et al., 2018); half of each size class sample was dried, weighed, and pulverized, while the remaining half was combined with the others as a composite sample of total sediment per plot.

The surface runoff, soil interflow and sediment samples were digested using the tri-acid (nitric-hydrofluoric-perchloric acid) method and subjected to closed microwave dissolution (CEM MARS6, Matthews, NC, USA), before concentrations of cadmium (Cd), chromium (Cr), nickel (Ni), lead (Pb), Cu, and Zn were determined using a Plasma atomic emission spectrometer (Leeman prodigy7 model, Teledyne LABS, OKC, USA) (Fang et al., 2017; Qi et al., 2020; Zuo et al., 2021). We calculated cumulative mass migrations of HMs from individual and cumulative rainfall events across the three soil flow pathways. We pulverized and sieved (<0.15 mm) samples of the experimental SS and soils prior to analysis of pH using a pH meter (AB33PH-F pH Meter, Ohaus, NH, USA) and total concentrations of Cd, Cr, Ni, Pb, Cu, and Zn (Table S1) that were determined. Similarly, we analyzed pH and HM properties of the litter (Table S2).

2.5. Potential ecological risk assessment

We used a modified ecological risk index (*RI*) (Li et al., 2022) to evaluate the potential ecological risk to the surrounding environment posed by the release of HMs from SS applications, based on the ratio of the total amount of HMs released from SS during the nine simulated rainfall events to the total amount of background HMs in the control (Chu et al., 2021; Yang et al., 2023) for single and multiple soil flow pathways. Thus, *RI* was calculated as:

$$Ei = Ti \times \frac{Ci}{Co} \quad (1)$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} Ei \quad (2)$$

where E_i represents the risk factor of HM *i*; T_i is the toxic-response factor for HM *i*, based on Cu = Cr = Pb = Ni = 5, Zn = 1, and Cd = 30 (Håkanson, 1980; Liu et al., 2021); C_i is the total amount of HM *i* in surface runoff, soil leachate or sediment; and, C_O is total amount of background HM in the control.

2.6. Statistical analysis

All statistical analyses were performed in R 4.1.3 (R Core Team, 2021). Given a lack of normality of some data collected from the 0.75 and 1.5 kg plant litter m^{-2} treatments, we conducted a permutational-based multivariate analysis of variance (PERMANOVA; setseed:1234), using Kruskal-Wallis and Dunn's test in the "PMCMRplus" package. We used Bonferroni's post-hoc test to test for within-pathway treatment differences in volume of surface runoff, interflow, and sediment yield, and in concentrations and cumulative migrations of the HMs. Aggregate size class and soil flow pathway differences in relative abundance of cumulative HM migrations were visualized using a stacked bar alluvial chart using the "ggplot" and "ggalluvial" packages. Treatment effects were tested at $p < 0.05$ and presented data are means ±SE.

3. Results

3.1. Soil flow pathways under laboratory conditions

The volumes of surface runoff and soil interflow, and particularly sediment yield, were affected more by plant litter cover than addition of SS, where there were no differences in runoff and interflow volumes between the CK and 0 kg m^{-2} of plant litter treatment across individual and combined simulated rain events (Fig. 1a, b). Compared with the 0 kg m^{-2} of plant litter treatment, the volume of surface runoff under the 0.75 and 1.5 kg m^{-2} of litter treatments decreased by 19.3 and 85.2 %, respectively, while the volume of soil interflow increased by 224.6 and 1624.3 %, respectively (Fig. 1b).

Volume of sediment yields increased during the first three simulated rain events with the addition of SS alone and decreased during events six to nine (Fig. 1c). While there were no effects of SS in the absence of plant litter on total sediment yield, there were increases in yield of sediment aggregates <0.05 mm and decreases in yields of aggregate classes 0.05–0.25 mm and 0.25–1 mm (Fig. 1d). Addition of SS with plant litter at 0.75 and 1.5 kg m^{-2} reduced yields of all size classes of sediments, leading to almost zero sediment flow (Fig. 1e).

3.2. Sediment content of HMs under laboratory conditions

The concentrations of Cd, Cr, Cu, and Ni in the <0.05 mm and 0.05–0.25 mm aggregate fractions were notably higher than those in the 0.25–1 mm and >1 mm ones (Fig. S1). The addition of SS in the absence of plant litter increased total sediment concentrations of HMs by 28.5 to 149.4 % (Fig. S1). Concentrations of Pb and Zn in the >1 mm aggregate fraction increased by 97.0 and 259.7 % respectively, representing a 2–3 fold increase compared to other fractions, while there were increases in Cd concentration in 0.05–0.25 mm and 0.25–1 mm fractions (113.5 and 116.4 %, respectively) and increases in Ni concentration in the 0.05–0.25 mm fraction (81.6 %), representing 1.5–2.3 increases over other fractions (Fig. S1).

Cumulative migrations of the HMs increased with the addition of SS alone, particularly Cd and Zn that increased by 80.4 and 121.9 %, respectively, primarily due to increases in content in the <0.05 mm fraction (Fig. 2a, Fig. S2). The cumulative migrations of Cd, Cr, Cu, and Ni in the smallest fraction under addition of SS alone accounted for approximately 50 % of the total HM migration in sediment; in contrast, addition of SS alone led to a decrease in cumulative HM migration in the 0.05–0.25 mm and 0.25–1 mm fractions (Fig. 2b). Addition of SS decreased cumulative migrations of Cr, Cu, and Pb in the 0.05–0.25 mm fraction (Fig. S2).

3.3. Soil flow pathway migration of HMs under laboratory conditions

There were effects of addition of SS and plant litter cover on

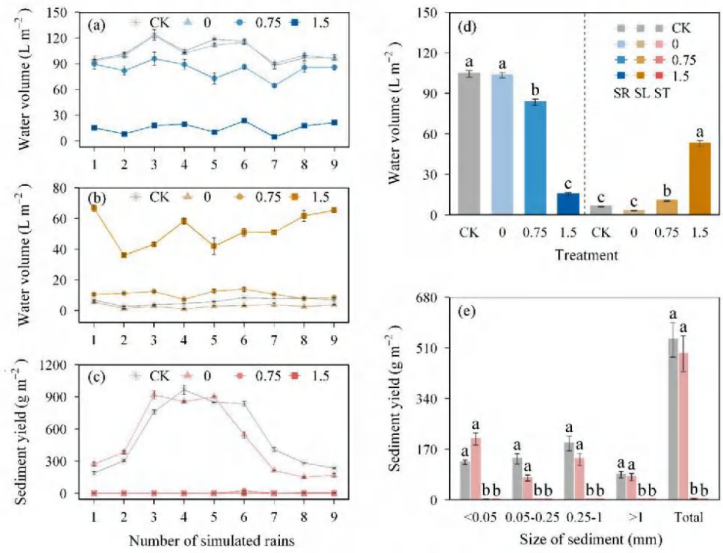


Fig. 1. Effects of treatment on volumes of surface runoff (SR) (a), soil interflow (SI) (b), and sediment yield (ST) (c), across simulated rainfall events (SR and SI) (d), and sediment size classes (ST) (e). Data are means ±SE; different lowercase letters indicate treatment differences at $p < 0.05$.

migration of HMs via surface runoff, interflow, and sediment (Fig. 3). From the second simulated rainfall event, there were increases in cumulative migrations of the six HMs in surface runoff and sediment under addition of SS alone and addition of SS and plant litter led to reductions in HM migration in runoff, with zero HMs detected in sediment (Fig. 3). Addition of SS and plant litter increased cumulative interflow migrations of the HMs, with greatest cumulative migrations under 1.5 kg of litter m ^{2} following each simulated rain event; from the seventh simulated rainfall event, there was a slight increase in the cumulative migration of Cd and Cu under the addition of SS alone (Fig. 3). Migration velocity of the six HMs remained relatively constant in the runoff and interflow pathways, while in the sediment, it steadily slowed in the absence of SS and litter (CK) and under SS alone under ongoing rainfall events (Fig. 3).

Cumulative migration of the HMs was 21.5–113.1 % greater under the addition of SS alone compared with the CK, while addition of 0.75 and 1.5 kg litter m ^{2} along with SS led to 87.1–97.2 % decreases in cumulative HM migrations compared with the addition of SS alone, primarily due to a decrease in sediment migration of HMs (Fig. 4a). Sediment was the dominant pathway for the migration of the HMs in the absence of litter, accounting for 89.5–97.1 % of migration and exceeding that of runoff and interflow by an order of magnitude (Fig. 4b). In contrast, soil interflow was the main pathway for the migration of Cd and Zn in the presence of litter, where it accounted for 95.8 and 92.8 % of migrations, respectively, under 1.5 kg of litter m ^{2}, whereas runoff and interflow were the main Cr, Cu, Ni, and Pb migration pathways under 0.75 and 1.5 kg of litter m ^{2}, respectively; there was no contribution to the cumulative migration of HMs from the sediment pathway (Fig. 4b).

3.4. Consistency in surface runoff HMs between field and laboratory

Field and laboratory data showed addition of SS and plant litter led to a decrease in the volume of surface runoff (Fig. 1, Fig. S3), while there was an order of magnitude larger level of cumulative migration of HMs in the laboratory experiments than in the field experiments (Figs. 5a, 3) and similar levels of runoff concentration of the six HMs between the two experiments (Fig. 5b, Fig. S4). There was an increase in runoff HM concentrations under addition of SS alone and, with the exception of Cr and Cu in the field and Zn in the laboratory, there were decreases in runoff HM concentration under the addition of SS plus plant litter (Fig. 5b, Fig. S4).

Following 12 heavy rain events in the field experiment, the cumulative migration of Cd, Cu, Ni, and Pb in surface runoff was greater with the addition of only sewage sludge (0 %-F) compared to the control (CK-F). However, adding 0.75 to 1.5 kg/m^2 of litter along with the SS resulted in a 14.2–56.9 % reduction in cumulative HM migration compared to SS alone (Fig. 5a), aligning with the laboratory experiment results (Fig. 3). Since the heavy rainfall events in August 2021, the migration rates of six HMs in surface runoff increased under SS addition in the field experiments, but then gradually slowed, consistent with the trends observed in the laboratory experiments (Fig. 3).

3.5. Risks of HM migration under laboratory conditions

Ecological risk assessment revealed a higher *Ei* for Cd migration in runoff, soil interflow, and sediment ("moderate") under addition of SS alone, a higher Cd interflow *Ei* ("considerable") under addition of SS plus litter, and higher Cu interflow *Ei* ("considerable") under addition of SS and litter at 1.5 kg m ^{2} (Table 1). Across the three pathways, HM *Ei* under addition of SS alone was higher for Cd ("moderate") than the other HMs ("low") (Table 1).

Risk assessment of interflow migration of all HMs under addition of SS and litter at 0.75 and 1.5 kg m ^{2} showed *RI* of "moderate" and "considerable", respectively, primarily due to the high risks of Cd and Cu (Table 1). In contrast, *RI* for runoff and sediment HM migrations tended to be "low" across treatments, and zero for sediment pathways with the addition of litter (Table 1). The *RI* for migration of all HMs across the three pathways was "low" across treatments (SS alone > CK > 0.75 and 1.5 kg litter m ^{2}).

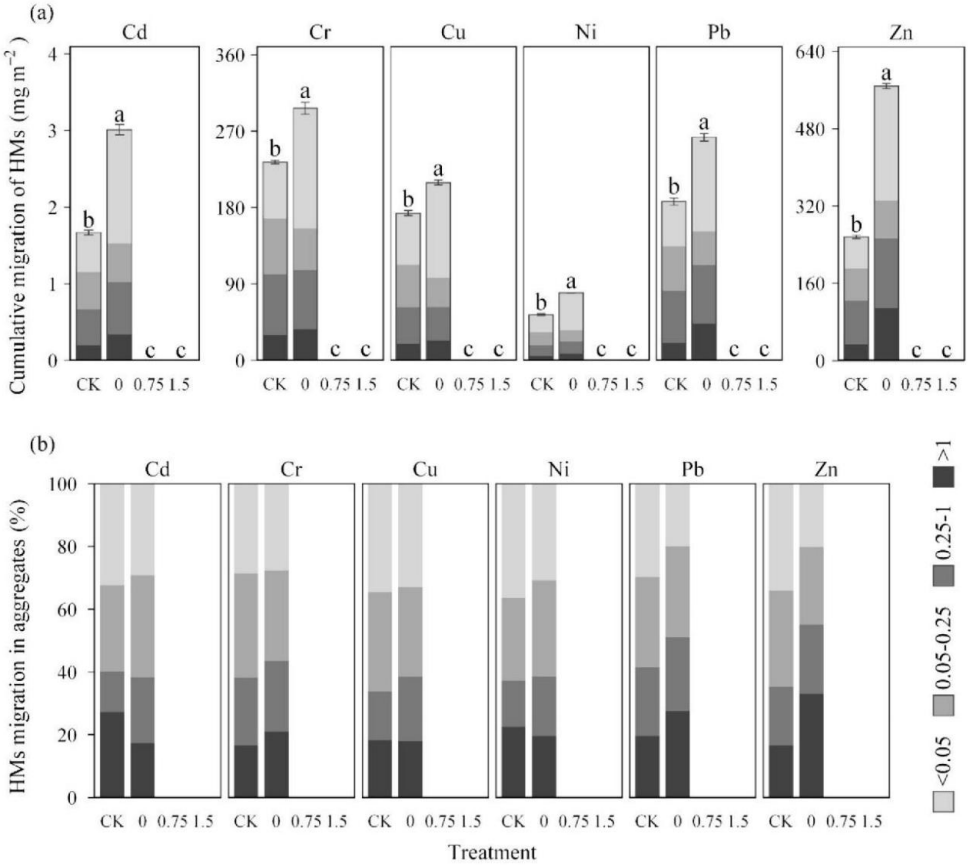


Fig. 2. Effects of treatment on cumulative heavy metal migrations (a) and proportion of heavy metals in aggregate size classes (b) under laboratory conditions. Data are means ±SE; different lowercase letters indicate treatment differences at $p < 0.05$.

4. Discussion

4.1. Effects of SS and litter cover on soil and water erosion

Surface runoff and sediment yield tend to be reduced by the presence of leaf and woody litter at the soil surface (Li et al., 2014; Zhu and Cheng, 2022), due to the interception and retention of rainfall that slows the drainage process (Nainar et al., 2021) and reduces detachment and splash erosion of soil aggregates (Li et al., 2014; Felix et al., 2023). We found decreases in surface runoff under the addition of SS and litter in the field and laboratory experiments; however, surface runoff in the field was an order of magnitude lower than in the laboratory, possibly due to interception of rainfall by the canopy in the field (Inokoshi et al., 2023).

Reductions in the velocity and volume of surface runoff increase levels of soil interflow that may further contribute to lower levels of sediment yield (Sun et al., 2022; Yang et al., 2023). Indeed, data from our simulated rainfall experiments showed simultaneous reductions in surface runoff and increases in soil interflow volume with the addition of litter, particularly at the rate of 1.5 kg m^{-2}. Thus, these findings indicate that plant litter facilitates the redistribution of water within the soil profile, promoting deeper infiltration (Jourgholami et al., 2021).

We observed that the application of SS initially increased sediment yield, before decreasing with time, possibly due to its combination with soil that may have led to a collapse in aggregates, clogging of water-conducting pores, and subsequent sealing of the soil surface (Mamedov et al., 2014). Previous research has shown that the clogging of soil pore spaces following a series of simulated rain events diminishes the anti-erosion effects of the addition of SS (Bruggeman and Mostaghimi, 1993), likely resulting in increased fragmentation of aggregates and rapid migration of <0.05 mm aggregates from the topsoil; however, there may be subsequent improvements in soil structure and stability as SS becomes integrated into the soil (Maria et al., 2007; Da Silva et al., 2021), thereby reducing sediment yield.

4.2. Effects of SS and litter cover on sediment HMs

Our observation that smaller sediment aggregates (<0.05 mm and 0.05–0.25 mm) contain higher concentrations of HMs (Cd, Cr, Cu, Ni) than larger aggregates is consistent with previous research (Li et al., 2022; Yang et al., 2023), due to higher levels of soil organic matter and larger surface area-to-volume ratios in smaller aggregates that facilitate HM accumulation via co-precipitation, occlusion, sorption, and complexation (Huang et al., 2014; Fang et al., 2023). We found increases

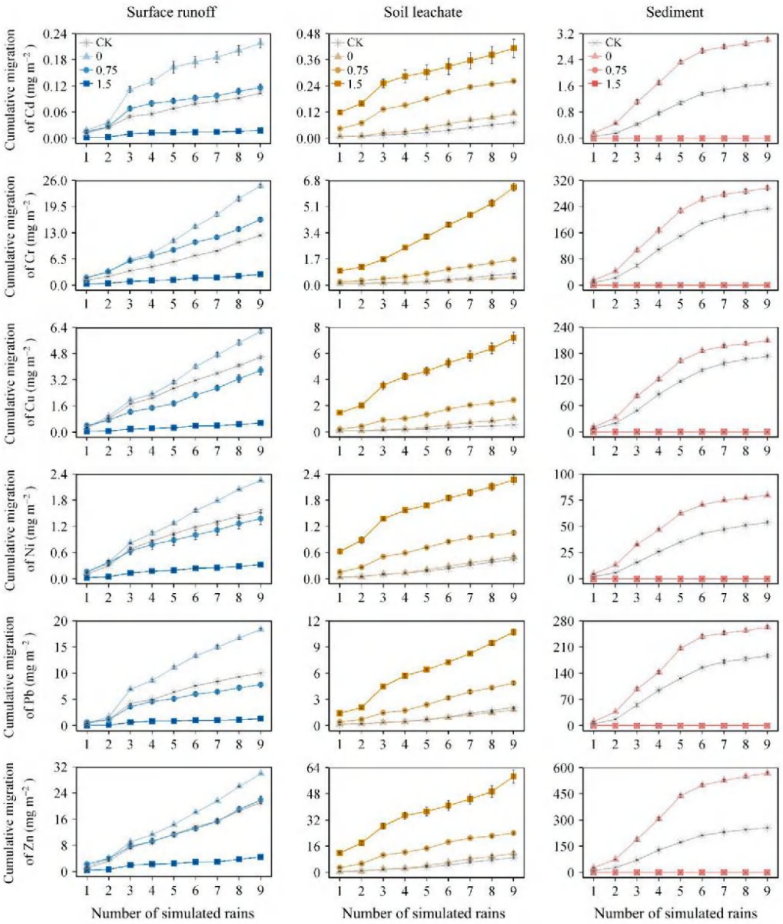


Fig. 3. Effects of treatment on cumulative migrations of six heavy metals in surface runoff, soil interflow, and sediment across simulated rainfall events. Data are means ±SE.

in total concentration of sediment HMs following the addition of SS, likely due to variations in HM adsorption capacity with sediment aggregate particle size (Huang et al., 2014; Liu and Han, 2020). For example, initial adsorption rates of Cu and Zn in red paddy soils increased with decreasing aggregate particle size, except for the 0.05–0.002 mm fraction, where Cu adsorption amounts were 2–3 times higher than Zn in the same equilibrium concentration range (Huang et al., 2014; Liu and Han, 2020).

We found the addition of SS led to an increase in the cumulative migrations of sediment HMs, particularly of Cd and Zn, primarily due to the highest concentration and proportional migration of the smaller fraction aggregates (<0.05 mm), as reported previously (Huang et al., 2018; Yang et al., 2023). We found that SS concentrations of Cd and Zn were 3–4 times higher than those of forest soil and, given the higher background levels of Cd content of subtropical forest soils in China than farmland and bare land (Deng et al., 2018), SS applications to this type of forest may pose high environmental risks of Cd pollution via water and soil losses (Chu et al., 2023a, 2023b). The increase in proportion of cumulative HM migrations in the smallest aggregate fraction (<0.05 mm) following the addition of SS contrasted with decrease in the 0.05–0.25 mm and 0.25–1 mm aggregate fractions, indicating the key role of smaller aggregates in the environmental risk of SS HM migrations (Yang et al., 2023).

4.3. Effects of litter cover on soil flow pathway HM migrations

Our field and laboratory experiments showed that the application of SS increased surface runoff concentration and cumulative migrations of HMs, supporting previous studies (Peyton et al., 2016; Chu et al., 2021; Yang et al., 2023), where the addition of plant litter mitigated these rises, likely due to the physical barrier formed by the litter and its water-holding capacity that reduce surface water runoff (Pandey and Raghubanshi, 2022). The total amount of Cd adsorbed by plant litter constitutes an extremely small fraction of the overall HM migration (Table S2).

Data from the field experiment show the velocity of HM migration through surface runoff escalated markedly under intense rainfall, particularly under the addition of SS, whereas there was such no increase with the co-addition of plant litter. Given these findings indicate that heavy rainfall events may trigger rapid increases in surface runoff HM migration, we suggest additional experiments are required to

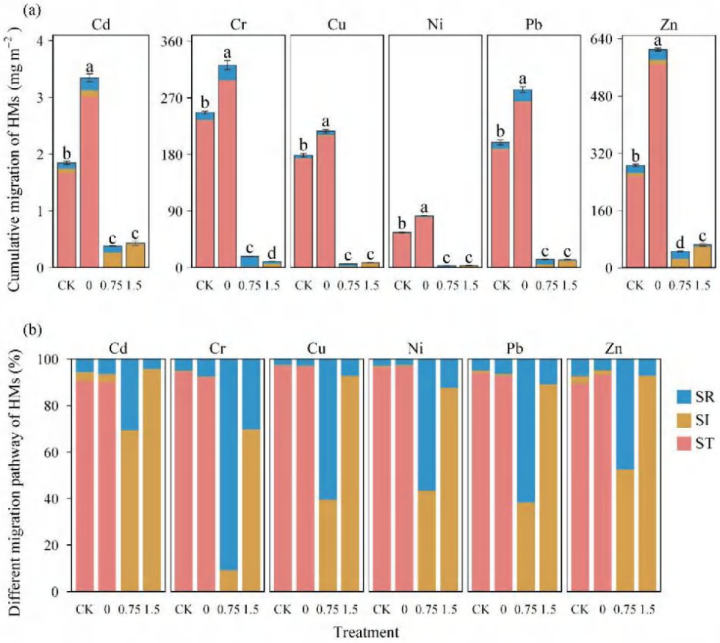


Fig. 4. Effects of treatment on cumulative heavy metal migrations (a) and proportion of heavy metals (b) in surface runoff (SR), soil interflow (SI) and sediment (ST) under laboratory conditions. Data are means ±SE; different lowercase letters indicate treatment differences at $p < 0.05$.

ascertain the combined impact of rainfall intensity and litter cover on HM migration under SS applications (Zhang and Wang, 2020), particularly in the subtropical regions of China where heavy rainfall events are becoming increasingly frequent (Zhou et al., 2011).

We found that levels of cumulative surface runoff migrations of HMs were markedly lower in the field than in the laboratory, likely due to effects of rainfall interception by the tree canopy (Zhou et al., 2016). In contrast, we found that addition of plant litter with SS under simulated rainfall events led to increases in interflow migration of HMs, with highest levels recorded under 1.5 kg of litter m ^{2}, likely as a result of greater water infiltration and percolation, despite simultaneously reducing interflow concentrations of HMs (Perez-de-Mora et al., 2007). The runoff migrations between field and laboratory experiments, as well as the migration patterns in sediment and soil interflow, need further detailed study.

The dominant pathway for HM migration was found to vary depending on the addition of SS, as reported by Yang et al. (2023), along with rate of plant litter addition, where we found that sediment was the main HM migration pathway under SS addition alone, likely due to the high HM content and erodibility of exposed sludge-amended soils. In contrast, there was virtually no sediment production under the addition of plant litter, and the main HM migration pathways were surface runoff and soil interflow. These results underscore the effectiveness of plant litter in the reduction of HM migration via the sediment pathway as a promising strategy for HM risk management (Wu et al., 2018).

Under the addition of SS, we found surface runoff and interflow were the main migration pathways for Cr, Cu, Ni, and Pb under the co-addition litter at 0.75 and 1.5 kg m ^{2}, respectively, indicating HM variation in migration responses and greater potential risks of groundwater pollution under the addition of plant litter. Thus, we suggest further research to understand HM migration pathway responses to litter to improve HM pollution management and policy making. And the changes of chemical speciation in HM migration need further study to enhance our understanding of potential reaction pathways and migration mechanisms (Chu et al., 2023a, 2023b).

4.4. Effects of SS and litter cover on HM migration risk

This study has shown that the addition of SS escalated the ecological risk of Cd migrations via surface runoff, soil interflow, and sediment, supporting previous studies have identified Cd, along with Cu and Ni, as the primary elements in SS of high ecological risk to soils (Fang et al., 2017; Qi et al., 2020; Zuo et al., 2021). Although Cd represents the lowest HM concentration in SS, its ions pose a high level of risk to groundwater quality through interflow or confluence with surface runoff, due to high levels of aggregation, persistence, and environmental mobility (Notten et al., 2005; Tóth et al., 2016). For example, the primary risk of Cd pollution is migration from soils to water bodies via surface runoff and underground leaching (Yang et al., 2018; Liu et al., 2022), where greater amounts enter water in runoff as suspended solids, particulate matter, and sediment than through aqueous migration (Demirak et al., 2006). While our study demonstrates plant litter mitigation of ecological risks of Cd by reducing surface runoff and sediment migration pathways, HM risks through the soil interflow pathway were increased and estimated to be "moderate" and "considerable" under litter at 0.75 and 1.5 kg m ^{2}, respectively, primarily due to the contribution of Cd and Cu.

The *RI* for the six HMs across the three soil flow pathways indicated that the addition of SS alone and with litter pose a low level of ecological risk, primarily because plant litter reduces sediment yield. Thus, addition of litter in combination with SS to subtropical forest soils may mitigate HM migrations, but it may also increase the risk of Cd migration, depending on soil pathway, highlighting the importance of Cd risk assessment and management in SS soil amendment programs (Chu et al., 2021; Wang et al., 2023).

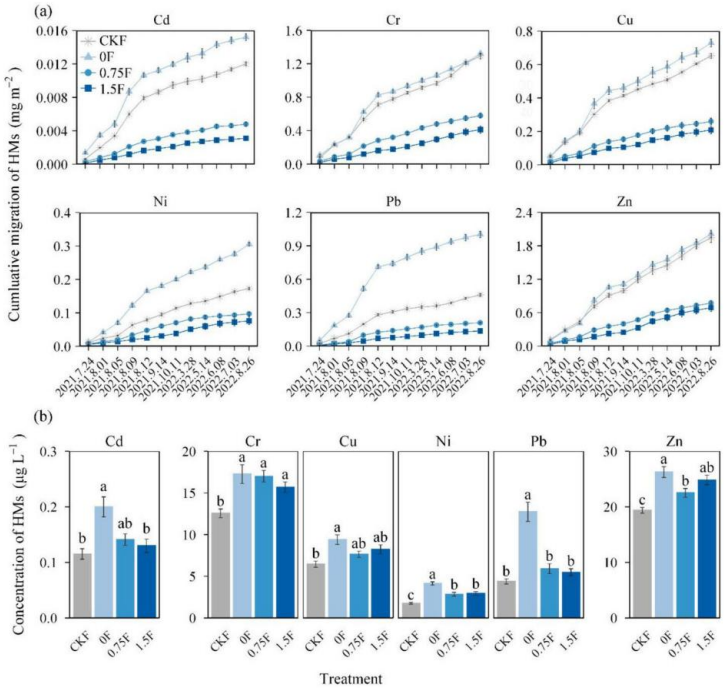


Fig. 5. Effects of treatment on cumulative heavy metal migrations (a) and heavy metal concentrations under field conditions. Data are means ±SE; different lowercase letters indicate treatment differences at $p < 0.05$.

Table 1
Estimation of ecological risks of heavy metals by pathway and sewage-litter treatment in the laboratory experiments.

Pathway	Litter rate (kg m^{-2})	Ei						RI	Risk level
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Value	
Surface runoff	CK	30.00	2.00	5.00	5.00	5.00	1.00	48.00	Low
	0	63.12	3.98	6.72	7.26	9.14	1.41	91.64	Low
	0.75	33.66	2.64	4.11	4.44	3.90	1.03	49.78	Low
	1.5	5.28	0.45	0.62	1.04	0.65	0.21	8.25	Low
Soil interflow	CK	30.00	2.00	5.00	5.00	5.00	1.00	48.00	Low
	0	47.52	1.40	9.67	5.79	4.36	1.31	70.04	Low
	0.75	108.49	4.40	22.69	11.91	11.65	2.68	161.83	Moderate
	1.5	170.73	16.94	66.59	25.65	25.65	6.54	312.10	Considerable
Sediment	CK	30.00	2.00	5.00	5.00	5.00	1.00	48.00	Low
	0	54.13	2.54	6.05	7.41	7.02	2.22	79.37	Low
	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	–
	1.5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	–
Multi-pathway	CK	30.00	2.00	5.00	5.00	5.00	1.00	48.00	Low
	0	54.37	2.61	6.07	7.39	7.10	2.13	79.68	Low
	0.75	6.15	0.15	0.17	0.22	0.32	0.16	7.17	Low
	1.5	7.01	0.07	0.22	0.23	0.30	0.22	8.05	Low

Classification of *Ei* risk: low < 40; 40 ≤ moderate < 80; 80 ≤ considerable < 160; and. 160 ≤ high < 320. Classification of *RI* risk: low < 150; 150 ≤ moderate < 300; 300 ≤ considerable < 600; high ≥ 600.

5. Conclusion

Our experiments quantified HM migrations via surface runoff, interflow, and sediments following addition of SS alone and in combination with contrasting rates of plant litter. While the addition of SS increased HM concentrations and migrations in surface runoff, soil interflow, and small-sized sediments, and increased sediment yield, the co-addition of plant litter mitigated these impacts and changed the Cd migration pathway from surface runoff to interflow that further reduced the risk of HM contamination. These findings underscore the environmental risks associated with the application of SS, while also highlighting the potential of plant litter cover as a management strategy for the mitigation HM pollution. Concentrations of the six HMs in surface runoff were similar between the field and laboratory experiments, although cumulative runoff migrations were higher in the laboratory. We suggest further comprehensive field experiments are needed to

assess the risk of HM pollution caused by soil interflow and sediment under SS applications to subtropical forest soils.

CRediT authorship contribution statement

Lihua Xian: Writing – original draft, Methodology, Investigation, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Jianbo Fang:** Writing – original draft, Methodology, Formal analysis, Data curation, Conceptualization. **Dehao Lu:** Methodology, Formal analysis, Data curation. **Yuantong Yang:** Visualization, Methodology, Investigation. **Jiayi Feng:** Methodology, Data curation. **Daoming Wu:** Writing – review & editing. **Josep Peñuelas:** Writing – review & editing. **Shucai Zeng:** Writing – review & editing, Supervision, Resources, Project administration, Methodology, Funding acquisition, Conceptualization.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

This work was supported by the Forestry Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province [2022KJCX015] and the National Natural Science Foundation of China [31971629].

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174820.

References

Abreu-Junior, C.H., Firme, L.P., Maldonado, C.A.B., de Moraes Neto, S.P., Alves, M.C., Muraoka, T., Boaretto, A.E., Gava, J.L., He, Z., Nogueira, T.A.R., Capra, G.F., 2017. Fertilization using sewage sludge in unfertile tropical soils increased wood production in *Eucalyptus plantations*. J. Environ. Manag. 203, 51–58.
Badzmierowski, M., Evanyto, G., Daniels, W., Haering, K., 2021. What is the impact of human wastewater biosolids (sewage sludge) application on long-term soil carbon sequestration rates? A systematic review protocol. Environ. Evid. 10, 6.
Bruggeman, A., Mostaghimi, S., 1993. Sludge application effects on runoff, infiltration, and water quality. J. Am. Water Resour. Assoc. 29, 15–26.
Chow, H.Y., Pan, M., 2020. Fertilization value of biosolids on nutrient accumulation and environmental risks to agricultural plants. Water Air Soil Pollut. 231, 578.
Chu, L., He, W., 2021. Toxic metals in soil due to the land application of sewage sludge in China: spatiotemporal variations and influencing factors. Sci. Total Environ. 757, 143813.
Chu, S., Wu, D., Liang, L.L., Zhong, F., Hu, Y., Hu, X., Lai, C., Zeng, S., 2017. Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil. Sci. Rep.–UK 7, 13408.
Chu, S., Yang, W., Xia, D., Liang, Z., Su, S., Zhao, N., Wang, J., Long, M., Ouyang, J., Liao, D., Jacobs, D.F., Zeng, S., 2021. Changes in potentially toxic element concentration and potential ecological risk in topsoil caused by sewage sludge application on forestland: a 3-year field trial. Forest Ecol. Manag. 500, 119657.
Chu, S., Xian, L., Lai, C., Yang, W., Wang, J., Long, M., Ouyang, J., Liao, D., Zeng, S., 2023a. Migration and risks of potentially toxic elements from sewage sludge applied to acid forest soil. J. Forestry Res. 34, 2011–2026.
Chu, S., Xian, L., Zhao, N., Lai, C., Yang, W., Wang, J., Long, M., Liao, D., Ouyang, J., Wang, Z., Jacobs, D.F., Zeng, S., 2023b. Combined addition of bagasse and zeolite stabilizes potentially toxic elements in sewage sludge compost and improves *Eucalyptus urophylla* seedling growth. Forest Ecol. Manag. 539, 121003.
Da Silva, W.R., Do Nascimento, C.W.A., Da Silva, F.B.V., de Souza, A.A.B., Fracetto, G.G. M., de Sá Veloso Ximenes, D.H., 2021. Effects of sewage sludge stabilization processes on soil fertility, mineral composition, and grain yield of maize in successive cropping. J. Soil Sci. Plant Nutr. 21, 1076–1088.
Demirak, A., Yilmaz, F., Tuna, A., Özdemir, N., 2006. Heavy metals in water, sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern Turkey. Chemosphere 63, 1451–1458.
Deng, A., Wang, L., Chen, F., Li, Z., Liu, W., Liu, Y., 2018. Soil aggregate-associated heavy metals subjected to different types of land use in subtropical China. Glob. Ecol. Conserv. 16, e00465.
Fang, W., Delapp, R.C., Kosson, D.S., van der Sloot, H.A., Liu, J., 2017. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: percolation leaching tests with repeated additions of compost. Chemosphere 169, 271–280.
Fang, X., Zhong, X., Cui, Z., Zhang, Y., Du, L., Yang, Y., Lv, J., 2023. Distribution and remediation techniques of heavy metals in soil aggregates perspective: a review. Water Air Soil Pollut. 234, 631.
Felix, R., Dias, A., Bevilacqua, M.S., Da Silva, M.P., Bozelli, R., Barros, M., 2023. Litter addition as a tool for restoring hydrological processes and controlling erosion in riparian forests disturbed by fine sediment deposition. Restor. Ecol. 31, e13895.
Håkanson, L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. Water Res. 14, 975–1001.
Hoang, S.A., Bolan, N., Madhubashani, A., Vithanage, M., Perera, V., Wijesekara, H., Wang, H., Srivastava, P., Kirkham, M.B., Mickan, B.S., Rinklebe, J., Siddique, K., 2022. Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: a review. Environ. Pollut. 293, 118564.
Huang, B., Li, Z., Huang, J., Guo, L., Nie, X., Wang, Y., Zhang, Y., Zeng, G., 2014. Adsorption characteristics of Cu and Zn onto various size fractions of aggregates from red paddy soil. J. Hazard. Mater. 264, 176–183.
Huang, B., Yuan, Z., Li, D., Nie, X., Xie, Z., Chen, J., Liang, C., Liao, Y., Liu, T., 2018. Loss characteristics of Cd in soil aggregates under simulated rainfall conditions. Sci. Total Environ. 650, 313–320.
Inokoshi, S., Gomi, T., Chiu, C., Onda, Y., Hashimoto, A., Zhang, Y., Saitoh, T., 2023. A watershed-scale evapotranspiration model considering forest type, stand parameters, and climate factors. Forest Ecol. Manag. 547, 121387.
Joshua, W.D., Michalk, D.L., Curtis, I.H., Salt, M., Osborne, G.J., 1998. The potential for contamination of soil and surface waters from sewage sludge (biosolids) in a sheep grazing study, Australia. Geoderma 84, 135–156.
Jourgholami, M., Sohrabi, H., Venanzi, R., Tavankar, F., Picchio, R., 2021. Hydrologic responses of undecomposed litter mulch on compacted soil: litter water holding capacity, runoff, and sediment. Catena 210, 105875.
Koyuncu, S., 2022. Occurrence of organic micropollutants and heavy metals in the soil after the application of stabilized sewage sludge. J. Environ. Health Sci. 20, 385–394.
Leila, S., Mhamed, M., Hermann, H., Mykola, K., Oliver, W., Christin, M., Elena, O., Nadia, B., 2017. Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. Biotechnol. Rep. 13, 8–12.
Li, X., Niu, J., Xie, B., Bond-Lamberty, B., 2014. The effect of leaf litter cover on surface runoff and soil erosion in northern China. PLoS One 2014, e107789.
Li, Q., Wang, Y., Li, Y., Li, L., Tang, M., Hu, W., Chen, L., Ai, S., 2022. Speciation of heavy metals in soils and their immobili- zation at micro-scale interfaces among diverse soil components. Sci. Total Environ. 825, 153862.
Li, X., Yuan, S., Cai, C., Li, X., Wu, H., Shen, D., Dong, B., Xu, Z., 2024. A 20-year shift in China's sewage sludge heavy metals and its feasibility of nutrient recovery in land use. Environ. Pollut. (1987) 341, 122907.
Liu, M., Han, Z., 2020. Distribution and bioavailability of heavy metals in soil aggregates from the Fenhe River Basin, China. Bull. Environ. Contam. Toxicol. 104, 532–537.
Liu, D., Wang, J., Yu, H., Gao, H., Xu, W., 2021. Evaluating ecological risks and tracking potential factors influencing heavy metals in sediments in an urban river. Environ. Sci. Eur. 33, 42.
Liu, J., Su, J., Wang, J., Song, X., Wang, H., 2022. A case study: arsenic, cadmium and copper distribution in the soil–rice system in two main rice-producing provinces in China. Sustainability (Basel, Switzerland) 14, 14355.
Mamedov, A., Bar-Yosef, B., Levkovich, I., Rosenberg, R., Silber, A., Fine, P., Levy, G., 2014. Amending soil with sludge, manure, humic acid, orthophosphate and phytic acid: effects on aggregate stability. Soil Res. 52, 317–326.
Marguí, E., Iglesias, M., Camps, F., Sala, L., Hidalgo, M., 2016. Long-term use of biosolids as organic fertilizers in agricul- tural soils: potentially toxic elements occurrence and mobility. Environ. Sci. Pollut. Res. 23, 4454–4464.
Maria, S., B, G., V, P., Rojas, M., M, I., Venegas, H., 2007. Chemical characterization of sewage sludges in Chile and their potential utilization as amendment to reclaim soils for forestation purposes. J. Plant Nutr. 30, 1993–2003.
Nainar, A., Kishimoto, K., Takahashi, K., Gomyo, M., Kuraji, K., 2021. How do ground litter and canopy regulate surface runoff? – a paired-plot investigation after 80 years of broadleaf forest regeneration. Water 13, 1205.
Notten, M., Oosthoek, A., Rozema, J., Aerts, R., 2005. Heavy metal concentrations in a soil-plant-snail food chain along a terrestrial soil pollution gradient. Environ. Pollut. 138, 178–190.
Pandey, R., Raghubanshi, A.S., 2022. Impact of throughfall deposition and its runoff through different land use surfaces on the chemistry of Ganga water, Varanasi. Limnology 23, 111–125.
Perez-de-Mora, A., Burgos, P., Cabrera, F., Madejon, E., 2007. "In situ" amendments and revegetation reduce trace element leaching in a contaminated soil. Water Air Soil Pollut. 185, 209–222.
Peyton, D.P., Healy, M.G., Fleming, G.T.A., Grant, J., Wall, D., Morrison, L., Cormican, M., Fenton, O., 2016. Nutrient, metal and microbial loss in surface runoff following treated sludge and dairy cattle slurry application to an Irish grassland soil. Sci. Total Environ. 541, 218–229.
Qi, G., Jia, Y., Liu, W., Wei, Y., Du, B., Fang, W., Guo, Y., Guo, F., Wu, Y., Zou, Q., Liu, J., 2020. Leaching behavior and potential ecological risk of heavy metals in Southwestern China soils applied with sewage sludge compost under acid precipitation based on lysimeter trials. Chemosphere 249, 126212.
R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

Rostagno, C.M., Sosebee, R.E., 2001. Biosolids application in the Chihuahuan Desert: effects on runoff water quality. J. Environ. Qual. 30, 160–170.
Sun, J., Lu, P., Cao, Y., Zhang, N., Wu, F., Li, P., 2022. Effects of different crop root systems on soil detachment by concentrated flow on the Loess Plateau in China. Water 14, 772.
Tóth, G., Hermann, T., Ravina Da Silva, M., Montanarella, L., 2016. Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. Environ. Int. 88, 299–309.
Wang, S., Liu, Q., Liu, Z., He, J., Bao, L., Zhang, J., Zhang, N., 2023. Simulation study on risk and influencing factors of cadmium loss in contaminated soil. Sustainability 15, 1553.
Wu, D., Yu, X., Chu, S., Jacobs, D.F., Wei, X., Wang, C., Long, F., Chen, X., Zeng, S., 2018. Alleviation of heavy metal phytotoxicity in sewage sludge by vermicomposting with additive urban plant litter. Sci. Total Environ. 633, 71–80.
Xiao, R., Zhang, M., Yao, X., Ma, Z., Yu, F., Bai, J., 2016. Heavy metal distribution in different soil aggregate size classes from restored brackish marsh, oil exploitation zone, and tidal mud flat of the Yellow River Delta. J. Soils Sediments 16, 821–830.
Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., Bi, J., 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: pollution and risk assessment. Sci. Total Environ. 642, 690–700.
Yang, Y., Feng, W., Bao, L., Xian, L., Lu, J., Wu, D., Jacobs, D.F., Zeng, S., 2023. Effects of sewage sludge application methods on the transport of heavy metals with runoff and their mechanisms. Sci. Total Environ. 912, 168909.
Zhang, Q., Wang, C., 2020. Natural and human factors affect the distribution of soil heavy metal pollution: a review. Water Air Soil Pollut. 231.
Zhou, G., Wei, X., Wu, Y., Liu, S., Huang, Y., Yan, J., Zhang, D., Zhang, Q., Liu, J., Meng, Z., Wang, C., Chu, G., Liu, S., Tang, X., Liu, X., 2011. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in Southern China. Glob. Chang. Biol. 17, 3736–3746.
Zhou, J., Fu, B., Gao, G., Lü, Y., Liu, Y., Lü, N., Wang, S., 2016. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. Catena (Giessen) 137, 1–11.
Zhu, F., Cheng, J., 2022. Comparison of the effects of litter decomposition process on soil erosion under simulated rainfall. Sci. Rep.–UK 12, 20929.
Zoghlami, R.I., Hamdi, H., Mokni-Tlili, S., Hechmi, S., Khelil, M.N., Ben Aissa, N., Moussa, M., Bousnina, H., Benzarti, S., Jedidi, N., 2020. Monitoring the variation of soil quality with sewage sludge application rates in absence of rhizosphere effect. Int. Soil Water Conserv. Res. 8, 245–252.
Zuo, W., Bai, Y., Lv, M., Tang, Z., Ding, C., Gu, C., Shan, Y., Dai, Q., Li, M., 2021. Sustained effects of one-time sewage sludge addition on rice yield and heavy metals accumulation in salt-affected mudflat soil. Environ. Sci. Pollut. Res. Int. 28, 7476–7490.

2. 2. Effects of woodland slope on heavy metal migration via surface runoff, interflow, and sediments in sewage sludge application

www.nature.com/scientificreports

scientific reports

Check for updates

OPEN

Effects of woodland slope on heavy metal migration via surface runoff, interflow, and sediments in sewage sludge application

Lihua Xian[1,4], Dehao Lu[1,4], Yuantong Yang[1], Jiayi Feng[2], Jianbo Fang[1], Douglass F. Jacobs[3], Daoming Wu[1] & Shucai Zeng[1]✉

Sewage sludge (SS) application to forest plantation soils as a fertilizer and/or soil amendment is increasingly adopted in plantation forest management. However, the potential risks of SS-derived heavy metals (HMs) remain a concern. Many factors, including woodland slope may affect the risks, but the understanding of this issue is limited. This research evaluated the HMs migration via surface runoff, interflow, and sediments when SS was applied in woodlands of varying slopes. We conducted indoor rainfall simulations and natural rainfall experiments to clarify the effect of slope on the migration of HMs via runoff (including surface and interflow) and sediments. In the simulated rainfall experiment, HMs lost via sediments increased by 9.79–27.28% when the slope increased from 5° to 25°. However, in the natural rainfall experiment, when the slope of forested land increased from 7° to 23°, HMs lost via surface runoff increased by 2.38% to 6.13%. These results indciate that the surface runoff water on a high slope (25°) posed high water quality pollution risks. The migration of HMs via surface runoff water or interflow increased as the steepness of the slope increased. The total migration of Cu, Zn, Pb, Ni, Cr and Cd via sediment greatly exceeded that via surface runoff and interflow. Particles ≤ 0.05 mm contributed the most to the ecological risks posed by sediments. Cd was the main source of potential ecological risks in sediments under both experimental conditions.

Keywords Sludge utilization, Soil contamination, Forest soils, Surface runoff, Rainfall

Urbanization and global industrialization have led to increases in the production of sewage sludge (SS). SS production has thus become a major environmental issue[1,2]. Approximately 120 million tons of SS were generated by the major economies worldwide in 2019[3], and the amount of SS generated by these economies is projected to be between 150 and 200 million tons in 2025. The composition of SS is highly complex, and previous studies have shown that SS contains various potentially harmful substances, including heavy metals (HMs), organic compounds, pathogens, and pharmaceutical residues[4]. In light of global limitations in the disposal capacity of SS, ensuring the safety and efficiency of the recycling and treatment of SS has become a major focus of research in the environmental science field.

SS has been applied as a fertilizer to woodlands, representing a sustainable and effective treatment for recycling the abundant organic matter and nutrients in SS[5–8]. As most forest products do not directly enter the human food chain, SS can be applied to forest land to enhance soil fertility and tree growth. However, the risk of contamination with HM elements, such as copper (Cu), zinc (Zn), lead (Pb), cadmium (Cd), and nickel (Ni) in SS, poses a major challenge for its use in woodlands at large scales[9–12]. HMs in SS may migrate through surface runoff to neighboring woodlands, where they are absorbed by the soil and accumulate, and this can have deleterious effects on plants, animals, and forest ecosystems[13,14]. Rainfall can facilitate the infiltration of HMs from SS into the subsoil, which affects groundwater quality and can pollute neighboring water resources[15–17]. However, the application of SS to woodlands enhances the physicochemical properties of the soil, which reduces the risk of HM migration in runoff[18]. The high content of organic matter in SS improves soil structure and increases the stability and erosion resistance of soil aggregates, which promotes the immobilization of HMs in

[1]College of Forestry & Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, China. [2]Guangdong Eco-Engineering Polytechnic, Guangzhou, Guangdong, China. [3]Department of Forestry and Natural Resources, Purdue University, West Lafayette, USA. [4]These authors contributed equally: Lihua Xian and Dehao Lu. ✉email: sczeng@scau.edu.cn

the soil and reduces their susceptibility to transport[19]. Galdos et al.[20] found that the application of SS increases the concentration of HMs in surface runoff and sediments and the migration of most HMs mainly occurs through sediments, indicating that the risk of HM migration via sediments is particularly high. Comprehensive assessments of the safety and sustainability of applying SS to woodlands are thus critically important.

Recent studies have shown that slope has a major effect on the risks of HM migration via runoff and sediment following the application of SS. Several factors contribute to the effect of slope on HM migration via these pathways. First, soil HMs are mainly in dissolved and particulate forms when they migrate with runoff during rainfall[21]. During this process, increases in slope slow the release of soil HMs via changes in the impact angle of raindrops and gravity, which can alter the form of HMs[22]. In SS, HMs are mainly in a granular state; however, during rainfall, changes in slope might promote the conversion of HMs into the dissolved state, which alters the total amount of HM migration and the relative contributions of different pathways (surface runoff, interflow, and sediments) to HM migration. Second, given that runoff and sediment are important carriers of HMs, runoff and sediment yield are key factors affecting the migration of HMs. Some studies have indicated that the residence time of precipitation on slopes decreases as the slope increases, which leads to decreases in the retention time of water in the soil, increases in the surface runoff on the slope[23], and decreases in the yield of interflow[24]. However, other studies have shown that runoff volume reaches a critical threshold as the slope increases; beyond this threshold, runoff volume decreases or remains constant[25]. Furthermore, several studies have found that changes in slope are the main driver of the flushing of sediments by rainfall runoff[26]. High slopes can increase erosion by promoting soil stripping or mitigating the protective effect of SS on the soil surface. In the early stages of flow production, cumulative sediment migration increases with cumulative runoff, and transport-limited erosion is the dominant sediment erosion process. However, segregation-limited erosion becomes more prevalent in subsequent rainfall events[27].

HMs can be transported via surface runoff, interflow, and sediment. However, only a few studies evaluating soil erosion and nutrient loss from agricultural fields have examined the relative contributions of all three of these pathways to the transport of HMs[28,29]. Additionally, few studies have clarified the effects of slope on the migration of HMs via surface runoff, interflow, and sediments during the application of SS to woodlands. Estimates of the magnitude of the potential ecological risks of HM migration via runoff might vary depending on the methodology of rainfall experiments. The effects of slope on the migration of HMs in runoff have generally been estimated via simulated rainfall experiments or natural rainfall experiments in the field[30,31]. However, whether, and to what extent, the risks of HM migration via runoff and sediment estimated using these two experimental approaches varies remains unclear. Here, we studied the migration of the HMs in SS via surface runoff (including surface flow and loam center flow), interflow, and sediment on different slopes simultaneously using an indoor simulated rainfall experiment and natural rainfall experiment in the field. The indoor simulated rainfall experiment was conducted in a homemade steel tank, and the natural rainfall experiment was conducted in a runoff plot in a *Eucalyptus* woodland. We then evaluated (1) the effects of slope on runoff water and sediment yield, (2) differences in the migration patterns of HMs in surface runoff water, interflow, and sediments on different slopes, and (3) the potential ecological risks of HM migration associated with the application of SS to woodland. Overall, the main aim of this study was to identify the optimal slope for enhancing the efficacy and safety of SS application.

Results

Runoff and sediment yield in simulated rainfall and natural rainfall experiments

Runoff and sediment yield in the simulated rainfall experiment

Slope had a major effect on surface runoff, interflow, and sediment yield. Surface runoff yield in the simulated rainfall events was highest in the S25 treatment, followed by the CK, S15, and S5 treatments. Surface runoff yield for all rainfall events in the S15 and CK treatments did not significantly differ (Fig. 1a). The mean interflow yield was 132.17% and 45.14% higher in the S5 treatment than in the S15 and S25 treatments, respectively (Fig. 1b). The interflow yield was significantly higher in the S5 treatment than in the S15 and S25 treatments from the fifth (R5) to the tenth (R10) rainfall event. The sediment yield was significantly lower in the S5 treatment than in the other treatments for all rainfall events (Fig. 1c). Overall, the average yield of surface runoff increased as the slope increased. The average interflow yield was highest in the S5 treatment, which was significantly higher than in the S15 and S25 treatments. The average sediment yield in the S5 was significantly lower than in the other treatments (Fig. 1d).

Runoff and sediment yield in the natural rainfall experiment. The average surface runoff yield in the natural rainfall experiment increased as the slope increased, and the surface runoff yield in S15-F was significantly lower than in the CK-F for R3, R4, R5, R6, R7, and R10 (Fig. 2a). The sediment yield increased with the slope for both R4 and R5. The sediment yield for R5 was significantly lower in the S15-F treatment than in the CK-F treatment. No sediment was collected in the R1–R3 and R6–R10 rainfall events (Fig. 2c). The average surface runoff and sediment yield increased as the slope increased, with the mean surface runoff yield and sediment yield in S15-F 25.36% and 20.25% lower than CK-F, respectively, and these differences were significant (Fig. 2b,d).

Cumulative amount of HM migration and the relative contributions of different pathways to HM migration in the simulated rainfall and natural rainfall experiments

Cumulative amount of HM migration and the relative contributions of different pathways to HM migration in the simulated rainfall experiment. The cumulative amount of HM migration via surface runoff, interflow, and sediment, as well as the relative contributions of the different pathways to HM migration, were affected by the slope (Fig. 3). The cumulative migration amount for each HM in the sediments gradually increased as the slope increased. When the slope increased from 5° to 25°, the loss of HMs in sediments increased by 9.79–27.28%,

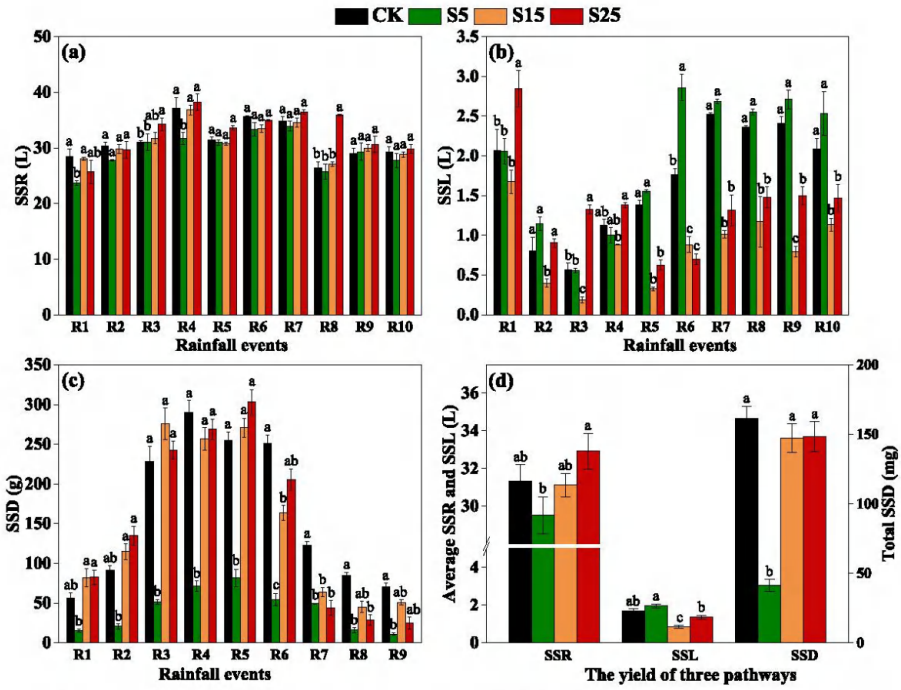


Figure 1. Surface runoff yield (SSR, L) (**a**), interflow yield (SSL, L) (**b**), and sediment yield (SSD,·g) (**c**) in each simulated rainfall event (R1–R10) (sediment was collected only in R1–R9). Total SSR (L), total SSL (L), and total SSD (g) of all 10 or 9 simulated rainfall events (CR10, CR9) (**d**). The data in the figure are the average of three replicates, and different letters indicate significant differences between treatments for the same simulated rainfall event. The threshold for statistical significance was $p < 0.05$. CK: Slope 15° + no SS application, S5: Slope 5° + SS application, S15: slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application.

and the loss of HMs in surface runoff and interflow decreased by 5.47–16.80% and 1.11–16.25%, respectively. Sediment was the main route for the migration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn, and migration of these HMs via sediment was an order of magnitude greater than that via surface runoff and interflow.

Cumulative amount of HM migration and the relative contributions of different pathways to the migration of HMs in the natural rainfall experiment

Consistent with the results of the simulated rainfall experiment, the cumulative migration of HMs with surface runoff increased as the slope increased (Fig. 4). The proportion of cumulative amount of HM migration via sediment decreased with increasing slope, which was inconsistent with the results of the simulated rainfall experiment. Nevertheless, sediment was still the main pathway of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn migration, and the migration of these HMs via sediment was an order of magnitude greater than that via surface runoff. In each treatment, the proportion of HM migration via sediment was greater than 75%.

Comparison of the total migration of HMs on different slopes in the simulated rainfall and natural rainfall experiments

The total migration of HMs in surface runoff in the simulated rainfall and natural rainfall experiments varied with slope. Overall, the total migration of HMs in the natural rainfall experiment increased significantly as the slope increased, while the total amount of HMs migration in the simulated rainfall experiment varied with slope and HMs. The total migration of Ni, Pb, and Cu was similar in the simulated indoor rainfall and natural rainfall experiments, and the migration of these elements significantly increased as the slope increased ($p < 0.05$). The total migration of Cr and Cd first increased and then decreased as the slope increased, and the total migration of Zn first decreased and then increased as the slope increased in both the simulated rainfall and natural rainfall experiments (Fig. 5).

The total migration of HMs via sediment increased significantly as the slope increased in the simulated indoor rainfall experiment. The total migration of HMs varied with slope in the natural rainfall experiment, and variation in the amount of HMs with slope differed among HMs. The total migration of Cd, Cr, Ni, and Pb increased as the slope increased in the natural rainfall and indoor simulated rainfall experiments. However, the

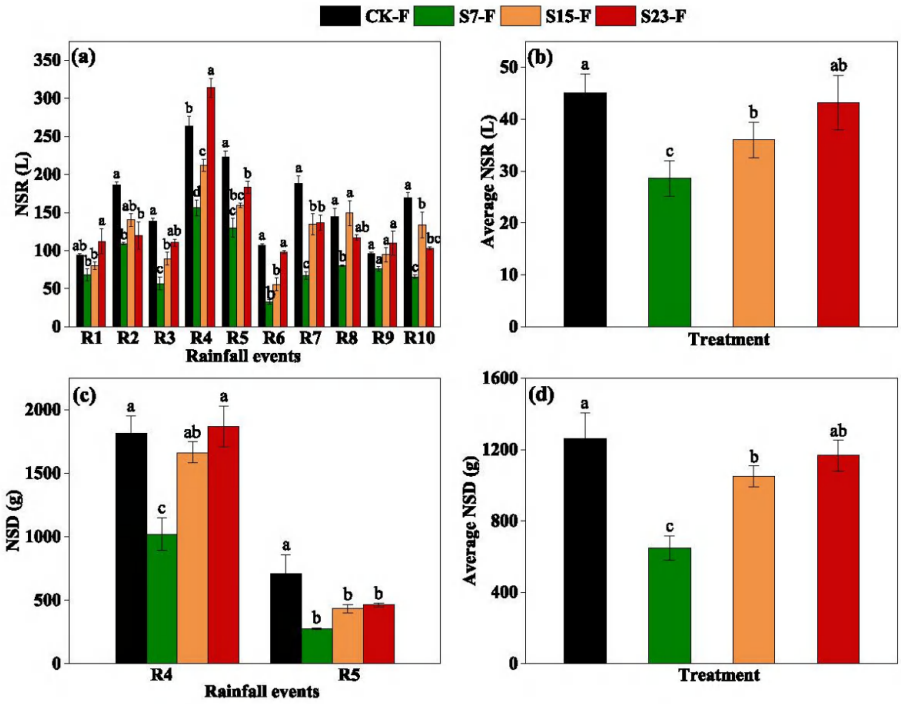


Figure 2. Surface runoff yield (NSR, L) (**a**), interflow yield (NSR, L) (**b**), and sediment yield (NSD, g) (**c**) for each natural rainfall event (R1–R10) (sediment was collected only in R4 and R5). Total NSR (L) and total NSD (g) of the 10 or 2 natural rainfall events (CR10, CR2) (**d**) The data in the figure are the average of three replicates, and different letters indicate significant differences between treatments for the same natural rainfall event. The threshold for statistical significance was $p < 0.05$. CK: Slope 15° + no SS application, S5: Slope 5° + SS application, S15: slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application.

total migration of Cu and Zn first increased and then decreased as the slope increased, and this was inconsistent with the results in the indoor simulated rainfall experiment (Fig. 6).

Potential ecological risks of HM migration via runoff and sediment in the simulated rainfall and natural rainfall experiments

Potential ecological risks of HM migration via runoff and sediment in the indoor simulated rainfall experiment

The WQI was used to evaluate changes in the water quality of surface runoff and interflow during 10 simulated rainfall events (Fig. 7). In the 10 rainfall events, the water quality of the surface runoff in the CK and S5 treatments was "excellent." In R1–R2, the surface runoff water quality in the S15 treatment was "excellent", and it changed from "excellent" to "good" as the number of simulated rainfall events increased. In the S25 treatment, the surface runoff water quality was "poor" for R4, but "good" for the other nine rainfall events (Fig. 7a). The interflow water quality in CK and S5 changed from "good" to "poor" and that in S15 and S25 changed from "good" to "very poor" as number of simulated rainfall events increased (Fig. 7b).

The potential ecological risk assessment revealed (Table 1) that the E_r of Cd in S15 and S25 was "considerable" in sediments with particle sizes > 0.05 mm and "high" when particle sizes were ≤ 0.05 mm. The E_r of Cd in the S5 treatment was "high" when particle sizes were ≤ 0.05 mm and "low" in sediments with particle sizes > 0.05 mm. The potential ecological risks of Cd for the four sediment particle sizes were 74.05–112.85% higher in the S15 treatment than in the CK. The E_r of the other five HMs for the four particle sizes in the different treatments was "low."

The *RI* value in the sediment depends on the slope and particle size of the sediment (Table 1). In the simulated rainfall experiment, the *RI* values of the sediments for the four particle sizes were highest in the S15 treatment. The *RI* values of sediments were highest and lowest in different treatments for particle sizes ≤ 0.05 mm and > 1 mm, respectively. *RI* values of sediments increased as the particle size decreased. Generally, when the sediment particle size was ≤ 0.25 mm, the *RI* was "low"; when the sediment particle size was 0.05 ~ 0.25 mm, the *RI* of the CK and S5 treatment was "low", and the *RI* of the S15 and S25 treatments was " moderate"; when

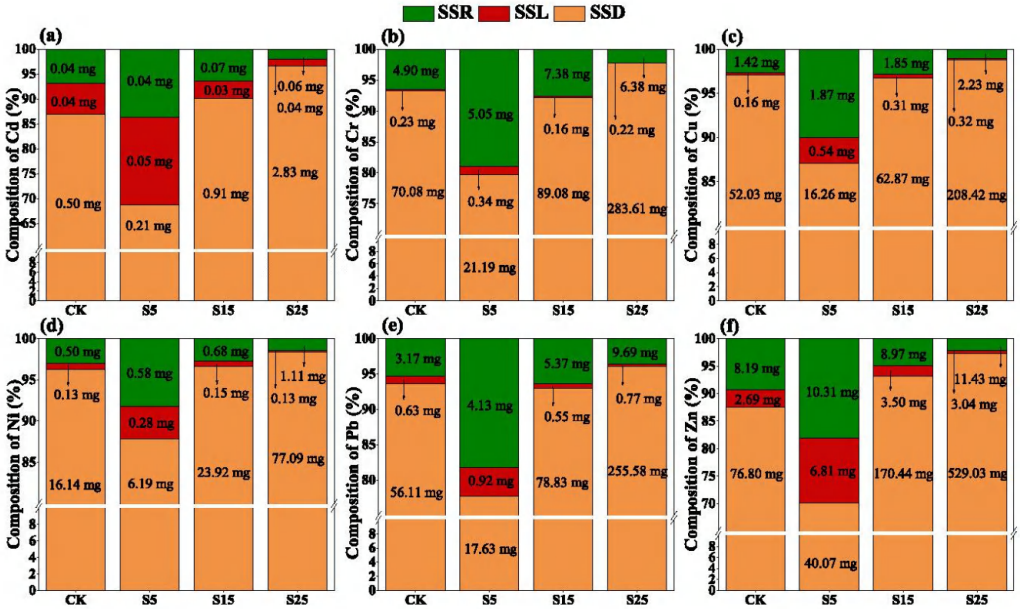


Figure 3. (a–f) are the cumulative migration amount (mg) and proportion (%) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn with surface runoff (SSR), interflow (SSL), and sediment (SSD) in simulated rainfall events, respectively. CK: slope 15° + no SS application, S5: slope 5° + SS application, S15: slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application.

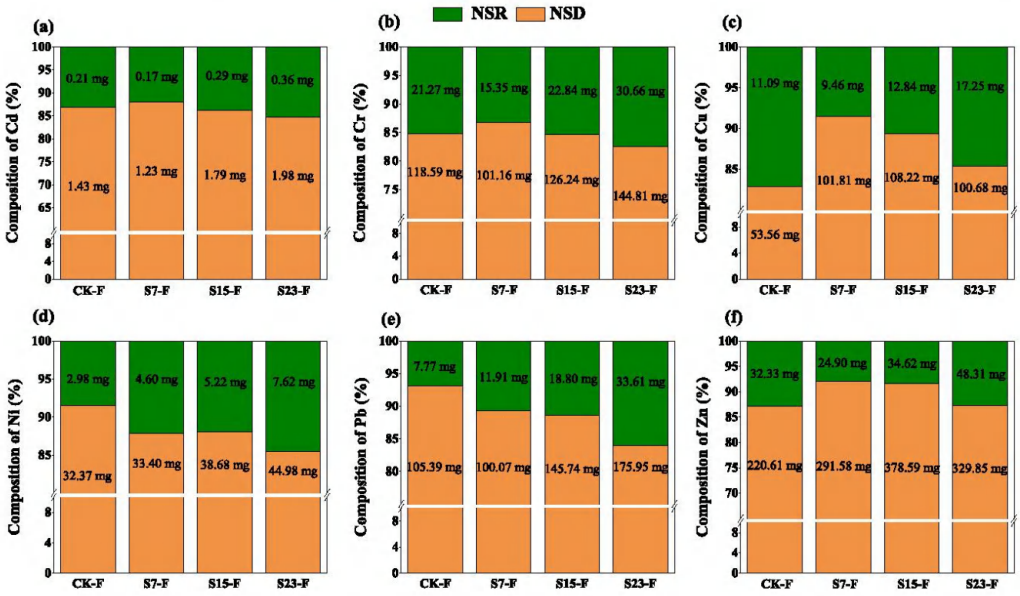


Figure 4. (a–f) show the cumulative migration amount (mg) and proportion (%) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn via surface runoff (NSR) and sediment (NSD) in natural rainfall events, respectively. CK-F: slope 15° + no SS application, S7-F: slope 7° + SS application, S15: slope 15° + SS application, and S23: slope 23° + SS application.

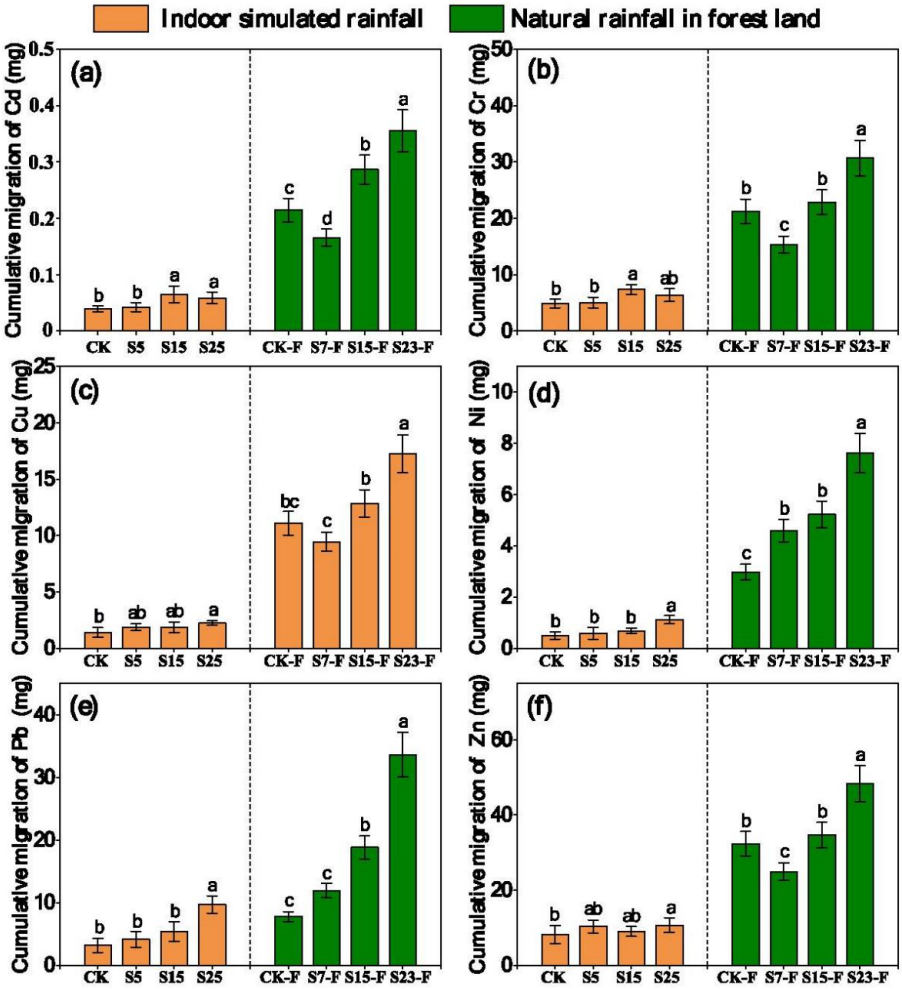


Figure 5. (**a**–**f**) show the total migration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn via surface runoff for 10 simulated rainfall events and 10 forest natural rainfall events, respectively. CK: Slope 15° + no SS application, S5: Slope 5° + SS application, S15: Slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application (simulated rainfall experiment). CK-F: Slope 15° + no SS application, S7-F: slope 7° + SS application, S15-F: Slope 15° + SS application, and S23-F: slope 23° + SS application (natural rainfall experiment). The data in the figure are the average of three replicates, and different letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$).

the sediment particle size was ≤ 0.05 mm, the *RI* of the CK was "low." The *RI* of the other three treatments was "moderate." The potential ecological risks of each treatment mainly stemmed from Cd (Table 1).

Potential ecological risks of HM migration via runoff and sediment in the natural rainfall experiment

No significant differences in the WQI of the surface runoff of each treatment were observed for R1–R3. In R4, the WQI of surface runoff was 61.82%, 16.57%, and 92.92% higher in the S7-F, S15-F, and S23-F treatments than in the R3 treatment, respectively. The WQI of each treatment decreased from R5 to R10, and the water quality was "excellent" for R8–R10 (Fig. 8a). Sediment was collected during only R4 and R5. The potential ecological risks of the three treatments with SS application were significantly higher than CK-F. Consistent with the results of the simulated rainfall experiment, Cd was the main source of potential ecological risks in sediment in the natural rainfall experiment, and the E_r value for Cd was significantly higher than that for the other five HMs. The RI values of the sediments for R4 and R5 decreased as the slope increased (Fig. 8b).

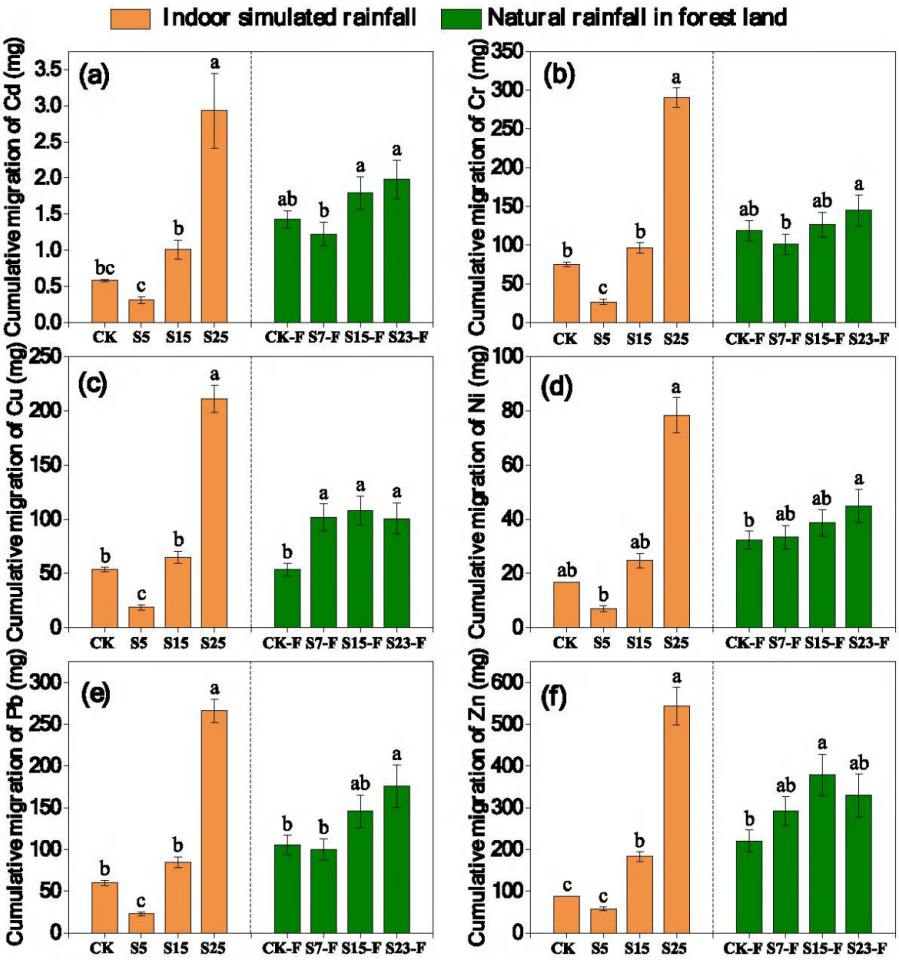


Figure 6. (**a**–**f**) show the total migration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn via sediment for 10 simulated rainfall events and 10 forest natural rainfall events, respectively. CK-F: Slope 15° + no SS application, S7-F: Slope 7° + SS application, S15-F: Slope 15° + SS application, and S23-F: slope 23° + SS application (simulated rainfall experiment). CK-F: Slope 15° + no SS application, S7-F: slope 7° + SS application, S15-F: Slope 15° + SS application, S23-F: slope 23° + SS application (natural rainfall experiment). The data in the figure are the average of three replicates, and different letters indicate significant differences between treatments ($p < 0.05$).

Discussion

The use of SS as fertilizer for forest soil is a promising SS treatment method. However, HMs can migrate to the external environment via surface runoff, interflow, and sediment following SS application. The risks of HM migration might be particularly high in hot and rainy southern forest regions. Evaluating the risks of HM migration via these different pathways is critically important for ensuring the safety of SS application[32,33]. SS application to forest land might alter the erosion effect of rainfall on soil, and the amount of HM migration via surface runoff, interflow, and sediment varies with slope[20,24] The results of the indoor simulated rainfall experiments showed that the surface runoff yield increased as the slope increased following SS application. We also found that changes in surface runoff and sediment yield with slope were similar in the natural rainfall and indoor simulated rainfall experiments. This indicates that slope has a major effect on the transport of runoff, even in natural woodlands. Season is one of the main factors affecting surface runoff and sediment yield in natural rainfall experiments in woodlands. In the natural rainfall experiment, 70% of the rainfall events occurred in the summer (from May to August). Furthermore, patterns of variation in rainfall and surface runoff were

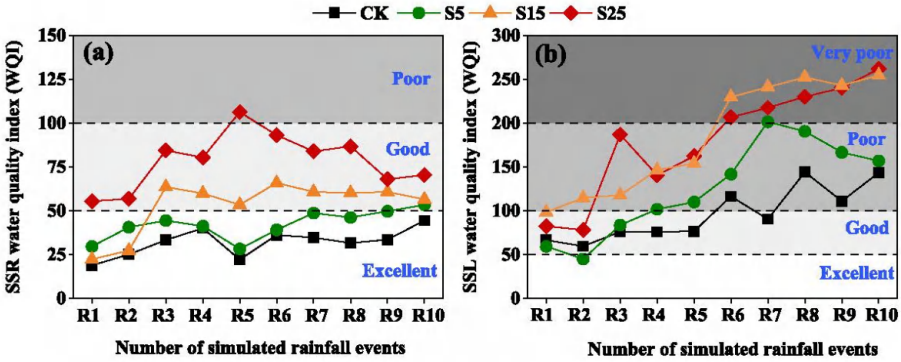


Figure 7. (**a**, **b**) show WQI values of surface runoff (SSR) and interflow (SSL) in simulated rainfall events, respectively. CK: Slope 15° + no SS application, S5: Slope 5° + SS application, S15: Slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application. WQI < 50, 50 ≤ WQI < 100, 100 ≤ WQI < 200, 200 ≤ WQI < 300, and WQI ≥ 300 correspond to excellent, good, poor, extremely poor, and unfit for drinking, respectively.

Particle sizes (mm)	Treatment	Potential ecological risk coefficients (E_r) of single elements						Potential ecological risk index (RI) of multiple elements	Risk level
		Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn		
> 1	CK	62.29	0.87	4.30	1.68	2.54	0.52	72.20	Low
	S5	23.53	0.25	1.30	0.47	1.17	0.47	27.19	Low
	S15	110.72	1.23	6.13	2.45	4.95	1.86	127.34	Low
	S25	107.89	1.07	5.12	2.05	4.42	1.65	122.20	Low
0.25–1	CK	56.49	0.91	4.41	1.68	2.91	0.66	67.06	Low
	S5	31.38	0.31	1.47	0.59	1.11	0.33	35.19	Low
	S15	120.24	1.23	5.29	2.34	4.58	1.43	135.11	Low
	S25	95.11	1.00	4.72	1.98	3.99	1.14	107.94	Low
0.05–0.25	CK	84.08	1.17	6.61	2.46	3.40	0.68	98.40	Low
	S5	35.48	0.38	2.02	0.86	1.10	0.33	40.17	Low
	S15	174.81	1.72	8.92	4.32	5.15	1.48	196.40	Moderate
	S25	133.88	1.35	7.70	3.39	3.67	1.24	151.23	Moderate
≤ 0.05	CK	104.03	1.33	9.07	3.77	3.86	0.76	122.82	Low
	S5	177.02	1.70	10.32	5.01	4.79	1.62	200.46	Moderate
	S15	181.06	1.72	10.38	4.97	4.82	1.63	204.58	Moderate
	S25	177.13	1.72	10.99	5.00	4.98	1.65	201.47	Moderate

Table 1. The potential ecological risks of HMs in sediment of the four particle sizes on different slopes in the simulated rainfall experiment. Data in the table are the average of three replicates. CK: Slope 15° + no SS application, S5: Slope 5° + SS application, S15: Slope 15° + SS application, and S25: slope 25° + SS application. E_r was classified as follows: low < 40; 40 ≤ moderate < 80; 80 ≤ considerable < 160; and 160 ≤ high < 320. RI was classified as follows: low risk < 150; 150 ≤ moderate risks < 300; 300 ≤ considerable risks < 600; and high risk ≥ 600.

similar for the 10 natural rainfall events. These findings suggest that surface runoff yield in natural systems is strongly affected by season and the amount of rainfall. We found that the interflow yield was highest in the S5 and lowest in S15 in the simulated rainfall experiment. Zhang et al.[25] showed that permeability decreases as the slope increases in an indoor simulated rainfall experiment. Other studies have shown that the soil infiltration rate decreases significantly as the slope increases when the slope is less than 18°. Slope has a weak effect on the infiltration when it is greater than 18°[34]. This is consistent with the findings of Wu et al.[23] showing that there is a critical slope which causes the runoff to reach the maximum. The relationship between slope and infiltration changes as the slope increases[24]. When the slope is 15°, the splashing effect of rainfall on topsoil has a major effect on the physical properties of soil, alters the roughness of topsoil, promotes soil compaction, and reduces the interflow yield. This might also explain why the interflow yield was significantly lower in the S15 treatment than in the S5 and S25 treatments.

Sediment production was lower in the S15 treatment than in the CK in the simulated rainfall experiment. This stems from the fact that the large particles prevent the erosion of SS by runoff because they form a protective layer that prevents the erosion of soil particles by precipitation[35]. The sediment yield increased as the slope increased.

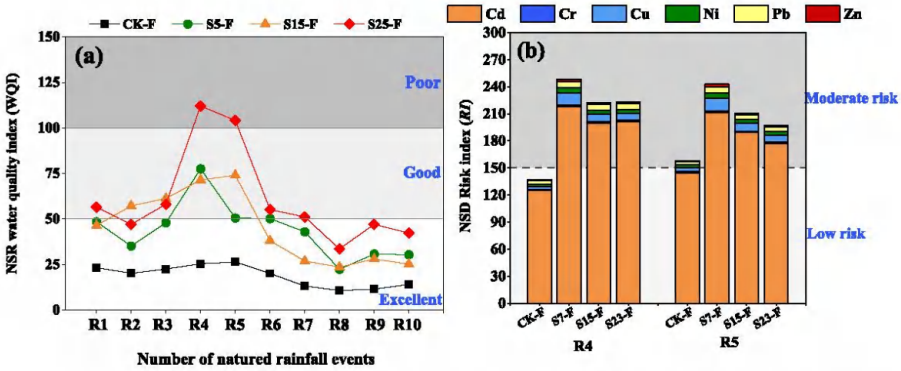


Figure 8. WQI value of surface runoff (NSR) in 10 natural rainfall events (**a**). *RI* value of sediment (NSD) for two natural rainfall events in forest land (**b**). CK-F: Slope 15° + no SS application, S7-F: slope 7° + SS application, S15-F: slope 15° + SS application, and S23: slope 23° + SS application. *RI* can be categorized as follows: low risk < 150; 150 ≤ moderate risks < 300; 300 ≤ considerable risks < 600; and high risk ≥ 600. WQI < 50, 50 ≤ WQI < 100, 100 ≤ WQI < 200, 200 ≤ WQI < 300, and WQI ≥ 300 correspond to excellent, good, poor, extremely poor, and unfit for drinking, respectively.

This might be explained by the small area of rainfall in our experiment; furthermore, the surface water flow velocity and the shear stress increase as the slope increases[36]. However, the retention time of surface water on the slope decreases as the slope increases, which weakens the protective effect of SS on the soil and increases the strength of the splashing effect of rainfall on the topsoil[37]; this results in the activation and transport of more soil particles. However, the sediment yield was 255.92% and 258.82% lower in the S5 treatment than in the S15 and S25 treatments, respectively. Wang et al.[38] found that surface runoff flow is unable to carry or separate sediments with larger grain sizes on low slopes, and this results in a drastic decrease in sediment yield. This can be explained by the fact that large particle sizes experience greater resistance in raindrops and surface flow, which inhibits their removal. Specifically, the sediment yield first increased and then decreased, suggesting that transport-limited erosion was the dominant erosion process in the early rainfall events[39]. The effect of raindrops on flow transport might also contribute to the mechanism restricting sediment transport[27]. As the number of rainfall events increased, segregation-limited erosion became the dominant erosion process. These results are consistent with those of Ran et al. [40] and Shi et al.[27]. We found that patterns of variation in sediment and surface runoff yield were similar in the natural rainfall and simulated indoor rainfall experiments, and both sediment and surface runoff yield increased as the slope increased. Large sediment particles cannot be activated when the intensity of rainfall is low because of the weak driving force[38].

Organic matter plays a pivotal role in the soil's capacity to adsorb HMs[41]. Functional groups of organic matter, such as carboxylic (–COOH) and hydroxyl (–OH) groups, have the ability to form complexes with metal ions. We found that ROC and LOC were significantly and positively correlated with the total migration of most HMs, except for TCd, which showed no significant correlation with ROC (Table S1). This discrepancy can be attributed differences among HMs in their ability to bind organic matter. Relevant studies show that Cd^{2+} has a low affinity for organic compounds. Cu^{2+} is more easily combined with organic matter[42,43]. Additionally, the distinct adsorption kinetics of Cu and Zn imply that Cu is more prone to forming complexes with organic matter, leading to slower adsorption rates and rapid release rates for Zn[43], potentially explaining the higher migration rates of Zn in runoff. We also found a weak correlation between pH and total HM migration. Most studies have shown that under high pH conditions, HMs are easy to form complexes with iron, manganese and hydroxide, precipitate or migrate with the adsorption of sediment particles. Under low pH conditions, they are more likely to be desorbed and dissolved in soil solution, enter and migrate with surface runoff[44,45]. However, these studies mainly discussed the effect of pH on the metal form or the migration of HMs in different pathways, and did not discuss the change of the total amount of HMs in surface runoff, interflow and sediment under varying pH. It is a well-established fact that pH and EC are negatively correlated[44]. When soil permeability is high, the EC value also increases. During this time, the oxidation reaction is the primary process, resulting in a decrease in the H^+ content, an increase in negative charge, and the adsorption of cations. When EC is low, soil permeability is poor. As a result, the mobility of cations is enhanced. This may also be the reason why TCr, TNi and TZn are significantly correlated with EC, while TCd, TCu and TPb are not significantly correlated with EC. Relevant studies have shown that the adsorption and desorption behavior of HMs in soil varies according to their different properties[46–48]. Zn and Ni mainly exist in the reducible component, Cu mainly exists in the oxidizable component, and Pb mainly exists in the residual component[49]. In addition, the migration of Cr and Pb through intercurrent is significantly lower than that through surface runoff. This may be related to the fraction distribution of Cr and Pb in SS, because the more stable metals in SS are difficult to remove by rainfall.

HMs in surface soils are mainly present in granular form during erosion, and the amount of migration is positively related to the slope[37]. As the slope increased, more sediment particles were entrained and washed away

in the runoff, which led to an increase in the cumulative migration of HMs in the sediments. The cumulative amount of HM migration in the sediments accounted for more than 65% of the total amount of HM migration, indicating that sediment was the main pathway of HM migration; this is consistent with the findings of Galdos et al.[20] and Huang et al.[50]. Although the total amount of each HM transported in both pathways (surface runoff and sediment) increased as the slope increased, the percentage of each HM in sediment and surface runoff decreased and increased, respectively; this finding was inconsistent with the results of the indoor simulated rainfall experiment. Rainfall events in forests typically last for several hours or even days; consequently, the surface soil in the natural rainfall experiment could have been saturated, which would increase the release of HMs via surface runoff. In addition, the splashing of raindrops has been shown to increase the dispersion and transport of soil particles by breaking up and moving aggregates and disrupting soil structure[51]. The presence of a forest canopy in forested areas mitigates the erosion of soil particles by the splashing of raindrops, which slows the transport of HMs via sediments.

We found that the risks of HM contamination in surface runoff water were higher when SS was applied compared with the CK; this is consistent with the results of most studies[13]. Furthermore, the water quality in surface runoff from the CK and S5 treatment was "excellent" during the 10 rainfall events, and there was virtually no risk of contamination in surface runoff on lower slopes. The WQI in the S15 and S25 treatments was "good" for most rainfall events, and only poor for the fourth rainfall event in the S25 treatment. This suggests that the risk of surface runoff pollution increases as the slope increases; overall, there was no risk of surface runoff water pollution. No significant change was observed in the risk of surface runoff water pollution as the number of rainfall events increased. Previous studies have shown that the application of sludge will lead to HMS pollution levels in farmland runoff exceeding Class IV water quality standards of China's Surface Water Environmental Quality Standards[20]. This difference might stem from variation in the soil and SS used in the different experiments. Another study has shown that the risk of HM transport is significantly increased in sandy soils[52], and the risk of HM transport is reduced in lateritic soils rich in iron and aluminium oxides. We found that the pollution risk of surface runoff increased as the slope increased for 10 natural rainfall events, and the WQI was "poor" only in R4 and R5 of the S25 treatment; this was consistent with the results of the indoor simulated rainfall experiment.

Sediment was the main pathway of HM transport, and the magnitude of HM loss was an order of magnitude greater via sediment than via surface runoff and interflow. Previous studies have shown that the adsorption/desorption capacities of aggregates might vary for different particle sizes because of differences in soil physicochemical properties[50]. The E_r values of all HM elements were "low," with the exception of that for Cd. In the indoor simulated rainfall experiment, the contribution of Cd to *RI* was 75% or more in all treatments. Other studies have also found Cd to be the main element contributing to ecological risks, and this might stem from the fact that it has the highest toxicity response factor among all metals tested[1,2,53]. The risk of sediment contamination was highest for two particle sizes: 0.05–0.25 mm and ≤ 0.05 mm. Previous studies have shown that fine particles typically have a higher surface area and pore volume compared with large particles, and this promotes the strong adsorption of HMs. Fine particles can be easily mobilized by water flow, and the transport of larger particles (> 0.25 mm) can only be initiated at higher flow rates[54]. Nevertheless, sediment was the main pathway for the migration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn, and the migration of these HMs via sediment was an order of magnitude greater than that via surface runoff. Under laboratory conditions, predictions of HM transport from simulated rainfall experiments can lead to a range of conclusions based on the assumptions made[55]. However, the environmental complexity and variability of forests cannot be easily accounted for in indoor experiments. The results of the simulated and natural rainfall experiments were not completely consistent for different slopes. Thus, achieving an improved understanding of variation in HMs and their bioavailability in woodlands will require comparisons of the results of laboratory and field studies; these studies will also enhance our ability to investigate the mobility of HMs in natural woodlands using laboratory simulation experiments[56].

Conclusions

Slope had a significant effect on the runoff and sediment yield. Surface runoff and sediment yields increased as the slope increased in the simulated rainfall experiment. A similar pattern was observed in the natural rainfall experiment, as the surface runoff and sediment yield also increased with slope. Sediment was the main pathway for HM migration in all treatments, and more than 68.70% of the total migration of Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn was via sediment. The application of suitable amounts of SS on lower slopes (5°) reduced runoff and soil erosion and did not significantly contribute to the risk of HM contamination in the simulated rainfall experiment. In the simulated rainfall experiment, the risk of contamination was only observed for sediments with a grain size ≤ 0.25 mm. Our findings revealed significant effects of slope on the risk of HM migration following SS application on forest land. However, more studies are needed to clarify the factors driving differences in the results of simulated and natural rainfall experiments, as well as their underlying mechanisms, in planted forests in the future due to the high complexity of the hydrological and surface soil conditions in the field.

Methods

SS and soil properties

SS was obtained from Guangzhou Water Purification Co., Ltd. in Guangdong Province, China. The water content of the treated SS was approximately 40%, and the HM content of the SS was high. SS was anaerobically composted for 60 d prior to its use. The SS was then air-dried, sieved through a 10 mm nylon sieve, and thoroughly mixed. The soil was collected from the Eucalyptus forest in Dalingshan Forest Park, Dongguan City, Guangdong Province, China (22°51′18.99″N, 113°45′22.44″E). The study area has a typical subtropical monsoon climate, with an average annual temperature of 23.3 °C and annual precipitation of 2042.6 mm. The soil is granite red

soil and has a sandy loam texture (56.7% sand, 27.7% silt, and 15.6% clay). In November 2020, soil samples were collected from the 0–10 cm, 10–20 cm, and 20–30 cm layers. In the laboratory, soils were sampled using a ring knife, and the bulk weight was measured. The soils were air-dried at room temperature for two weeks, passed through a 10 mm nylon sieve, and mixed thoroughly. The soil and SS samples were then ground and sieved (<0.15 mm), and the content of organic matter, Cd, chromium (Cr), Cu, Ni, Pb, and Zn, as well as the pH were measured (Table S2).

Experimental design of the indoor rainfall simulations

The steel flumes comprise a steel tank and plastic external baffles. They were rectangular and had the following dimensions: 1.0 m × 0.3 m × 0.4 m. The length of the flumes of the soil tank was adjusted for different slopes. The internal part of the steel flumes comprised the soil sample receiving space with a base area of 0.3 m^2 (1.0 m × 0.3 m) and a depth of 0.4 m. Plastic baffles (height of 0.3 m) were fitted around and on top of the steel flumes to prevent soil and water spillage. The bottom of the steel flumes was sealed with a PVC sheet, and the remaining small holes allowed the interflow to drain. The bottom was lined with quartz sand with a thickness of 3 cm, and it was washed with dilute nitric acid and lined with a 100-mesh screen. A V-shaped water-measuring weir was installed at the lower end of the rack to convey surface runoff water through a plastic pipe to a plastic collection bucket. The slope of the rack could be adjusted from 0° to 30°. To enhance the realism of the rainfall simulations, a 2 cm seepage space was installed at the bottom of the steel rack. The soil was raised 2 cm using a plastic mat. The interflow that drained from the soil and flumes was collected and placed at the bottom of the steel rack (Fig. S1).

Simulated rainfall was used to evaluate the effect of slope on soil erosion and the migration of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn in surface runoff, interflow, and sediments. The experiment comprised four treatments, S5, S15, and S25 (in which SS was applied and the slope of the soil flume was 5°, 15°, and 25°, respectively) and CK (in which no SS was applied and the slope of the soil flume was 15°) (Table S3). Given that the slope altered the contact area between precipitation and the surface of soil troughs, 1.80 kg, 1.87 kg, and 1.98 kg of SS were applied in the S5, S15, and S25 treatments,which corresponds to 60 tons ha^{-1}. The SS was thoroughly mixed with the surface soil in the 0–10 cm layer (Table S3). Each treatment has three replicates. The simulated rainfall water was municipal tap water. The chemical properties of the water were as follows: pH 7.4; Cd < 4 μg L^{-1}; Cr < 4 μg L^{-1}; Cu < 9 μg L^{-1}; Pb < 0.07 μg L^{-1}; and Zn < 1 μg L^{-1}. The simulated rainfall experiment was performed in the simulated rainfall hall of the Red Soil Erosion and Flow Hydraulics Laboratory, Institute of Ecology, Environment and Soil, Guangdong Academy of Sciences, China. The rainfall system was comprised of a variable power pump (0–60 W with a water volume of 0–5 L min^{-1}) and a water tank (1.2 m × 0.4 m × 0.12 m) with 150 holes (0.8 mm diameter) at the bottom. Water was pumped into the tank and dripped down through the holes at the bottom of the tank to form continuous and steady rainfall. The rainfall intensity was set to 120 mm h^{-1} to simulate heavy rainfall and severe soil erosion, which is consistent with the typical climatic characteristics of South China. Before the formal rainfall experiment, the rainfall intensity was adjusted to rainfall uniformity > 95%. A total of 10 simulated rainfall events were performed over a two-week interval between each rainfall event. The duration of each rainfall event was 60 min, and the total rainfall of the 10 simulations was equivalent to 3/4 of the rainfall in Guangzhou. The simulated rainfall experiment was initiated in March 2022 and ended in December 2022. The simulated rainfall experiment was carried out for two weeks, and there was a two-week interval between each rainfall event.

Design of the natural rainfall experiment

The study was conducted in a Eucalyptus plantation in Dalingshan Forest Park, Dongguan City, Guangdong Province, China. The Eucalyptus forest was planted in 1998 with a row spacing of 3 m × 2 m. The runoff plots were arranged according to the actual contours of the site, and the woodland slopes ranged from 5° to 30°. The runoff plots were sloping woodlands with similar characteristics except slope to ensure that rainfall conditions were consistent among plots. Each runoff plot has a horizontal projected area of 20 m^2 (10 m × 2 m) in the direction of the slope. At the lower end of the runoff plot, there was a collection pond measuring 1 m × 1 m × 1 m, which was connected to the runoff plot. The pond was elevated 20 cm above the ground and covered with PVC plastic sheets to prevent rainwater from entering (Fig. S2).

The natural rainfall experiment was comprised of four treatments, S7-F, S15-F, and S23-F (SS was applied and their slopes were 7°, 15°, and 23°, respectively) and CK-F (in which the slope was 15°, and no SS was applied) (Table S3). Each treatment had three replicates. The amount of rainfall of the 10 natural rainfall events in the woodland and the amount of rainfall during the 48 h prior to sampling are shown in Fig. S3.

Sample collection and analysis

In the indoor rainfall simulations, surface runoff and interflow were collected using two containers. Only surface runoff was collected in the natural rainfall experiment. When the surface runoff or interflow stopped, measurements were taken. After the collection containers were left to stand for 30 min, the suspensions were collected individually into 200 mL plastic bottles, and 1 mL of 1:10 nitric acid solution was added to inhibit microbial activity and prevent the precipitation of HM ions. The processed samples were stored at 4 °C. Using the wet sieving method, sediments precipitated in runoff collection containers during natural and simulated rainfall events were filtered and classified into four different types of agglomerates with different particle sizes: > 1 mm (large macro-aggregates), 1–0.25 mm (small macro-aggregates), 0.25–0.05 mm (large micro-aggregates), and < 0.05 mm (small micro-aggregates)[50,57]. Because the amount of sediment produced by the 10th rainfall was very small, the collection of particle size sediment samples was not carried out, and a total of 9 runoff sediment samples were collected in the simulative rainfall experiment. Sediment samples were only washed out and collected during the 4th and 5th natural rainfall experiment. Half of the agglomerates were dried, weighed, and

milled separately, and the other half was mixed. Surface runoff, interflow, and sediment samples were digested using the triple-acid method (nitric-hydrofluoric-perchloric acid), and a plasma atomic emission spectrometer (Leeman Prodigy7 model) was used to determine the concentrations of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn.

Calculation of indicators

Three indicators, surface runoff yield (L), interflow yield (L), and sediment yield (g), were used to evaluate the effects of different slopes on runoff and soil erosion. Cumulative lift volume (CLV) was used to evaluate the transport of HMs via three pathways, surface runoff, interflow, and sediment, for all rainfall events. CLV was calculated using Eqs. (1) and (2).

$$\mathrm{LV} = \mathrm{SSR\,(NSR/SSL/NSL/SSD/NSD)} \times \mathrm{N} \tag{1}$$

$$\mathrm{CLV}_n = \mathrm{LV}_1 + \mathrm{LV}_2 \cdots + \mathrm{LV}_n \tag{2}$$

where N is the concentration of HMs in surface runoff, interflow, or sediments, which is multiplied by the surface runoff yield (SSR/NSR), interflow yield (SSL/NSL), or sediment yield (SSD/NSD), respectively, for each simulated or natural rainfall event. These values were used to calculate the amount of HM migration via the corresponding pathways (LV). CLV*n* was the cumulative migration of HMs in surface runoff, interflow, and sediments during 1st ~ nth rainfall events.

The water quality index (WQI) describes water quality via several water quality parameters[58]. We used WQI to evaluate the risk of HM pollution in surface runoff and interflow. WQI was calculated using the following formula:

$$WQI = \sum \left[W_i \times \left(\frac{C_i}{S_i} \right) \right] \times 100 \tag{3}$$

In the WQI formula, $W_i = w_i / \sum w_i$, where W_i is the weight of each HM, and $\sum w_i$ is the sum of the weights of all HMs. The weights of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn were defined as 5, 5, 2, 4, 5, and 1, respectively, following a previous study[59]. C_i corresponds to HM concentrations, and S_i indicates the Chinese drinking water standard[12]. WQI was classified as excellent (WQI < 50), good (50 ≤ WQI < 100), poor (100 ≤ WQI < 200), very poor (200 ≤ WQI < 300), and unfit for drinking (WQI ≥ 300)[59].

The potential ecological risk index (*RI*) was used to evaluate the ecological risk level of HMs in soil and evaluate the combined toxicity of HMs[60]. *RI* can be calculated using Eqs. (4) and (5);

$$E_i = T_i \times \frac{C_i}{C_0} \tag{4}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{n} E_i \tag{5}$$

where E_i is the risk factor for the given HM; T_i is the toxicity response factor for the given pollutant (T_i for Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and Zn was defined as 30, 2, 5, 5, 5, and 1, respectively); C_i is the concentration of each HM in the soil, and C_0 is the background concentration of HMs in the study area. Chu et al.[11] found that the background concentrations of Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, and Ni in Guangzhou were 28.7, 77.8, 57.6, 0.13, 87.0, and 23.5 mg kg^{-1}, respectively. Values of E_i were classified as follows: low < 40; 40 ≤ moderate < 80; 80 ≤ considerable < 160; and 160 ≤ high < 320. Values of *RI* were classified as follows: low risk < 150; 150 ≤ moderate risk < 300; 300 ≤ considerable risk < 600; and high risk ≥ 600.

Statistical analysis

SPSS 19.0 (SPSS Inc., USA) was used to conduct all statistical analyses. One-way analysis of variance, followed by Duncan's test, was used to evaluate the significance of differences among treatments ($p < 0.05$). Origin Pro 2019 software (Origin Lab Corporation, Northampton, MA) was used to make plots.

Data availability

The data that support the findings of this study is provided within the manuscript or supplementary information files.

Received: 9 February 2024; Accepted: 5 June 2024
Published online: 12 June 2024

References

1. Li, Z. W., Yu, D., Liu, X. J. & Wang, Y. The fate of heavy metals and risk assessment of heavy metal in pyrolysis coupling with acid washing treatment for sewage sludge. *Toxics*. **11**, 16. https://doi.org/10.3390/toxics11050447 (2023).
2. Yang, Y. T. *et al.* Effects of sewage sludge application methods on the transport of heavy metals with runoff and their mechanisms. *Sci. Total. Environ.* **912**, 168909. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168909 (2023).
3. Pan, D. L., Jiang, W. T., Guo, R. T., Huang, Y. & Pan, W. G. Thermogravimetric and kinetic analysis of co-combustion of waste tires and coal blends. *ACS Omega*. **6**, 5479–5484. https://doi.org/10.1021/acsomega.0c05768 (2021).
4. Ouyang, W. *et al.* Occurrence, transportation, and distribution difference of typical herbicides from estuary to bay. *Environ. Int.* **130**, 104858. https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.052 (2019).

5. Jiří, B. *et al.* The impact of the long-term application of mineral nitrogen and sewage sludge fertilizers on the quality of soil organic matter. *Chem. Biol. Technol. Agric.* **1**, 330–338. https://doi.org/10.1186/s40538-022-00353-9 (2022).
6. Katarzyna, C. *et al.* Management of biological sewage sludge: Fertilizer nitrogen recovery as the solution to fertilizer crisis. *J. Environ. Manage.* **326**, 1–7. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116602 (2023).
7. Hoang, S. A. *et al.* Treatment processes to eliminate potential environmental hazards and restore agronomic value of sewage sludge: A review. *Environ. Pollut.* **293**, 18. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118564 (2022).
8. Radu, B., Daniel, D., Mihai, H. & Florin, S. The potential of pig sludge fertilizer for some pasture agricultural lands' improvement: Case study in Timiș County, Romania. *Agronomy.* **3**, 23–36. https://doi.org/10.3390/agronomy12030701 (2022).
9. Chu, S. S. *et al.* Municipal sewage sludge compost promotes *Mangifera persiciforma* tree growth with no risk of heavy metal contamination of soil. *Sci. Rep.* **7**, 13408. https://doi.org/10.1038/s41598-017-13895-y (2017).
10. Chu, S. S. *et al.* Effects of landscape plant species and concentration of sewage sludge compost on plant growth, nutrient uptake, and heavy metal removal. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **25**, 35184–35199. https://doi.org/10.1007/s11356-018-3416-x (2018).
11. Chu, S. S. *et al.* Changes in potentially toxic element concentration and potential ecological risk in topsoil caused by sewage sludge application on forestland: A 3-year field trial. *For. Ecol. Manag.* **500**, 119657. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.119657 (2021).
12. Chu, S. S. *et al.* Combined addition of bagasse and zeolite stabilizes potentially toxic elements in sewage sludge compost and improves *Eucalyptus urophylla* seedling growth. *For. Ecol. Manage.* **539**, 121003. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121003 (2023).
13. Leila, S. *et al.* Fertilization value of municipal sewage sludge for *Eucalyptus camaldulensis* plants. *Biotechnol. Rep.* **13**, 8–12. https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.001 (2017).
14. Wu, B., Qi, S., Hu, Y., Li, Y. & Zhou, J. Woodland for sludge disposal in Beijing: Sustainable?. *Sustainability.* **14**, 7444. https://doi.org/10.3390/su14127444 (2022).
15. Ouyang, W. *et al.* Watershed soil Cd loss after long-term agricultural practice and biochar amendment under four rainfall levels. *Water Res.* **122**, 692–700. https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.06.084 (2017).
16. Zhang, H. *et al.* Microwave-assisted pyrolysis of textile dyeing sludge, and migration and distribution of heavy metals. *J. Hazard. Mater.* **1**, 128–135. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.04.080 (2018).
17. Robert, K., Jolanta, L. & Jarosław, G. Risk analysis of heavy metal accumulation from sewage sludge of selected wastewater treatment plants in Poland. *Water.* **15**, 2060–2070. https://doi.org/10.3390/w13152070 (2021).
18. Daulta, R., Prakash, M. & Goyal, S. Metal content in soils of northern india and crop response: A review. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* **20**, 4521–4548. https://doi.org/10.1007/s13762-022-03953-y (2022).
19. Debosz, K., Petersen, S. O., Kure, L. K. & Ambus, P. Evaluating effects of sewage sludge and household compost on soil physical, chemical and microbiological properties. *Appl. Soil Ecol.* **19**, 237–248. https://doi.org/10.1016/s0929-1393(01)00191-3 (2002).
20. Galdos, M. V., De Maria, I. C., Camargo, O. A. & Dechen, S. C. F. Sewage sludge application on cultivated soils: Effects on runoff and trace metal load. *Sci. Agric.* **66**, 368–376. https://doi.org/10.1590/s0103-90162009000300012 (2009).
21. Taye, G., Poesen, J. & Wesemael, B. V. Effects of land use, slope gradient, and soil and water conservation structures on runoff and soil loss in semiarid Northern Ethiopia. *Phys. Geol.* **34**, 236–259. https://doi.org/10.1080/02723646.2013.832098 (2013).
22. Guo, M. M. *et al.* Revegetation induced change in soil erodibility as influenced by slope situation on the Loess Plateau. *Sci. Total Environ.* **10**, 145540. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145540 (2021).
23. Wu, L., Peng, M. L., Qiao, S. S. & Ma, X. Y. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield characteristics of bare loess soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **25**, 3480–3487. https://doi.org/10.1007/s11356-017-0713-8 (2018).
24. Mamedov, A. I. *et al.* Amending soil with sludge, manure, humic acid, orthophosphate and phytic acid: Effects on aggregate stability. *Soil Res.* **52**, 317–326. https://doi.org/10.1071/sr13334 (2014).
25. Zhang, X. Y., Zhu, Q. D., Sang, J. & Ding, X. W. Effects of rainfall and the slope gradient on the soil and water loss in a purple soil area. *Soil Water Res.* **17**, 232–242. https://doi.org/10.17221/45/2022-SWR (2022).
26. Zhang, S. H., Li, Y. Q., Fan, W. W. & Yi, Y. J. Impacts of rainfall, soil type, and land-use change on soil erosion in the Liusha River watershed. *J. Hydrol. Eng.* **22**, 04016062. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001479 (2016).
27. Shi, Z. H. *et al.* Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes. *J. Hydrol.* **454**, 123–130. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.06.004 (2012).
28. Li, X. H., Zhang, Z. Y., Yang, J., Zhang, G. H. & Wang, B. Effects of Bahia grass cover and mulch on runoff and sediment yield of sloping red soil in southern China. *Pedosphere.* **21**, 238–243. https://doi.org/10.1016/s1002-0160(11)60123-9 (2011).
29. Wang, S. *et al.* Characteristics of nitrogen loss in sloping farmland with purple soil in southwestern China during maize (*Zea mays* L.) growth stages. *Catena.* **182**, 8. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104169 (2019).
30. Wang, S. *et al.* Simulation study on risk and influencing factors of cadmium loss in contaminated soil. *Sustainability.* **15**, 1553. https://doi.org/10.3390/su15021553 (2023).
31. Cui, H. B. *et al.* Stability and heavy metal distribution of soil aggregates affected by application of apatite, lime, and charcoal. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23**, 10808–10817. https://doi.org/10.1007/s11356-016-6271-7 (2016).
32. Chu, S. S. *et al.* Changes in soil properties under *Eucalyptus* relative to *Pinus massoniana* and natural broadleaved forests in South China. *J. For. Res.* **5**, 1299–1306. https://doi.org/10.1007/s11676-017-0546-9 (2018).
33. Chu, S. S. *et al.* Effects of enriched planting of native tree species on surface water flow, sediment, and nutrient losses in a *Eucalyptus* plantation forest in southern China. *Sci. Total Environ.* **675**, 224–234. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.214 (2019).
34. Cheng, Q. J., Ma, W. J. & Cai, Q. G. The relative importance of soil crust and slope angle in runoff and soil loss: A case study in the hilly areas of the Loess Plateau, North China. *GeoJournal.* **71**, 117–125. https://doi.org/10.1007/s10708-008-9149-5 (2008).
35. Zhao, L. S. & Hou, R. Effects of collection time intervals of surface runoff and sediment on soil erosion analysis during rainfall. *Catena.* **165**, 201–206. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.003 (2018).
36. Defersha, M. B. & Melesse, A. M. Effect of rainfall intensity, slope and antecedent moisture content on sediment concentration and sediment enrichment ratio. *Catena.* **90**, 47–52. https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.11.002 (2012).
37. Zhao, Q. H. *et al.* Effects of rainfall intensity slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.* **29**, 609–621. https://doi.org/10.1007/s00477-014-0896-1 (2015).
38. Wang, L. *et al.* Effects of the rainfall intensity and slope gradient on soil erosion and nitrogen loss on the sloping fields of miyun reservoir. *Plants.* **12**, 423. https://doi.org/10.3390/plants12030423 (2023).
39. Donjadee, S. & Chinnarasri, C. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the application of vetiver grass mulch in soil and water conservation. *Int. J. Sediment. Res.* **27**, 168–177. https://doi.org/10.1016/S1001-6279(12)60025-0 (2012).
40. Ran, Q. H., Su, D. Y., Li, P. & He, Z. G. Experimental study of the impact of rainfall characteristics on runoff generation and soil erosion. *J. Hydrol.* **424**, 99–111. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.12.035 (2012).
41. Silveira, M. L. A., Alleoni, L. R. F. & Guilherme, L. R. G. Biosolids and heavy metals in soils. *Sci. Agric.* **60**, 793–806. https://doi.org/10.1590/S0103-90162003000400029 (2003).
42. Park, J. H. *et al.* Role of organic amendments on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. *J. Hazard. Mater.* **185**, 549–574. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.09.082 (2011).
43. Shi, Z., Di Toro, D. M., Allen, H. E. & Sparks, D. L. A general model for kinetics of heavy metal adsorption and desorption on soils. *Environ. Sci. Technol.* **47**, 3761–3767. https://doi.org/10.1021/es304524p (2013).
44. Almutairi, F. M., Williams, P. M. & Lovitt, R. W. Effect of membrane surface charge on filtration of heavy metal ions in the presence and absence of polyethylenimine. *Desalin. Water Treat.* **42**, 131–137. https://doi.org/10.5004/dwt.2012.2469 (2012).

45. Ahmad, M. *et al.* An assessment of the utilization of waste resources for the immobilization of Pb and Cu in the soil from a Korean military shooting range. *Environ. Earth Sci.* **67**, 1023–1031. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1550-1 (2012).
46. Acosta, J. A., Faz, A., Kalbitz, K., Jansen, B. & Martinez-Martinez, S. Partitioning of heavy metals over different chemical fraction in street dust of Murcia (Spain) as a basis for risk assessment. *J. Geochem. Explor.* **144**, 298–305. https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014 (2014).
47. Yang, H. L., He, M. C. & Wang, X. Q. Concentration and speciation of antimony and arsenic in soil profiles around the world's largest antimony metallurgical area in China. *Environ. Geochem. Health.* **37**, 21–33. https://doi.org/10.1007/s10653-014-9627-2 (2015).
48. Tang, J. *et al.* Physicochemical properties and heavy metal pollution characteristics and correlation analysis of sludge landfill. *Int. J. Environ. Anal. Chem.* **1**, 1–13. https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1943375 (2021).
49. Guo, H. Y. *et al.* Speciation transformation and bioavailability of heavy metals during biogas production from coal slime. *Biochem. Eng. J.* **176**, 108208. https://doi.org/10.1016/j.bej.2021.108208 (2021).
50. Huang, B. *et al.* Loss characteristics of Cd in soil aggregates under simulated rainfall conditions. *Sci. Total Environ.* **650**, 313–320. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.327 (2019).
51. Martinez-Mena, M., Castillo, V. & Albaladejo, J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain. *Geomorphology.* **45**, 261–275. https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00158-1 (2002).
52. Brazauskiene, D. M., Paulauskas, V. & Sabiene, N. Speciation of Zn, Cu, and Pb in the soil depending on soil texture and fertilization with sewage sludge compost. *J. Soils Sediments.* **8**, 184–192. https://doi.org/10.1007/s11368-008-0004-6 (2008).
53. Zuo, W. G. *et al.* Sustained effects of one-time sewage sludge addition on rice yield and heavy metals accumulation in salt-affected mudflat soil. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **28**, 7476–7490. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11115-1 (2021).
54. Tansel, B. & Rafiuddin, S. Heavy metal content in relation to particle size and organic content of surficial sediments in Miami River and transport potential. *Int. J. Sediment Res.* **31**, 324–329. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.05.004 (2016).
55. Fang, W., Wei, Y. H. & Liu, J. G. Comparative characterization of sewage sludge compost and soil: Heavy metal leaching characteristics. *J. Hazard. Mater.* **310**, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.02.025 (2016).
56. Fang, W., Delapp, R. C., Kosson, D. S., van der Sloot, H. A. & Liu, J. G. Release of heavy metals during long-term land application of sewage sludge compost: Percolation leaching tests with repeated additions of compost. *Chemosphere.* **169**, 271–280. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.086 (2017).
57. Xiao, R. *et al.* Heavy metal distribution in different soil aggregate size classes from restored brackish marsh, oil exploitation zone, and tidal mud flat of the Yellow River Delta. *J. Soil. Sediment.* **16**, 821–830. https://doi.org/10.1007/s11368-015-1274-4 (2016).
58. Li, M. Z., Hu, Y. J., Zhou, N., Wang, S. R. & Sun, F. F. Hydrothermal treatment coupled with pyrolysis and calcination for stabilization of electroplating sludge: Speciation transformation and environmental risk of heavy metals. *J. Hazard. Mater.* **438**, 9. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129539 (2022).
59. Li, F. Y. *et al.* Leaching experiments and risk assessment to explore the migration and risk of potentially toxic elements in soil from black shale. *Sci. Total Environ.* **844**, 156922. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156922 (2022).
60. Hakanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Res.* **14**, 975–1001. https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8 (1980).

Acknowledgements
This work was supported by the Forestry Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province (2022KJCX015) and the National Natural Science Foundation of China (31971629).

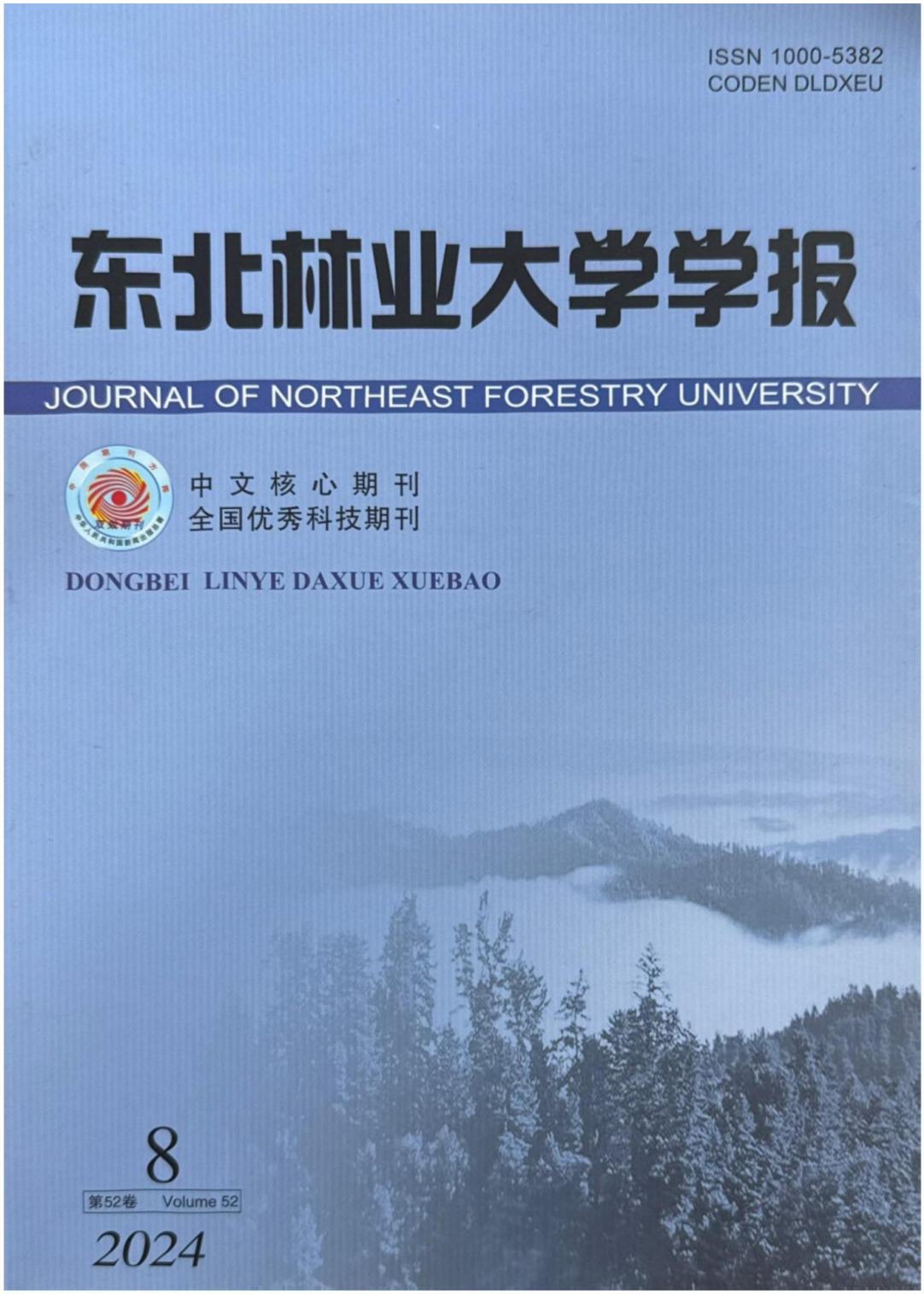
Author contributions
L.H.X. and D.H.L. conceived and designed the experiments, and wrote the first draft of the manuscript. L.H.X. and Y.T.Y. conducted the experiments. L.H.X., D.H.L., J.Y.F. and J.B.F. analyzed the data. Y.T.Y., D.M.W. and S.C.Z. supervised the research and contributed to the discussion of the results. L.H.X. and D.H.L. wrote the manuscript. D.F.J., D.M.W., and S.C.Z. contributed to the guidance of this study and reviewed the manuscript. All authors reviewed the manuscript.

Competing interests
The authors declare no competing interests.

Additional information
Supplementary Information The online version contains supplementary material available at https://doi.org/10.1038/s41598-024-64163-9.

Correspondence and requests for materials should be addressed to S.Z.

2.3.联合运用多光谱和激光雷达技术构建的林分生物量估算模型



东 北 林 业 大 学 学 报

2024 年　　第 52 卷 第 8 期

目　次

英文审校：韩有奇

联合运用多光谱和激光雷达技术构建的林分生物量估算模型[1)]

冼丽铧　朱薪蓉　卢德浩　陈红跃　古德泉
（华南农业大学，广州，510642）

摘　要　以广东省广州市从化石门国家森林公园为研究区域，选择4种不同林分类型（针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林），各林分类型选择3个20 m×20 m地块作为样方；结合激光雷达、多光谱图像、实测数据，构建多元非线性反演模型和多元线性回归模型，估算森林地上生物量，并选择最佳模型进行精度评价。结果表明：①依据多源数据建立的4种不同林分类型的多元非线性地上生物量反演模型的精度最高，针阔混交林样地地上生物量预测值为42.79 t·hm^{-2}、阔叶林样地地上生物量预测值为60.46 t·hm^{-2}、针叶林样地地上生物量预测值为32.99 t·hm^{-2}、竹林样地地上生物量预测值为1.92 t·hm^{-2}。②研究区中4种不同林分类型的多元非线性地上生物量反演模型的拟合精度，由大到小依次为竹林（决定系数为0.919）、阔叶林（决定系数为0.813）、针叶林（决定系数为0.786）、针阔混交林（决定系数为0.713），均符合精度要求。采用多光谱和激光雷达数据结合的方式，能够较精准地提取林分地上生物量信息，可准确估算针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林的地上生物量。

关键词　森林；地上生物量；无人机遥感技术；激光雷达；多光谱
分类号　S758.5

Estimation Models of Forest Stand Biomass Using Combined Multi-Spectral and LiDAR Technologies//Xian Lihua, Zhu Xinrong, Lu Dehao, Chen Hongyue, Gu Dequan(South China Agricultural University, Guangzhou 510642, P. R. China)//Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(8): 85-94.

Investigating from Shimen National Forest Park, Conghua, Guangzhou City, Guangdong Province, four different forest types (mixed coniferous-broadleaved forest, broadleaved forest, coniferous forest, bamboo forest) were selected as study areas. Three 20 m×20 m plots were chosen for each forest type. Integrated with data from LiDAR, multispectral imagery, and field measurements, we developed multivariate nonlinear inversion models and multivariate linear regression models to estimate aboveground biomass. The optimal model was selected based on accuracy assessment. The results showed that: (1) The multivariate nonlinear inversion models based on multisource data achieved the highest accuracy for estimating aboveground biomass across the four forest types: mixed coniferous-broadleaved forest predicted biomass was 42.79 t·hm^{-2}, broadleaved forest was 60.46 t·hm^{-2}, coniferous forest was 32.99 t·hm^{-2}, and bamboo forest was 1.92 t·hm^{-2}. (2) Among the four forest types, the multivariate nonlinear inversion models showed decreasing fitting accuracy as follows: bamboo forest (R^2=0.919), broadleaved forest (R^2=0.813), coniferous forest (R^2=0.786), and mixed coniferous-broadleaved forest (R^2=0.713), all meeting accuracy requirements. Integrating multispectral and LiDAR data provided a more precise means to extract aboveground biomass information, facilitating accurate estimation across mixed coniferous-broadleaved, broadleaved, coniferous, and bamboo forests.

Keywords　Forest; Above-ground biomass; UAV remote sensing technology; LiDAR; Multi-spectral

DOI:10.13759/j.cnki.dlxb.2024.08.010

随着全球变暖和温室效应的加剧，碳循环已成为全球气候变化研究的热点[1]，而森林作为陆地生态系统中最大的碳库，储存了80%以上的碳[2]。森林地上生物量代表森林地上部分实存生活的有机物质，不仅是反映群落生态优势的指标之一，还是森林生态系统结构优劣和功能高低的最直接表现，是测量碳的关键生物物理参数[3]。因此，了解森林地上生物量在碳循环和气候变化中的作用至关重要。

传统的森林地上生物量的获取途径，主要是通过人工实地调查获取树高、胸径等林分信息，如角规样地调查法、标准地法、全林每木检尺法等，存在监测不及时、耗时长、人力物力消耗量大等现象[4]。因此，如何提高森林地上生物量的估测精度，仍然是一个较为热门的研究领域[5]。遥感可以提供大范围内准确、快速的植被覆盖信息，目前被广泛用于估算森林冠层结构和地上生物量[6]。无人机遥感技术为遥感技术的一种，在利用无人机获取的林分资源信息应用方面，许多研究集中在树种识别、林木冠幅测定、树高测定、病虫害监测等方面[7-9]。多光谱图像生成的植被指数，可用于估算森林的冠层结构和生物量[10]。但是，光学图像无法穿透冠层并提供有关森林垂直结构的信息，这可能导致在冠层密集地区的估算结果不确定[11-12]。激光雷达（LiDAR）的光探测与测距，可以快速准确地获取植被的三维信息、森林冠层表面的水平和垂直结构信息[13]，克服了光学遥感饱和问题，其发射的激光束可以穿透

1）广东省林业科技创新项目（2023KJCX001）、广东省林业局项目（4400-F21095）。
第一作者简介：冼丽铧，女，1987年7月生，华南农业大学林学与风景园林学院，实验师。E-mail：xianlihua@scau.edu.cn。
通信作者：古德泉，华南农业大学林学与风景园林学院，讲师。E-mail：373705106@qq.com。
收稿日期：2024年1月8日。
责任编辑：潘　华。

森林冠层;获取的点云可用于准确估算树高、胸径、冠层大小等结构属性[14-15];因此被广泛用于估算森林地上生物量。这些激光雷达衍生的结构属性,可以与野外测量一起使用,通过不同的模型估测森林地上生物量。Lu et al.[16]利用LiDAR数据提取单个树的结构参数,并将其输入各向异性生长模型,获得样本尺度的森林地上生物量;陈中超等[17]使用多元回归模型估测森林地上生物量,发现非线性模型的精度优于线性模型。还有一些研究,运用单一技术对林分生物量进行提取,但是存在一定的局限性。其中单一机载激光雷达技术对单木穿透力强,但存在对树种光谱识别能力不足、空间不连续、运行周期短的现象;而单一多光谱技术虽对单木穿透力弱,但可获取连续光谱数据的特点,可补充部分激光雷达未获取到的树冠空间[18-20]。为探究各单一技术和综合两种技术对林分生物量估算的效果、将森林结构特性和光谱信息结合起来开发新的森林地上生物量的估测方法,本研究以广东省广州市从化石门国家森林公园为研究区域,选择4种不同林分类型(针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林),结合激光雷达、多光谱图像、实测数据,构建多元非线性反演模型和多元线性回归模型,估算森林地上生物量,并选择最佳模型进行精度评价。旨在为快速、准确地估算森林地上生物量并实现动态监测提供参考。

1 研究区概况

试验区位于广东省广州市从化石门国家森林公园(地理中心坐标:23°36′50″N、113°46′16″E),总面积为2 636 hm^2。示范区地处亚热带,终年气候温暖,年均气温21.4 ℃。本研究样地选择公益林示范区有代表性的4种不同林分类型的小班(见图1),分别是林茶18小班针阔叶混交林、林茶3小班枫香林、石灶竹林、石门景区杉木林,其郁闭度在0.7~0.8,都为中龄林。林茶18小班针阔叶混交林树种,包括杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、木荷(*Schima superba*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、罗浮柿(*Diospyros morrisiana*)、华润楠(*Machilus chinensis*);林茶3小班枫香林树种为枫香(*Liquidambar formosana*);石灶竹林树种为毛竹(*Phyllostachys edulis*);石门景区杉木林树种为杉木(*Cunninghamia lanceolata*)。

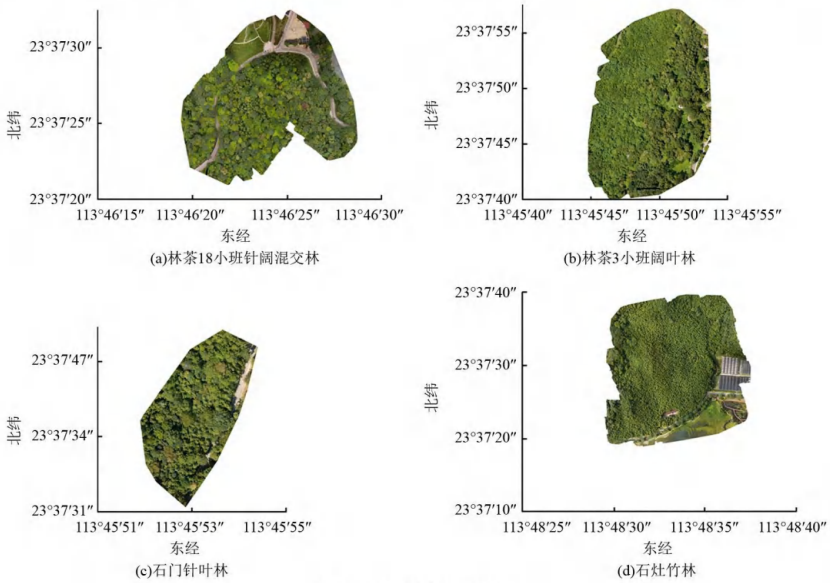


图1 试验样地地理位置

2 研究方法

2.1 数据获取和预处理

机载激光雷达数据获取和预处理:本研究使用激光雷达扫描仪(RIEGL VUX-1UAV)进行数据采集。采用LiDAR360对通过RIEGL VUX-1UAV获取的遥感影像进行处理;主要采用地图绘制软件(ArcMap)进行监测数据提取和信息化。

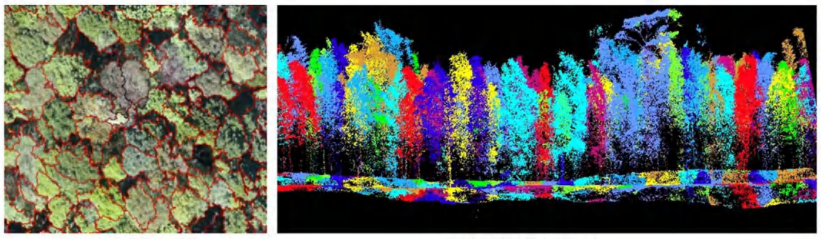
多光谱数据获取和预处理:本研究使用无人机为大疆精灵4多光谱版(P4 Multispectral),传感器包含(650±16)nm的红(R)波段、(560±16)nm的绿(G)波段、(450±16)nm的蓝(B)波段、(730±16)nm

的红边(RE)波段;(840±26)nm 的近红外(NIR)波段。采用 Pix4Dmapper 对获取的遥感影像进行处理,采用地图绘制软件(ArcMap)进行监测数据提取和信息化。

现场调查数据获取和预处理:样地分别在林茶 18 小班针阔叶混交林、林茶 3 小班枫香林、石灶竹林、石门景区杉木林进行设置,各林分分别设置 3 块 20 m×20 m 的固定样方。通过外业调查各样方树木的胸径、树高、冠幅,使用载波相位差分技术(RTK)在样方实测 60 棵信号无遮挡的单木定位。运用地上生物量公式,计算每个样方的树木地上生物量作为实测值。针阔混交林地上生物量(B_{ZK}),阔叶地上生物量 $B_K=0.4754V+30.6034$、针叶地上生物量 $B_Z=0.400V+22.541$,$B_{ZK}=B_K+B_Z$;阔叶林地上生物量 $B_K=0.475\,4V+30.603\,4$;针叶林地上生物量 $B_Z=0.400V+22.541$;竹林地上生物量 $B_{ZL}=0.712D^{1.477}$。公式中的 V 为蓄积量、D 为胸径。

激光雷达数据预处理:激光雷达原始数据格式为 las 文件,将所有原始数据统一到 WGS84-UTM zone49N 坐标系下,利用 LiDAR360 软件对原始机载激光雷达数据进行数据预处理。在激光雷达数据预处理过程中,对点云数据进行去噪,同时提取地面点和对非地面点分类[21]。对地面点分类结束之后得到的地面点进行空间插值,可以得到数字高程模型(DEM);在数字高程模型的基础上,进一步涵盖了除地面以外的其它地表信息的高程[22],生成包含本研究的林分植被点高程信息的数字地表模型(DSM);最后利用经过以上步骤处理好的激光雷达数据,从数字地表模型与数字高程模型高度差中得到冠层高度模型(CHM)。对原始三维点云过滤,并进行树冠分割和提取树冠模型[23],按林分计算林分参数,计算每个点云数据的森林参数[22]。

多光谱数据预处理:使用 Pix4D Mapper 软件对无人机获取的多光谱影像进行拼接,通过地面控制点精确校正拼接影像的空间坐标(见图 2)。其中,数字地表模型通过 Pix4D Mapper 软件生成,数字高程模型、冠层高度模型由 ArcGIS 10.2 生成。使用 ENVI5.3 对拼接好的影像,配合样点坐标,对样点的植被指数进行提取。



(a)多光谱单木预处理　　(b)激光雷达单木预处理

图 2　遥感影像预处理图

植被指数计算:本研究选取常用的植被指数计算公式[21-28],监测植被健康状况、分析植被表面特征或内部化学特性。分别为抵抗大气植被指数($I_{V,AR}$)、归一化植被指数($I_{V,ND}$)、差值植被指数($I_{V,D}$)、增强植被指数($I_{V,E}$)、简单比值指数(I_{SR})、三角植被指数($I_{V,T}$)。

$$I_{V,AR}=(R_{NIR}-(2\times R_R-R_B))/(R_{NIR}+(2\times R_R-R_B));$$

$$I_{V,ND}=(R_{NIR}-R_R)/(R_{NIR}+R_R);$$

$$I_{V,D}=R_{NIR}-R_R;$$

$$I_{V,E}=2.5\times(R_{NIR}-R_R)/(R_{NIR}+6\times R_R-7\times R_B+1);$$

$$I_{SR}=R_{NIR}/R_R;$$

$$I_{V,T}=0.5\times(120\times R_{NIR}-R_G)-200\times(R_R-R_G)。$$

式中:R_{NIR} 为近红外(NIR)波段光的反射率;R_R 为红边(RED)波段光的反射率;R_B 为蓝(BLUE)波段光的反射率;R_G 为绿(GREEN)波段光的反射率。

激光雷达森林参数数据中蕴含着丰富的林分信息[23,29-30],本研究以预处理的激光雷达点云数据为基础,分别从中提取参数,主要包括:

15 个累积高度百分位数——最大树体高度(H_{max})、最小树体高度(H_{min})、树体平均高度(H_{mean})、树体 1%点云积累高度($H_{A,0.01}$)~树体 99%点云积累高度($H_{A,0.99}$);

10 个密度参数——第 1 层点云密度(d_1)~第 10 层点云密度(d_{10});

15 个累积强度百分位数——树体 1%点云积累强度($I_{A,0.01}$)~树体 99%点云积累强度($I_{A,0.99}$);

郁闭度(D_C)、叶面积指数(I_{LA})。

2.2　评价指标的筛选和评价模型的构建

本研究使用多光谱技术、激光雷达技术、联合多源数据分析技术,分别对目标林分的地上生物量进行参数筛选。通过对无人机影像进行分析,提取出样点的植被指数和激光雷达参数。构建 4 种林分地上生物量模型之前进行皮尔逊(Pearson)相关性分

析,为排除各影响因素之间存在多重共线性情况,筛选出各影响因素之间存在低相关性的影响因素和与地上生物量相关性显著的影响因素,应用统计分析软件 SPSS 进行皮尔逊相关性分析。

重要性分析是通过广义回归神经网络技术对影响因素及之间的重要性进行分析[25],其中广义回归神经网络通过处理非线性的问题,其能够给出影响因素在预测中的重要程度[31]。将每类林分各自重要性强的植被指数提取出来,剩余的植被指数因为相关性和重要性不具有代表意义,所以把这些植被指数划分为另一类,不再参与建模运算。

多元线性回归分析是一元线性回归分析的推广形式,是研究1个评价指标与多个影响因素之间相关关系的常用方法[30]。本研究首先分别建立 Y 对各 X_i 的最佳一元非线性回归模型,如对数模型、幂函数模型、二次项模型等,最后把一元非线性回归模型合成多元非线性回归模型。方差膨胀系数(F_{VI})是衡量多元线性回归模型中多重共线性严重程度的一种度量,F_{VI} 越小,共线性程度越低。本研究为保证模型影响因素筛选的有效性,引入 F_{VI} 进行共线性分析。其中本研究使用的多元线性回归模型为[32-33] $Y=\beta_0+\beta_1X_1+\beta_2X_2+\cdots+\beta_iX_i+\varepsilon$;式中的 Y 为评价指标、X_i 为影响因素、β_i 为待估参数、ε 为随机误差。

本研究将经过相关性和重要性分析得到的影响因素,与各样地林分的地上生物量进行多元线性模型和多元非线性模型建模运算;在模型构建时,为了避免各个影响因素之间共线性较大而影响模型稳定性,在拟合出的模型中筛选出 $F_{VI}<10$ 的影响因素做进一步建模运算,得到新的模型。其中,多元线性模型的建立,直接将所有影响因素与林分地上生物量进行线性拟合。

3 结果与分析

3.1 不同数据提取方法的4种林分地上生物量估算模型参数的优化与确立

由表1、表2可见:应用多光谱技术的数据提取,针阔混交林林分地上生物量实测值,与归一化植被指数、差值植被指数、增强植被指数呈显著相关(决定系数分别为0.756、0.678、0.664);阔叶林林分地上生物量实测值,与抵抗大气植被指数、增强植被指数、简单比值指数呈显著相关(决定系数分别为0.846、0.612、0.723);针叶林林分地上生物量实测值,与抵抗大气植被指数、归一化植被指数、差值植被指数呈显著正相关(决定系数分别为0.823、0.518、0.674);竹林地上生物量实测值,与归一化植被指数、差值植被指数、增强植被指数、简单比值指数、三角植被指数(均具有较强相关性(决定系数大于0.833)。对4种林分地上生物量具有较高贡献率的植被指数包含了蓝、红光、近红外波段;红光和近红外区间波段组合得到的植被指数,与针阔混交林地上生物量的相关性显著;红光、蓝光、近红外区间波段组合得到的植被指数,与阔叶林、针叶林、竹林的地上生物量的相关性显著。

表1 依据多光谱数据提取方法的3种林分地上生物量各个影响因素间的相关性

针阔混交林各个影响因素间的相关系数				阔叶林各个影响因素间的相关系数				针叶林各个影响因素间的相关系数			
影响因素	$I_{V,ND}$	$I_{V,D}$	$I_{V,E}$	影响因素	$I_{V,AR}$	$I_{V,E}$	I_{SR}	影响因素	$I_{V,AR}$	$I_{V,ND}$	$I_{V,D}$
$I_{V,ND}$	1.000			$I_{V,AR}$	1.000			$I_{V,AR}$	1.000		
$I_{V,D}$	0.632**	1.000		$I_{V,E}$	0.386**	1.000		$I_{V,ND}$	0.256	1.000	
$I_{V,E}$	0.389**	0.404**	1.000	I_{SR}	0.652**	0.388**	1.000	$I_{V,D}$	0.525**	0.303	1.000

注:$I_{V,ND}$ 为归一化植被指数,$I_{V,D}$ 为差值植被指数,$I_{V,E}$ 为增强植被指数,$I_{V,AR}$ 为抵抗大气植被指数,I_{SR} 为简单比值指数,$I_{V,D}$ 为差值植被指数;**表示相关极显著($P<0.01$)。

表2 依据多光谱数据提取方法的竹林地上生物量各个影响因素间的相关性

影响因素	各个影响因素间的相关系数				
	$I_{V,ND}$	$I_{V,D}$	$I_{V,E}$	I_{SR}	$I_{V,T}$
$I_{V,ND}$	1.000				
$I_{V,D}$	0.913**	1.000			
$I_{V,E}$	0.889**	0.918**	1.000		
I_{SR}	0.876**	0.853**	0.846**	1.000	
$I_{V,T}$	0.821**	0.768**	0.753**	0.816**	1.000

注:$I_{V,ND}$ 为归一化植被指数,$I_{V,D}$ 为差值植被指数,$I_{V,E}$ 为增强植被指数,I_{SR} 为简单比值指数,$I_{V,T}$ 为三角植被指数;**表示相关极显著($P<0.01$)。

由表3~表6可见:应用激光雷达技术的数据提取,针阔混交林林分地上生物量实测值,与树体5%点云积累高度、树体10%点云积累高度、树体80%点云积累高度、树体99%点云积累高度、第1层点云密度、第10层点云密度、树体90%点云积累强度呈显著相关,其指数之间相关性较低;阔叶林林分地上生物量实测值,与树体80%点云积累高度、树体90%点云积累高度、第6层点云密度、树体99%点云积累强度均呈显著相关,其指数之间相关性不显著;针叶林林分地上生物量实测值,与树体90%点云积累高度、树体99%点云积累高度、树体1%点云积累强度、树体99%点云积累强度呈显著相关;竹林林分地上生物量实测值,与树体80%点云积累强度、树体50%点云积累强度、树体70%点云积累强度呈

显著相关。4 种林分树体的参数,如分布在大于 80 范围内的高度百分位数和积累强度百分位数,以及集中在树体顶层的点云密度,能较好地预测所针对的林分地上生物量。

表 3　依据激光雷达数据提取方法的针阔混交林地上生物量各个影响因素间的相关性

影响因素	各个影响因素间的相关系数										
	D_C	I_{LA}	H_{max}	H_{min}	$H_{A,0.05}$	$H_{A,0.10}$	$H_{A,0.30}$	$H_{A,0.50}$	$H_{A,0.60}$	$H_{A,0.70}$	$H_{A,0.75}$
D_C	1.000										
I_{LA}	0.861**	1.000									
H_{max}	0.627**	0.405**	1.000								
H_{min}	0.767**	0.557**	0.614**	1.000							
$H_{A,0.05}$	0.126	0.091	0.108	0.508**	1.000						
$H_{A,0.10}$	0.108	0.312*	0.042	0.314*	0.944**	1.000					
$H_{A,0.30}$	0.429**	0.519**	0.322*	0.060	0.594**	0.735**	1.000				
$H_{A,0.50}$	0.586**	0.510**	0.589**	0.247	0.384**	0.522**	0.877**	1.000			
$H_{A,0.60}$	0.616**	0.537**	0.632**	0.296*	0.325*	0.463**	0.809**	0.970**	1.000		
$H_{A,0.70}$	0.606**	0.451**	0.732**	0.332*	0.205	0.312*	0.618**	0.900**	0.934**	1.000	
$H_{A,0.75}$	0.626**	0.464**	0.744**	0.351*	0.184	0.293*	0.597**	0.887**	0.926**	0.998**	1.000
$H_{A,0.80}$	0.593**	0.410**	0.771**	0.362*	0.132	0.227	0.570**	0.863**	0.910**	0.981**	0.983**
$H_{A,0.90}$	0.617**	0.420**	0.786**	0.394**	0.097	0.196	0.540**	0.843**	0.891**	0.970**	0.976**
$H_{A,0.95}$	0.577**	0.370*	0.961**	0.551**	0.041	0.074	0.391**	0.684**	0.728**	0.839**	0.848**
$H_{A,0.99}$	0.614**	0.394**	0.988**	0.581**	0.076	0.058	0.357*	0.645**	0.695**	0.803**	0.815**
d_1	0.034	0.064	0.126	0.753**	0.042	0.174	0.327*	0.538**	0.753**	0.865**	0.689**
d_4	0.075	0.537**	0.106	0.536**	0.064	0.079	0.242	0.753**	0.754**	0.497*	0.875**
d_5	0.148	0.327*	0.648**	0.258	0.526**	0.258*	0.757**	0.764**	0.764**	0.768**	0.765**
d_6	0.064	0.053	0.752**	0.061	0.157	0.195	0.853**	0.864**	0.764**	0.753**	0.659**
d_{10}	0.186	0.216	0.257	0.017	0.352*	0.157	0.537**	0.536**	0.558**	0.684**	0.874**
$I_{A,0.90}$	0.178	0.425**	0.046	0.052	0.087	0.095	0.358*	0.754**	0.753**	0.864**	0.874**
$I_{A,0.95}$	0.328**	0.159	0.325*	0.257	0.105	0.537	0.431	0.649**	0.679**	0.765**	0.863**

影响因素	各个影响因素间的相关系数										
	$H_{A,0.80}$	$H_{A,0.90}$	$H_{A,0.95}$	$H_{A,0.99}$	d_1	d_4	d_5	d_6	d_{10}	$I_{A,0.90}$	$I_{A,0.95}$
$H_{A,0.80}$	1.000										
$H_{A,0.90}$	0.994**	1.000									
$H_{A,0.95}$	0.877**	0.885**	1.000								
$H_{A,0.99}$	0.844**	0.854**	0.988**	1.000							
d_1	0.875**	0.874**	0.748**	0.846**	1.000						
d_4	0.749**	0.863**	0.876**	0.764**	0.225	1.000					
d_5	0.854**	0.749**	0.876**	0.874**	0.207	0.765**	1.000				
d_6	0.972**	0.958**	0.865**	0.647**	0.200	0.371*	0.664**	1.000			
d_{10}	0.689**	0.539*	0.579**	0.673**	0.036	0.234	0.409**	0.425**	1.000		
$I_{A,0.90}$	0.764**	0.579*	0.642**	0.753**	0.053	0.325	0.646	0.535**	0.753**	1.000	
$I_{A,0.95}$	0.876**	0.755**	0.886**	0.649**	0.102	0.219	0.746	0.544**	0.757**	0.952**	1.000

注:D_C 为郁闭度,I_{LA} 为叶面积指数,H_{max} 为最大树体高度,H_{min} 为最小树体高度,$H_{A,0.05}$ 为树体 5%点云积累高度,$H_{A,0.10}$ 为树体 10%点云积累高度,$H_{A,0.30}$ 为树体 30%点云积累高度,$H_{A,0.50}$ 为树体 50%点云积累高度,$H_{A,0.60}$ 为树体 60%点云积累高度,$H_{A,0.70}$ 为树体 70%点云积累高度,$H_{A,0.75}$ 为树体 75%点云积累高度,$H_{A,0.80}$ 为树体 80%点云积累高度,$H_{A,0.90}$ 为树体 90%点云积累高度,$H_{A,0.95}$ 为树体 95%点云积累高度,$H_{A,0.99}$ 为树体 99%点云积累高度,d_1 为第 1 层点云密度,d_4 为第 4 层点云密度,d_5 为第 5 层点云密度,d_6 为第 6 层点云密度,d_{10} 为第 10 层点云密度,$I_{A,0.90}$ 为树体 90%点云积累强度,$I_{A,0.95}$ 为树体 95%点云积累强度;* 表示相关显著($P<0.05$),** 表示相关极显著($P<0.01$)。

关于多源数据提取,所使用的参数为前两种方法中得到的效果较好的植被指数和激光雷达参数。综合各参数的相关性和重要性数值大小,选择适用于建模预测的参数,得到依据不同数据提取方法的 4 种林分地上生物量参数(见表 7)。

3.2　4 种林分地上生物量估测模型中不同类型模型的精度差异

由表 8 可见:依据多光谱和激光雷达数据建立的 4 种不同林分类型林分的多元非线性地上生物量反演模型的决定系数(R^2),高于多元线性回归模型的决定系数;多元非线性回归模型中地上生物量与其相关因素之间的拟合效果,优于多元线性模型。4 种林分的多元非线性回归方程决定系数分别为 0.713、0.813、0.786、0.919;说明回归方程中的影响因素对 4 种林分地上生物量的影响分别为 71.3%、81.3%、78.6%、91.9%,模型的拟合程度较好。

表4 依据激光雷达数据提取方法的阔叶林地上生物量各个影响因素间的相关性

影响因素	各个影响因素间的相关系数															
	D_C	I_{LA}	$H_{A,0.01}$	$H_{A,0.05}$	$H_{A,0.80}$	$H_{A,0.90}$	$H_{A,0.95}$	$H_{A,0.99}$	H_{max}	H_{min}	d_1	d_3	d_5	d_6	d_{10}	$I_{A,0.99}$
D_C	1.000															
I_{LA}	0.859**	1.000														
$H_{A,0.01}$	0.013	0.210	1.000													
$H_{A,0.05}$	0.116	0.353*	0.866**	1.000												
$H_{A,0.80}$	0.102	0.014	0.417**	0.486**	1.000											
$H_{A,0.90}$	0.102	0.024	0.361*	0.420**	0.980**	1.000										
$H_{A,0.95}$	0.103	0.029	0.340*	0.408**	0.972**	0.998**	1.000									
$H_{A,0.99}$	0.074	0.026	0.273	0.334*	0.938**	0.975**	0.978**	1.000								
H_{max}	0.034	0.030	0.241	0.287*	0.892**	0.938**	0.942**	0.971**	1.000							
H_{min}	0.341*	0.106	0.782**	0.493**	0.126	0.096	0.073	0.039	0.02	1.000						
d_1	0.095	0.095	0.257	0.328	0.197	0.085	0.095	0.096	0.127	0.218	1.000					
d_3	0.074	0.068	0.196	0.219	0.265	0.103	0.142	0.104	0.086	0.102	0.154	1.000				
d_5	0.152	0.103	0.364	0.109	0.586	0.094	0.105	0.117	0.095	0.216	0.181	0.241	1.000			
d_6	0.106	0.136	0.219	0.270	0.106	0.074	0.218	0.097	0.142	0.096	0.298*	0.403**	0.551**	1.000		
d_{10}	0.257	0.096	0.108	0.174	0.174	0.148	0.096	0.137	0.093	0.142	0.055	0.051	0.137	0.197	1.000	
$I_{A,0.99}$	0.128	0.084	0.218	0.102	0.127	0.317	0.104	0.096	0.106	0.177	0.216	0.196	0.216	0.169	0.102	1.000

注：D_C 为郁闭度，I_{LA} 为叶面积指数，$H_{A,0.01}$ 为树体1%点云积累高度，$H_{A,0.05}$ 为树体5%点云积累高度，$H_{A,0.80}$ 为树体80%点云积累高度，$H_{A,0.90}$ 为树体90%点云积累高度，$H_{A,0.95}$ 为树体95%点云积累高度，$H_{A,0.99}$ 为树体99%点云积累高度，H_{max} 为最大树体高度，H_{min} 为最小树体高度，d_1 为第1层点云密度，d_3 为第3层点云密度，d_5 为第5层点云密度，d_6 为第6层点云密度，d_{10} 为第10层点云密度，$I_{A,0.95}$ 为树体99%点云积累强度；* 表示相关显著（$P<0.05$），** 表示相关极显著（$P<0.01$）。

表5 依据激光雷达数据提取方法的针叶林地上生物量各个影响因素间的相关性

影响因素	各个影响因素间的相关系数											
	$H_{A,0.80}$	$H_{A,0.90}$	$H_{A,0.95}$	$H_{A,0.99}$	H_{max}	H_{min}	d_1	d_4	d_{10}	$I_{A,0.01}$	$I_{A,0.05}$	$I_{A,0.99}$
$H_{A,0.80}$	1.000											
$H_{A,0.90}$	0.982**	1.000										
$H_{A,0.95}$	0.956**	0.993**	1.000									
$H_{A,0.99}$	0.931**	0.975**	0.990**	1.000								
H_{max}	0.905**	0.949**	0.970**	0.987**	1.000							
H_{min}	0.799**	0.838**	0.848**	0.865**	0.882**	1.000						
d_1	0.432*	0.443*	0.243	0.344	0.534**	0.213	1.000					
d_4	0.297	0.325	0.352	0.213	0.313	0.534**	0.051	1.000				
d_{10}	0.264	0.264	0.252	0.242	0.323	0.423*	0.572**	0.288	1.000			
$I_{A,0.01}$	0.742**	0.342	0.432*	0.322	0.345	0.364	0.436*	0.442*	0.322	1.000		
$I_{A,0.05}$	0.598**	0.214	0.535**	0.443*	0.413*	0.534**	0.474*	0.324	0.423*	0.973**	1.000	
$I_{A,0.99}$	0.735**	0.355	0.533**	0.243	0.521**	0.253	0.342	0.423*	0.324	0.508**	0.555**	1.000

注：$H_{A,0.80}$ 为树体80%点云积累高度，$H_{A,0.90}$ 为树体90%点云积累高度，$H_{A,0.95}$ 为树体95%点云积累高度，$H_{A,0.99}$ 为树体99%点云积累高度，H_{max} 为最大树体高度，H_{min} 为最小树体高度，d_1 为第1层点云密度，d_4 为第4层点云密度，d_{10} 为第10层点云密度，$I_{A,0.01}$ 为树体1%点云积累强度，$I_{A,0.05}$ 为树体5%点云积累强度，$I_{A,0.99}$ 为树体99%点云积累强度；* 表示相关显著（$P<0.05$），** 表示相关极显著（$P<0.01$）。

表6 依据激光雷达数据提取方法的竹林地上生物量各个影响因素间的相关性

影响因素	各个影响因素间的相关系数														
	d_1	d_3	d_4	d_5	d_7	d_8	d_9	d_{10}	$I_{A,0.01}$	$I_{A,0.50}$	$I_{A,0.60}$	$I_{A,0.70}$	$I_{A,0.75}$	$I_{A,0.80}$	$I_{A,0.90}$
d_1	1.000														
d_3	0.381**	1.000													
d_4	0.248**	0.863**	1.000												
d_5	0.179	0.752**	0.897**	1.000											
d_7	0.076	0.282**	0.399**	0.583**	1.000										
d_8	0.071	0.082	0.195*	0.338**	0.818**	1.000									
d_9	0.019	0.053	0.106	0.229*	0.540**	0.795**	1.000								
d_{10}	0.007	0.131	0.080	0.089	0.243**	0.418**	0.622**	1.000							
$I_{A,0.01}$	0.093	0.105	0.252*	0.153	0.313**	0.313**	0.621**	0.261*	1.000						
$I_{A,0.50}$	0.017	0.153	0.219*	0.324**	0.214*	0.241*	0.193	0.183	0.969**	1.000					
$I_{A,0.60}$	0.083	0.073	0.104	0.184	0.194	0.138	0.215*	0.213*	0.964**	0.999**	1.000				
$I_{A,0.70}$	0.103	0.153	0.142	0.214*	0.142	0.093	0.194	0.163	0.959**	0.998**	0.999**	1.000			
$I_{A,0.75}$	0.094	0.184	0.093	0.184	0.291**	0.152	0.424**	0.183	0.957**	0.997**	0.999**	1.000**	1.000		
$I_{A,0.80}$	0.104	0.093	0.142	0.124	0.204*	0.142	0.231*	0.215*	0.952**	0.996**	0.998**	0.999**	1.000**	1.000	
$I_{A,0.90}$	0.083	0.194	0.104	0.421**	0.184	0.252*	0.531**	0.242*	0.949**	0.993**	0.996**	0.998**	0.998**	0.999**	1.000

注：d_1 为第1层点云密度，d_3 为第3层点云密度，d_4 为第4层点云密度，d_5 为第5层点云密度，d_7 为第7层点云密度，d_8 为第8层点云密度，d_9 为第9层点云密度，d_{10} 为第10层点云密度，$I_{A,0.01}$ 为树体1%点云积累强度，$I_{A,0.50}$ 为树体50%点云积累强度，$I_{A,0.60}$ 为树体60%点云积累强度，$I_{A,0.70}$ 为树体70%点云积累强度，$I_{A,0.75}$ 为树体75%点云积累强度，$I_{A,0.80}$ 为树体80%点云积累强度，$I_{A,0.90}$ 为树体90%点云积累强度；* 表示相关显著（$P<0.05$），** 表示相关极显著（$P<0.01$）。

表 7　依据不同数据提取方法的 4 种林分地上生物量估算模型参数

提取方法	林分类型	模型参数
方法Ⅰ	针阔混交林	归一化植被指数($I_{V,ND}$)、差值植被指数($I_{V,D}$)
	阔叶林	抵抗大气植被指数($I_{V,AR}$)、简单比值指数(I_{SR})
	针叶林	抵抗大气植被指数($I_{V,AR}$)、差值植被指数($I_{V,D}$)
	竹林	差值植被指数($I_{V,D}$)、三角植被指数($I_{V,T}$)、简单比值指数(I_{SR})
方法Ⅱ	针阔混交林	树体 5%点云积累高度($H_{A,0.05}$)、最小树体高度(H_{min})、第 1 层点云密度(d_1)、第 10 层点云密度(d_{10})、树体 80%点云积累高度($H_{A,0.80}$)、郁闭度(D_C)、叶面积指数(I_{LA})、树体 90%点云积累强度($I_{A,0.90}$)、树体 95%点云积累强度($I_{A,0.95}$)
	阔叶林	最小树体高度(H_{min})、最大树体高度(H_{max})、树体 80%点云积累高度($H_{A,0.80}$)、树体 90%点云积累高度($H_{A,0.90}$)、第 5 层点云密度(d_5)、第 6 层点云密度(d_6)、树体 99%点云积累强度($I_{A,0.99}$)、郁闭度(D_C)、叶面积指数(I_{LA})
	针叶林	树体 90%点云积累高度($H_{A,0.90}$)、树体 99%点云积累高度($H_{A,0.99}$)、第 4 层点云密度($d4$)、第 10 层点云密度(d_{10})、最大树体高度(H_{max})、树体 1%点云积累强度($I_{A,0.01}$)、树体 99%点云积累强度($I_{A,0.99}$)
	竹林	树体 50%点云积累强度($I_{A,0.50}$)、树体 70%点云积累强度($I_{A,0.70}$)、第 1 层点云密度($d1$)、第 10 层点云密度(d_{10})
方法Ⅲ	针阔混交林	郁闭度(D_C)、最大树体高度(H_{max})、最小树体高度(H_{min})、树体 99%点云积累高度($H_{A,0.99}$)、树体 95%点云积累高度($H_{A,0.95}$)、第 5 层点云密度(d_5)、第 6 层点云密度(d_6)、树体 95%点云积累强度($I_{A,0.95}$)、归一化植被指数($I_{V,ND}$)、差值植被指数($I_{V,D}$)
	阔叶林	郁闭度(D_C)、树体 95%点云积累高度($H_{A,0.95}$)、树体 99%点云积累高度($H_{A,0.99}$)、第 1 层点云密度(d_1)、第 3 层点云密度(d_3)、第 5 层点云密度(d_5)、树体 5%点云积累强度($I_{A,0.05}$)、树体 10%点云积累强度($I_{A,0.10}$)、抵抗大气植被指数($I_{V,AR}$)、简单比值指数(I_{SR})
	针叶林	树体 80%点云积累高度($H_{A,0.80}$)、树体 90%点云积累高度($H_{A,0.90}$)、H_{min}、最大树体高度(H_{max})、第 1 层点云密度(d_1)、第 10 层点云密度(d_{10})、树体 1%点云积累强度($I_{A,0.01}$)、树体 99%点云积累强度($I_{A,0.99}$)、差值植被指数($I_{V,D}$)、抵抗大气植被指数($I_{V,AR}$)
	竹林	树体 75%点云积累强度($I_{A,0.75}$)、树体 80%点云积累强度($I_{A,0.80}$)、树体 70%点云积累强度($I_{A,0.70}$)、树体 5%点云积累高度($H_{A,0.05}$)、树体 60%点云积累强度($I_{A,0.60}$)、树体 10%点云积累高度($H_{A,0.10}$)、树体 1%点云积累高度($H_{A,0.01}$)、树体 90%点云积累强度($I_{A,0.90}$)、三角植被指数($I_{V,T}$)、简单比值指数(I_{SR})

注:方法Ⅰ为依据多光谱数据提取方法,方法Ⅱ为依据激光雷达数据提取方法,方法Ⅲ为依据多源数据提取方法。

表 8　4 种林分地上生物量模型精度比较结果

林分类型	模型类型	曲线回归方程	R^2	F 值
针阔混交林	Ⅰ	$Y=12.107+0.005I_{LA}+0.004H_{A,0.05}-0.001H_{A,0.80}+0.168d_1+0.25d_{10}+0.617I_{V,ND}+0.287I_{V,D}$	0.709	13.595**
	Ⅱ	$Y=-36.537-0.122\cdot12.443\exp(0.000\,5I_{LA})+0.796\cdot12.532-0.032\cdot\log(H_{A,0.05})+0.539\cdot12.441\exp(0.000\,3\cdot H_{A,0.80})+0.536\cdot12.541\exp(-0.002H_{min})-0.004\cdot12.500d_1\cdot0.000\,3+1.002\cdot12.504-0.458\cdot d_{10}+1.353\cdot d_{10}\cdot d_{10}+0.697\cdot12.205\exp(0.062I_{V,ND})+0.481\cdot12.757I_{V,D}\cdot0.015$	0.713	11.821**
阔叶林	Ⅰ	$Y=11.984-0.034D_C+0.004I_{LA}-0.001H_{min}-0.057d_5+0.01d_6+0.188I_{V,AR}+0.135I_{SR}$	0.796	33.592**
	Ⅱ	$Y=-5.511+0.6\cdot12.366\exp(-0.008d_5)-0.313\cdot12.364\exp(-0.005d_6)+0.009\cdot8.564+0.000\,2I_{A,0.99}-2.922I_{A,0.99}\cdot I_{A,0.99}+0.776\cdot12.260\exp(0.018I_{V,AR})+0.375\cdot12.196\exp(0.029I_{SR})$	0.813	21.136**
针叶林	Ⅰ	$Y=22.501-0.006d_4+0.18d_{10}+0.471I_{V,AR}+0.381I_{V,D}$	0.785	20.106**
	Ⅱ	$Y=-44.714+0.211\cdot22.596\exp(-0.000\,9d_4)+0.544\cdot22.587\exp(0.015d_{10})+0.917\cdot22.665-0.008\log(I_{A,0.01})+0.062\cdot21.555I_{A,0.99}\cdot0.004+0.778\cdot22.535\exp(0.027I_{V,AR})+0.456\cdot22.518\exp(0.036I_{V,D})$	0.786	20.162**
竹林	Ⅰ	$Y=-2.271+6.484d_1+3.463d_{10}+8.418I_{V,T}+36.346I_{SR}$	0.888	47.634**
	Ⅱ	$Y=-13.143+0.418(-35.540+0.003I_{A,0.50}-6.636I_{A,0.50}\cdot I_{A,0.50})-0.437(-102.890+0.008I_{A,0.70}-1.333I_{A,0.70}\cdot I_{A,0.70})-0.633\cdot3.351\exp(6.516d_1)+0.931(3.932+0.107\log d_{10})+0.238(11.813I_{V,T}\cdot0.414)+1.964(10.416+2.135\log I_{SR})$	0.919	67.846**

注:Ⅰ为多元线性回归模型,Ⅱ为多元非线性回归模型,R^2 决定系数;Y 为林分地上生物量;I_{LA} 为叶面积指数,$H_{A,0.05}$ 为树体 5%点云积累高度,$H_{A,0.80}$ 为树体 80%点云积累高度,d_1 为第 1 层点云密度,d_{10} 为第 10 层点云密度,$I_{V,ND}$ 为归一化植被指数,$I_{V,D}$ 为差值植被指数,H_{min} 为最小树体高度,D_C 为郁闭度,d_5 为第 5 层点云密度,d_6 为第 6 层点云密度,$I_{V,AR}$ 为抵抗大气植被指数,I_{SR} 为简单比值指数,$I_{A,0.99}$ 为树体 99%点云积累强度,$I_{A,0.01}$ 为树体 1%点云积累强度,$I_{V,T}$ 为三角植被指数,$I_{A,0.50}$ 为树体 50%点云积累强度,$I_{A,0.70}$ 为树体 70%点云积累强度;**表示相关极显著($P<0.01$)。

3.3　4 种林分地上生物量预测反演模型的精度检验

利用反演模型和预测影响因素对 4 种林分地上生物量提取值进行计算,并与地上生物量实测值进行精度比较(见图 3)。结果表明,针阔混交林精度范围在 68.24%~87.84%、阔叶林精度范围在 72.77%~92.17%、针叶林精度范围在 50.40%~69.60%、竹林精度范围在 86.92%~98.90%。计算得到针阔混交林样地地上生物量提取量均值为 42.79

t · hm^{-2},阔叶林样地地上生物量提取量均值为60.46 t · hm^{-2},针叶林样地地上生物量提取量均值为32.99 t · hm^{-2},竹林样地地上生物量提取量均值为1.92 t · hm^{-2}。多元非线性地上生物量反演模型对4种林分类型地上生物量的估测精度,由大到小依次为竹林(决定系数为0.919)、阔叶林(决定系数为0.813)、针叶林(决定系数为0.786)、针阔混交林(决定系数为0.713)。

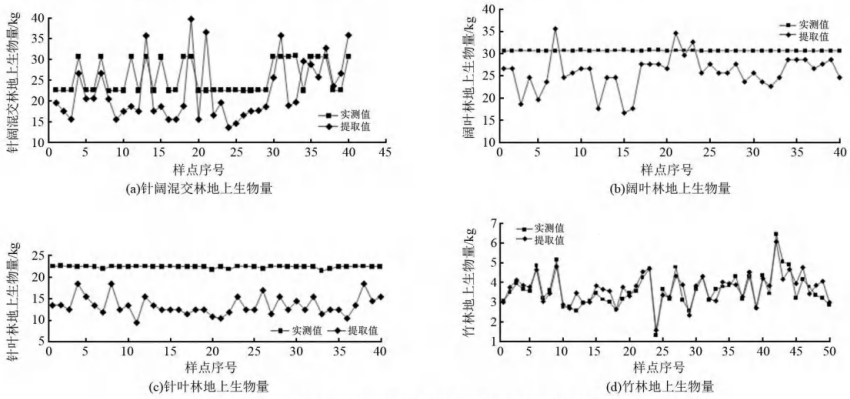


图3 4种林分的地上生物量实测值和提取值折线图

4 讨论

本研究以针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林林分为研究对象,分别用多光谱、激光雷达、多源数据的3种分析手段对林分地上生物量进行提取。多源数据分析方法在3种方法中具有较高的分析精度,其数据在4种林分地上生物量反演模型构建中精度较高,决定系数均达到0.700以上,拟合效果达到显著水平。

在多光谱参数的筛选方面,其中5个参数中有3~5个参数与4种林分地上生物量显著相关($P<0.05$),之中具有较高贡献率的植被指数包含了蓝光、红光、近红外波段。其中红光、蓝光波段为叶绿素的强吸收带,可用于区分植物类型、覆盖度、判断植物生长状况等;近红外波段位于植物的高反射区,反映了植被的生长状况、覆盖度、密度信息[30,33],体现的植被指数主要有归一化植被指数、差值植被指数、简单比值指数。在激光点云参数方面,其中45个参数中有5~9个参数与4种林分地上生物量显著相关($P<0.05$),其中树体高度百分位数反应了树体空间结构点云影响因素,郁闭度、叶面积指数、积累强度百分位数、密度反映了冠层的形状和冠层空间结构相关的点云影响因素,各相关参数反映不同类型的林分树体特征[33]。在建模参数中,无论是光谱数据还是点云数据,都起到了较好的作用,两者相结合的信息能够增强信息维度,更好地提高地上生物量估算精度。

关于模型拟合,依据多源数据联合建立的4种不同林分类型林分的多元非线性地上生物量反演模型的决定系数,高于多元线性回归模型的决定系数;多元非线性回归模型中地上生物量与其相关因素之间的拟合效果,优于多元线性模型,多元非线性模型在很多实际应用中显示出更好的拟合效果[34]。徐辉等[35]运用光学遥感影像对阔叶林、针阔混交林蓄积量进行提取,所选用模型分别为多元线性回归模型和BP神经网络模型,BP神经网络模型预测结果的决定系数(0.870)高于多元线性回归模型的决定系数(0.470)。本研究4种林分地上生物量的反演模型效果最佳的皆为多元非线性模型,本研究使用多元非线性模型对不同林分地上生物量进行预测,但结果与相关研究有差异;有的研究运用多元非线性回归模型对阔叶林、针叶林地上生物量进行估测,决定系数分别为0.576、0.420[34];原因是不同区域的地形、植被类型的差异对预测结果产生了一定的影响,以及不同的影响因素对模型精度的影响也不相同,在采用非线性模型预测林分地上生物量方面,其精度与模型影响因素的选取关系较大[34]。

本研究利用多元非线性回归模型估算,得到针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林样地地上生物量均值,分别为42.79、60.46、32.99、1.92 t · hm^{-2}。有的研究利用激光雷达点云或Landsat-8 OLI影像作为数据源,对针叶林、阔叶林、针阔混交林进行地上生物量的提取估算,均值分布在60~293 t · hm^{-2}范围内,生物量由大到小依次为阔叶林、针阔混交林、针叶林[17,36]。本研究结果相对于其他研究结果数值偏小,由于本研究样地林分郁闭度较高,以及影像采

集受到了周围环境光照和土壤的影响,在使用同样的单木分割方法时,存在分割不精确的情况,遥感影像提取单木信息技术在中高郁闭度林分中具备少量不稳定性。此外,本研究区中 4 种不同林分类型的多元非线性地上生物量反演模型的拟合程度,由大到小依次为竹林(决定系数为 0.919)、阔叶林(决定系数为 0.813)、针叶林(决定系数为 0.786)、针阔混交林(决定系数为 0.713),均符合精度要求。说明林分结构越简单,多元非线性地上生物量反演模型的精度越高;在竹林中,树种组成单一,个体差异不明显;而在针阔混交林中,树种组成复杂,林木个体间和郁闭度差异较大,导致模型精度下降。

本研究中,所有林分的点云参数、光谱特征,是在野外条件中应用无人机搭载传感器的方式进行采集的,部分受到土壤及周围环境的影响;在模型影响因素的影响方面,本研究利用广义回归神经网络预测可应用于建模的影响因素,但由于中间计算过程难以对影响因素之间的关系进行直观分析,因此模型中各影响因素的影响力差异较难量化分析。在模型拟合精度方面,机器学习模型的发展逐渐成熟,且其模型精度高于传统参数模型,在对影响因素之间关系的分析要求较低的情况可尝试应用;未来可更多应用机器学习模型对复杂郁闭情况的林分和不同类型林分地上生物量进行拟合;可尝试在激光雷达数据的基础上加入高光谱数据,增强光谱数据在反馈森林三维结构的细化特征的能力。

5　结论

在利用多光谱数据提取方面,根据参数相关性和重要性大小筛选可使用的建模预测参数;由建模结果表明,阔叶林和竹林的多元非线性模型拟合效果较好,而针阔混交林和针叶林的多元线性模型拟合效果较好。在利用激光雷达数据提取方面,阔叶林、针叶林、竹林的多元非线性模型拟合效果较好,而针阔混交林的多元线性模型拟合效果较好。在多源数据提取方面,4 种林分的多元非线性模型拟合效果较好。

对以上 3 种方法进行对比表明,依据多源数据建立的 4 种林分的多元非线性地上生物量反演模型的决定系数,高于多元线性回归模型的决定系数。多元非线性回归模型中地上生物量与其相关因素之间的拟合效果优于多元线性模型;其中,针阔混交林的多元非线性回归方程决定系数为 0.713、阔叶林的多元非线性回归方程决定系数为 0.813、针叶林的多元非线性回归方程决定系数为 0.786、竹林的多元非线性回归方程决定系数为 0.919。计算得到针阔混交林、阔叶林、针叶林、竹林样地地上生物量提取量均值,分别为 42.79、60.46、32.99、1.92 $t \cdot hm^{-2}$。因此,采用多光谱和激光雷达数据结合的方式,能够较精准地提取林分地上生物量信息,估测不同林分类型的地上生物量。其中,多元非线性地上生物量反演模型对 4 种林分类型地上生物量的估测精度,由大到小依次为竹林、阔叶林、针叶林、针阔混交林。

参　考　文　献

[1] COOK-PATTON S C, LEAVITT S M, GIBBS D, et al. Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth[J]. Nature, 2020, 585: 545-550. doi: 10.1038/s41586-020-2686-x.

[2] MITCHARD E T A. The tropical forest carbon cycle and climate change[J]. Nature, 2018, 559: 527-534. doi: 10.1038/s41586-018-0300-2.

[3] 王超,董少刚,贾志斌,等.草原露天煤矿区植被对地下水位埋深变化的响应[J].生态学报,2020,40(19):6925-6937.

[4] 李赟.基于 UAV 高分影像的林木冠幅提取与蓄积量估测研究[D].南京:南京林业大学,2017.

[5] YANG Q L, SU Y J, HU T Y, et al. Allometry-based estimation of forest aboveground biomass combining LiDAR canopy height attributes and optical spectral indexes[J]. Forest Ecosystems, 2022, 9.doi:10.1016/j.fecs.2022.100059.

[6] QIN H M, ZHOU W Q, YAO Y, et al. Estimating aboveground carbon stock at the scale of individual trees in subtropical forests using UAV LiDAR and hyperspectral data[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24).doi:10.3390/rs13244969.

[7] 韩欢庆.基于无人机多光谱图像的森林虫害区域分割方法[D].北京:北京林业大学,2018.

[8] 丁锐.基于无人机光谱遥感的杨树锈病早期检测研究[D].南京:南京林业大学,2019.

[9] 马云强,李宇宸,刘梦盈,等.基于无人机多光谱影像的云南切梢小蠹危害监测反演研究[J].西南农业学报,2021,34(9):1878-1884.

[10] LÓPEZ-SERRANO P M, LÓPEZ SÁNCHEZ C A, SOLÍS-MORENO R, et al. Geospatial estimation of above ground forest biomass in the sierra madre occidental in the state of durango, mexico[J]. Forests, 2016, 7(3).doi:10.3390/f7030070.

[11] DOMINGO D, ØRKA H O, NÆSSET E, et al. Effects of UAV image resolution, camera type, and image overlap on accuracy of biomass predictions in a tropical woodland[J]. Remote Sensing, 2019, 11(8).doi:10.3390/rs11080948.

[12] ZHU Y H, LIU K, MYINT S W, et al. Integration of GF2 optical, GF3 SAR, and UAV data for estimating aboveground biomass of China's largest artificially planted mangroves[J]. Remote Sensing, 2020, 12(12).doi:10.3390/rs12122039.

[13] LUO S Z, WANG C, XI X H, et al. Fusion of airborne LiDAR data and hyperspectral imagery for aboveground and belowground forest biomass estimation[J]. Ecological Indicators, 2017, 73:378-387.doi:10.1016/j.ecolind.2016.10.001.

[14] LIANG X L, KANKARE V, HYYPPÄ J, et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2016, 115:63-77.doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.006.

[15] JIN S C, SUN X L, WU F F, et al. LiDAR sheds new light on plant phenomics for plant breeding and management: Recent advances and future prospects[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 171:202-223.doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.11.006.

[16] LU J B, WANG H, QIN S H, et al. Estimation of aboveground biomass of *Robinia pseudoacacia* forest in the Yellow River Delta based on UAV and Backpack LiDAR point clouds[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2020, 86.doi:10.1016/j.jag.2019.102014.

[17] 陈中超,刘清旺,李春干,等.基于无人机激光雷达的人工林碳储量线性与非线性估测模型比较[J].北京林业大学学报,2021,43(12):9-16.

[18] 庞勇,黄克标,李增元,等.基于遥感的湄公河次区域森林地上生物量分析[J].资源科学,2011,33(10):1863-1869.
[19] 皋厦,申鑫,代劲松,等.结合 LiDAR 单木分割和高光谱特征提取的城市森林树种分类[J].遥感技术与应用,2018,33(6):1073-1083.
[20] 边瑞.基于多源遥感数据的祁连山国家公园森林生物量估算研究[D].兰州:兰州大学,2021.
[21] 何兴元,任春颖,陈琳,等.森林生态系统遥感监测技术研究进展[J].地理科学,2018,38(7):997-1011.
[22] 赵天舸,于瑞宏,张志磊,等.湿地植被地上生物量遥感估算方法研究进展[J].生态学杂志,2016,35(7):1936-1946.
[23] 李亚东,曹明兰,李长青,等.无人机森林航摄影像三维点云估测林分蓄积量研究[J].中南林业科技大学学报,2019,39(3):56-60.
[24] 张翔.基于无人机激光雷达和多光谱数据的植被生物量反演研究[D].呼和浩特:内蒙古师范大学,2020.
[25] 刘霜.基于 Sentinel-1/2 的重庆市南川区森林生物量估算研究[D].成都:成都理工大学,2020.
[26] ROUSE J W JR, HAAS R H, SCHELL J A, et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS[J]. Nasa Special Publication,1974,351(1):309.
[27] 孙小琼.基于植被指数的水资源遥感定量反演模型与预测研究:以贵州省为例[D].贵阳:贵州师范大学,2017.
[28] 陈松,孙华,吴童,等.基于 Sentinel-2 与机载激光雷达数据的误差变量联立方程组森林蓄积量反演研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(12):44-53.
[29] 汤旭光.基于激光雷达与多光谱遥感数据的森林地上生物量反演研究[D].长春:中国科学院大学(中国科学院东北地理与农业生态研究所),2013.
[30] 安芳,翟亮,桑会勇,等.基于地理国情数据的 $PM_{2.5}$ 因子多元回归分析[J].测绘科学,2015,40(7):58-63.
[31] 徐奇刚,雷相东,国红,等.基于多层感知机的长白落叶松人工林林分生物量模型[J].北京林业大学学报,2019,41(5):97-107.
[32] 巨一琳,姬永杰,黄继茂,等.联合 LiDAR 和多光谱数据森林地上生物量反演研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(1):58-68.
[33] 刘琼阁,彭道黎,涂云燕,等.基于偏最小二乘的森林生物量遥感估测[J].东北林业大学学报,2014,42(7):44-47.
[34] 张颖.基于高分辨率遥感和极化雷达数据的大兴安岭地区森林地上生物量估测[D].北京:北京林业大学,2016.
[35] 徐辉,潘萍,宁金魁,等.多元线性回归与神经网络模型在森林地上生物量遥感估测中的应用[J].东北林业大学学报,2018,46(1):63-67.
[36] 苏华,张明慧,李静,等.基于光学与 SAR 因子的森林生物量多元回归估算:以福建省为例[J].遥感技术与应用,2019,34(4):847-856.

(上接59页)

[13] 侯丹,张莉,魏志刚,等.红松种源遗传变异及高固碳种源选择的研究[J].植物研究,2016,36(3):452-460.
[14] 魏嘉彤,陈思琪,芦贤博,等.基于生长与木材性状的红松优良种源评价选择[J].北京林业大学学报,2022,44(3):12-23.
[15] 张扬.清原地区6个红松种源种实特性研究[J].辽宁林业科技,2023(4):21-24.
[16] 温国胜,田海涛,张明如,等.叶绿素荧光分析技术在林木培育中的应用[J].应用生态学报,2006,17(10):1973-1977.
[17] 逯久幸,苗润田,王司琦,等.低温胁迫下秋菊叶片光系统特性分析[J].植物生理学报,2022,58(2):425-434.
[18] 许永安.低温胁迫对甜瓜幼苗光合能力及叶绿素荧光参数的影响[J].中国瓜菜,2020,33(2):22-26.
[19] 林郑和,钟秋生,游小妹,等.低温对不同基因型'白鸡冠'F1代叶绿素荧光的影响[J].茶叶学报,2018,59(2):57-66.
[20] MØLLER I M, JENSEN P E, HANSSON A. Oxidative modifications to cellular components in plants[J]. Annual Review of Plant Biology,2007,58:459-481.
[21] 张梦如,杨玉梅,成蕴秀,等.植物活性氧的产生及其作用和危害[J].西北植物学报,2014,34(9):1916-1926.
[22] 侯瑾蓉,董洁,贾蒲连,等.叶绿体类囊体腔蛋白功能研究进展[J].西北植物学报,2024,44(1):164-172.
[23] 郝向春,周帅,翟瑜,等.温度变化对南极假山毛榉光合系统的影响[J].中南林业科技大学学报,2019,39(9):1-7.
[24] 徐子涵,刘倩,苗大鹏,等.春兰 miR396 过表达对拟南芥叶片生长、光合及叶绿素荧光特性的影响[J].生物技术通报,2021,37(5):28-37.
[25] 陈昱,樊平声,冯伟民,等.外源硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长和光合荧光特性的影响[J].江苏农业学报,2014,30(6):1402-1409.
[26] 冯胜利,马富裕,方志刚,等.水分胁迫对加工番茄光系统Ⅱ的影响[J].干旱地区农业研究,2009,27(1):163-167.

(上接84页)

[24] MAITRE D C L, WILGEN B W V, GELDERBLOM C M, et al. Invasive alien trees and water resources in South Africa: case studies of the costs and benefits of management[J]. Forest Ecology and Management,2002,160(1/2/3):143-159.
[25] ZAMORANO D, LABRA F A, VILA I, et al. Rivers as a potential dispersing agent of the invasive tree *Acacia dealbata*[J]. Revista Chilena de Historia Natural,2022,95(1).doi:10.1186/s40693-022-00109-7.
[26] 宋颖,张滿隆,贾全全,等.气候变化下花榈木在我国的潜在分布区预测[J].西北林学院学报,2021,36(6):108-115.
[27] 熊巧利,何云玲,邓福英,等.基于 MaxEnt 模型西南地区高山植被对气候变化的响应评估[J].生态学报,2019,39(24):9033-9043.
[28] 刘然,王春晶,何健,等.气候变化背景下中国冷杉属植物地理分布模拟分析[J].植物研究,2018,38(1):37-46.
[29] 闫宇航,岑云峰,张鹏岩,等.基于 MaxEnt 模型的中国马尾松分布格局及未来变化[J].生态学杂志,2019,38(9):2896-2901.
[30] 张晓芹.西北旱区典型生态经济树种地理分布与气候适宜性研究[D].北京:中国科学院大学,2018.
[31] 虞亚楠,陈佳卉,殷晓洁,等.气候变化对中国西南地区主要桦木科乔木树种潜在地理分布的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(2):43-51.
[32] 胡东宇,张丹,薄明森,等.气候变化情景的西伯利亚落叶松潜在分布格局及驱动因素[J].东北林业大学学报,2024,52(1):38-45.
[33] 黄智聪,舒江平,严岳鸿,等.基于最大熵模型的中国兜兰属植物潜在分布模拟[J].热带亚热带植物学报,2024,32(1):17-26.
[34] 陈禹衡,吕一维,殷晓洁.气候变化下西南地区12种常见针叶树种适宜分布区预测[J].南京林业大学学报(自然科学版),2019,43(6):113-120.

东北林业大学学报
(月刊)　(1957年创刊)
第52卷 第8期　2024年8月25日

Journal of Northeast Forestry University
(Monthly)　(Started in 1957)
Vol.52 No.8 Aug. 25, 2024

主管单位：中华人民共和国教育部	Administrated by Ministry of Education, P. R. China
主办单位：东北林业大学	Sponsored by Northeast Forestry University
主　编：宋文龙	Editor-in-Chief: Song Wenlong
副主编：潘　华(常务)	Associate Editor-in-Chief: Pan Hua(Deputy)
编辑出版：东北林业大学学报编辑部 (地址：哈尔滨市和兴路　邮编：150040)	Edited & Published by the Editorial Board of Journal of Northeast Forestry University (26 Hexing Road, Harbin)
印　刷：哈尔滨汇鑫天勤印刷有限公司	Harbin Huixintianqin Printing Co., Ltd.
总发行：哈尔滨市邮政局	Distributed by Harbin Post Office
订　购：全国各地邮局	Sub. Through All-China Post Offices
国外发行：中国教育图书进出口公司 (北京市海淀区北三环中路44号)	Distri. by China Education Books Imp. and Exp. Co. (No.44 North Sanhuan Middle Road, Beijing, China)
发行代号：国内 14-66　国外 JNSC 52	Printing No Dom. 14-66　Foreign JNSC 52

http://dlxb.nefu.edu.cn　电话：(0451)82191712

连续出版物号：ISSN 1000-5382 / CN 23-1268/S　国内定价：30元

ISSN 1000-5382

2.4. 土壤养分、种植年限和种植方式对巴戟天寡糖含量的影响

華南農業大學学报
JOURNAL OF SOUTH CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY

· 双月刊 ·

2021年第3期
（第42卷）

华南农业大学学报
第 42 卷　第 3 期　2021 年 5 月

目　　次

期刊基本参数：CN44 * 1110/S * 1959 * b * A4 * 132 * zh * P * ¥15.00 * 1000 * 15 * 2021-05

JOURNAL OF SOUTH CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY

Vol. 42 No. 3 May 2021

CONTENTS

冼丽铧, 吴道铭, 隆曼迪, 等. 土壤养分、种植年限和种植方式对巴戟天寡糖含量的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 75-85.
XIAN Lihua, WU Daoming, LONG Mandi, et al. Effects of soil nutrients, planting years and methods on oligosaccharide content of *Morinda officinalis* [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(3): 75-85.

土壤养分、种植年限和种植方式对巴戟天寡糖含量的影响

冼丽铧，吴道铭，隆曼迪，曾曙才
(华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642)

摘要:【目的】分析土壤养分、种植年限、种植方式 (林下和非林下) 等 3 个重要因子对巴戟天 *Morinda officinalis* 品质核心指标寡糖含量的影响，为我国“四大南药”之一的巴戟天种植提供理论与数据支撑。【方法】在广东省德庆县巴戟天道地产区选择 18 个非林下种植点，采用随机多点采样法采集土样和不同生长年限巴戟天样品，测定土壤养分和巴戟天肉质根寡糖含量，分析土壤养分含量和不同生长年限与巴戟天寡糖含量的关系；分别采集林下和非林下种植的巴戟天样品，通过主成分分析探究林下和非林下种植方式巴戟天的品质差异。【结果】土壤 pH 与巴戟天蔗糖含量呈极显著的负相关关系 ($P<0.01$)，与寡糖含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$)；土壤全磷、速效磷、速效钾与 1-蔗果三糖、耐斯糖含量呈显著正相关关系 ($P<0.05$)。3 年生巴戟天的蔗糖含量显著高于其他生长年限的巴戟天，4 年生巴戟天的 1-蔗果三糖含量显著高于 2 年生巴戟天。林下种植巴戟天的品质优于非林下种植。【结论】提高土壤中速效磷与速效钾含量可以提高巴戟天品质，4 年生巴戟天的药材品质最佳，林下种植有利于提高巴戟天品质。

关键词: 巴戟天；有效成分；寡糖含量；品质；林下种植；土壤养分
中图分类号: S567.19 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2021)03-0075-11

Effects of soil nutrients, planting years and methods on oligosaccharide content of *Morinda officinalis*

XIAN Lihua, WU Daoming, LONG Mandi, ZENG Shucai
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To analyze the effects of three important factors of soil nutrients, planting years and methods (understory and no understory) on oligosaccharide content which is one of the core index of *Morinda officinalis* quality, provide the theoretical and data supports for cultivation of *M. officinalis* which is one of the “Four Southern Herbs” in China.【Method】This study selected eighteen no understory planting sites in the genuine producing area of *M. officinalis* in Deqing County, Guangdong Province. Soil samples and *M. officinalis* samples of different growth years were collected by random multi-point sampling method. The contents of soil nutrients and oligosaccharides in *M. officinalis* flesh root were determined to analyze the relationships of soil

收稿日期: 2020–07–22 **网络首发时间:** 2021–03–04 14:06:56
网络首发地址: https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.s.20210303.1829.007.html
作者简介: 冼丽铧 (1987—)，女，博士研究生，E-mail: xianlihua@scau.edu.cn；通信作者：曾曙才 (1971—)，男，教授，博士，E-mail: sczeng@scau.edu.cn

基金项目: 广东省财政厅 2017 年广东省岭南中药材保护资金专项 (粤财社 (2017)60 号)

nutrient contents, growth years and oligosaccharides content of *M. officinalis*. In addition, samples in understory and no understory planting sites were collected to explore the quality differences of *M. officinalis* by principal component analysis.【Result】The pH value was highly negatively correlated with sucrose content ($P<0.01$) and positively correlated with oligosaccharide content ($P<0.05$). Total phosphorus, available phosphorus and available potassium in soil were positively correlated with the contents of 1-kestose and nystose ($P<0.05$). The sucrose content of 3-year-old *M. officinalis* was significantly higher than those of other growth years, and 1-kestose content of 4-year-old *M. officinalis* was significantly higher than that of 2-year-old *M. officinalis*. The understory *M. officinalis* showed better quality than that of no understory.【Conclusion】Improving the contents of available P and available K in soil can improve the quality of *M. officinalis*. The quality of 4-year-old *M. officinalis* is the best in our study. Understory planting can improve the quality of *M. officinalis*.

Key words: *Morinda officinalis*; active ingredient; oligosaccharide content; quality; understory planting; soil nutrient

巴戟天 *Morinda officinalis* 别名巴戟、三蔓草、鸡肠风，是双子叶植物纲 Dicotyledoneae、茜草目 Rubiales、茜草科 Rubiaceae 多年生攀援木质藤本植物，是我国“四大南药”之一，以肉质根入药，其主要药效成分为寡糖、多糖蒽醌类、环烯醚萜类等活性物质[1-2]，具有补肝肾、强筋骨、祛风湿、抗衰老、抗肿瘤和治疗糖尿病、精神疾病以及细菌和病毒感染等作用[3-7]。巴戟天种植成本较高，且种植过程中存在开垦山林及乱采滥挖现象，这严重破坏了巴戟天的生长环境[8]。虽然巴戟天是第 1 批受到《广东省岭南中药材保护条例》保护的岭南药材，但其种植面积在逐年减少。土壤养分是影响巴戟天生长的重要环境因素之一，肉桂 *Cinnamomum cassia* 成林速度快，林内土壤动物、微生物种类更为丰富，可有效改善林地内土壤结构，从而提高土壤的肥力，营造出适宜巴戟天生长的种植环境[9]。

近年来，一些学者从巴戟天的药材化学成分及代谢组学[3, 10-12]、种植条件[13-14]、种植模式[15-16] 等方面对巴戟天的有效成分含量进行比较研究，发现合理增加肉桂林种植地的光照量，可抑制藤苗生长，从而提高巴戟天肉质根的产量和有效成分积累，有效成分含量均随种植时间的延长呈上升趋势[16]。林下种植方式是控制种植地光照条件的重要途径之一，而且巴戟天林下种植具有较好的经济效益，解决了坡地连片种植带来的潜在山地环境破坏和水土流失问题，并且提高了巴戟天的产量和药效品质[8, 15]。这一林下生态种植方式为区域中药材的产业化发展提供了新思路。

广东省肇庆市德庆县是巴戟天的主产区，种植巴戟天有着悠久历史，是目前我国种植面积最大、产量最多和品质最好的巴戟天生产基地。本文研究了道地产区土壤养分和生长年限与巴戟天品质的关系，以及林下和非林下种植方式对巴戟天有效成分的影响，以期为巴戟天林下规范化种植提供基础数据和理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究试验地位于广东省肇庆市德庆县，调查采样点分布于 N 23°13′30″~N 23°17′37″，E 111°53′52″~E111°55′45″，海拔 62~166 m。地处亚热带地区，热量丰富、雨热同期、夏长冬短，年平均温度 20~25 ℃，年降雨量 600~2 000 mm，土壤以红壤为主，其次是黄壤。德庆县当地农户种植的巴戟天有 2 个品种，分别是小叶品种‘黑幼籽’与大叶品种‘广宁特’，以小叶品种‘黑幼籽’最为常见。本次研究调查的品种均为‘黑幼籽’，种植密度普遍为株行距 20 cm×30 cm，农家肥与大田复合肥为巴戟天施肥最常用肥料。大田复合肥的施肥量较低，通常为 224~230 kg·hm^{-2}，施肥频率为每年 2~3 次。

1.2 样品采集

于 2018 年 10 月，选取广东省德庆县高良镇以及邻近镇作为研究区域，根据该区域巴戟天种植面积和分布，选取 18 个具有代表性的非林下巴戟天种植点 (表 1)，调查分析土壤养分和种植年限对巴戟天寡糖含量的影响。另外，为了调查分析林下和非林下种植巴戟天的品质差异，在其中 8 个非林下巴戟天种植点的相邻林地上 (相关信息见表 2)，采集了林下种植点样品。巴戟天品种和种植年限以及土壤、坡度、坡向、海拔等均与对应的非林下种植点

表 1　道地产区非林下种植巴戟天采样点基本信息

Table 1　Basic information of sample plot for no understory planting of *Morinda officinalis* in genuine producing areas

采样点编号 Sample plot number	经纬度 Longitude and latitude	村或镇 Village or town	生长年限 Growth year
1	111°58′3″ E，23°18′25″ N	回村 Hui Village	1
2	112°2′12″ E，23°20′49″ N	莫村镇 Mocun Town	5
3	112°7′23″ E，23°20′51″ N	南田村 Nantian Village	4
4	112°2′20″ E，23°20′46″ N	莫村镇 Mocun Town	4
5	112°2′24″ E，23°20′47″ N	莫村镇 Mocun Town	2
6	112°2′22″ E，23°20′39″ N	莫村镇 Mocun Town	2
7	112°2′36″ E，23°20′44″ N	莫村镇 Mocun Town	5
8	112°5′49″ E，23°20′50″ N	荔枝村 Litchi Village	3
9	112°2′36″ E，23°20′53″ N	莫村镇 Mocun Town	5
10	112°2′39″ E，23°20′59″ N	莫村镇 Mocun Town	6
11	112°2′40″ E，23°21′0″ N	莫村镇 Mocun Town	2
12	112°2′54″ E，23°21′2″ N	莫村镇 Mocun Town	3
13	112°3′5″ E，23°21′23″N	莫村镇 Mocun Town	3
14	111°55′21″ E，23°15′55″ N	高良镇 Gaoliang Town	5
15	111°55′45″E，23°14′18″ N	蓢浪村 Tanlang Village	5
16	111°55′11″ E，23°13′36″ N	中雄村 Zhongxiong Village	4
17	111°55′31″ E，23°13′42″ N	中雄村 Zhongxiong Village	4
18	111°54′54″ E，23°15′0″ N	年宅村 Nianzhai Village	5

表 2　林下种植巴戟天采样点基本信息

Table 2　Basic information of sample plot for understory planting of *Morinda officinalis*

采样点编号 Sample plot number	经纬度 Longitude and latitude	村或镇 Village or town	伴生植物 Associated plant	透光度/% Transparency	生长年限 Growth year
1	111°55′45″E, 23°17′37″N	降底村 Jiangdi Village	杉木 *Cunninghamia lanceolata*、马尾松 *Pinus massoniana*	57.59	2
2	111°54′8″E, 23°17′34″N	大揽村 Dalan Village	火炬松 *Pinus taeda*、山菅兰 *Dianella ensifolia*	37.91	2
3	111°53′52″E, 23°15′29″N	高良镇 Gaoliang Town	肉桂 *Cinnamomum cassia*、青皮竹 *Bambusa textilis*	25.34	3
4	111°55′45″E, 23°14′18″N	蓢浪村 Tanlang Village	肉桂 *C. cassia*、马尾松 *P. massoniana*、山苍子 *Litsea cubeba*	35.89	5
5	111°55′31″E, 23°14′11″N	蓢浪村 Tanlang Village	肉桂 *C. cassia*、火炬松 *P. taeda*、五指毛桃 *Ficus simplicissima*	36.15	5
6	111°55′11″E, 23°13′36″N	中雄村 Zhongxiong Village	杉木 *C. lanceolata*、乌毛蕨 *Blechnum orientale*	33.39	4
7	111°55′10″E, 23°13′30″N	中雄村 Zhongxiong Village	橄榄 *Canarium album*、山麻黄 *Psilopeganum sinense*、五指毛桃 *F. simplicissima*	79.07	4
8	111°54′54″E, 23°15′0″N	年宅村 Nianzhai Village	阴香 *Cinnamomum burmanni*、肉桂 *C. cassia*、荔枝 *Litchi chinensis*、乌毛蕨 *B. orientale*	61.38	5

一致。在选定的地点，采用随机多点 (5~8 个点) 采样法，在根系外围采集 0~20 cm 深的土壤，将土壤混匀并用四分法采集分析样品。土壤样品自然风干后，去除植物根系、落叶及石块等杂质，研磨，分别过 1.00 和 0.25 mm 筛，保存备用。同时在采样点随机整株挖取 5 株巴戟天。巴戟天肉质根用自来水清洗 3 次、去离子水润洗 1 次后，擦干。去除肉质根的木心部分，烘干，粉碎，过 0.25 mm 筛，待用。

1.3 样品分析

1.3.1 土壤养分含量分析 土壤样品的养分含量分析按照《土壤农化分析》[17] 进行，具体为：称取 10 g 过 1 mm 筛的土壤，加入 25 mL 无二氧化碳去离子水浸提，利用 pH 计测定土壤 pH；称取 1 g 过 0.25 mm 筛的土壤，采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量；称取 2 g 过 1 mm 筛的土壤，采用碱解扩散法测定土壤碱解氮含量；称取 1 g 过 0.25 mm 筛的土壤，采用高氯酸-氢氟酸消煮-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量；称取 2 g 过 1 mm 筛的土壤，采用氟化铵-盐酸浸提-钼锑抗比色法测定速效磷含量；称取 0.25 g 过 0.25 mm 筛的土壤，采用高氯酸-氢氟酸消煮-火焰光度法测定土壤全钾含量；称取 5 g 过 1 mm 筛的土壤，采用乙酸铵浸提-火焰光度法测定速效钾含量；称取 0.5 g 过 0.25 mm 筛的土壤，采用重铬酸钾氧化外加热法测定土壤有机质含量。

1.3.2 巴戟天肉质根品质成分分析 巴戟天肉质根全氮含量采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮-奈氏试剂比色法测定；全磷含量采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮-钼锑抗比色法测定；全钾采用 H_2SO_4-H_2O_2 消煮-原子吸收法测定。肉质根寡糖含量参照李倩[18] 采用高效液相色谱-蒸发光散射法测定，通过峰面积计算样品中蔗糖、1-蔗果三糖、耐斯糖以及 1^F-果呋喃糖基耐斯糖的含量。

1.4 数据分析方法

试验数据采用 Excel 2017 和 SPSS 25.0 软件进行整理和统计分析，采用单因素方差分析 (One-way ANOVA)，用 Duncan's 多重极差检验法比较巴戟天品质指标的差异性；土壤养分与巴戟天品质指标的相关性则采用 Pearson 法进行分析；林下和非林下品质指标之间的差异性采用配对样本 t 检验法进行比较。

在采用主成分分析法进行综合评价时，选取反映巴戟天品质综合评估值的 n 个指标为 X_1, X_2, …, X_n, m 个生长年限和种植环境的 n 项指标构成原始数据矩阵 $X=[X_{ij}]_{n\times m}$，其中，X_{ij} 为第 i 个模式的第 j 项指标数据 (i=1, 2, …, n; j=1, 2, …, m)。按公式 (1) 对原始数据进行标准化，从而消除量纲和数量级的影响，然后确定主成分，从总方差分析表选取累积贡献率 ≥ 85% 的前 p 个主成分，按公式 (2) 在建立 p 个主成分和标准化变量的关系后，按公式 (3) 确定权重，用第 k 个主成分的贡献率与选取的 p 个主成分的总贡献率的比值确定每个主成分的权重，最后按公式 (4) 构造综合评价函数，根据前 p 个主成分及其权重构造综合评价函数[19]。

$$X_{ij}^* = (X_{ij} - \overline{X_j})/S_j, \tag{1}$$

式中，X_{ij}^*是 X_{ij} 的标准化数据，$\overline{X_j}$和 S_j 是第 j 个指标的平均值和标准差。

$$Y_k = u_{k_1}\boldsymbol{X}_1^* + u_{k_2}\boldsymbol{X}_2^* + \cdots + u_{k_m}\boldsymbol{X}_m^*, \tag{2}$$

式中，Y_k 是第 k 个主成分 (k=1, 2, …, p)，u_{k_1}~u_{k_m} 分别为第 k_1~k_m 个主成分的因子荷载，X_1^*~X_m^*均为标准化后的样本矩阵。

$$\omega_k = \lambda_k / \sum_{k=1}^{p} \lambda_k, \tag{3}$$

式中，ω_k 为第 k 个主成分的权重，λ_k 为第 k 个主成分的贡献率。

$$F = \sum_{k=1}^{p} \omega_k Y_k, \tag{4}$$

式中，F 为不同生长年限和种植环境的巴戟天品质综合评价得分，分值越高表明该条件下的巴戟天品质越好。

2 结果与分析

2.1 道地产区土壤养分含量

广东省德庆县是巴戟天道地产区。由表 3 可知，所收集到的土壤样品 pH 在 4.08~4.90 之间，差异较小，说明巴戟天适合种植在酸性土壤中。土壤有机质质量分数大部分在 26~46 g·kg^{-1} 之间，11 号样品有机质质量分数达到 75.15 g·kg^{-1}。土壤全氮、全磷、全钾的含量差异较大，这可能与当地的自然环境、施肥情况密切相关。

2.2 巴戟天品质成分含量

巴戟天药材中全氮质量分数为 2.81~12.30 g·kg^{-1}，全磷质量分数为 0.12~0.71 g·kg^{-1}，全钾质量分数为 6.13~13.20 g·kg^{-1}；巴戟天药材中 4 种寡糖成分含量差异较大，蔗糖质量分数为 34.06~76.16 g·kg^{-1}，1-蔗果三糖质量分数为 9.99~59.30 g·kg^{-1}，耐斯糖质量分数为 27.93~69.41 g·kg^{-1}，符合 2015 年版《中华人民共和国药典》巴戟天干燥品耐斯糖含量不得少于 2.0% 的要求[20]；1^F-果呋喃糖基耐斯

表 3　巴戟天道地产区土壤 pH 和养分含量

Table 3　Soil pH and nutrient content in genuine producing areas of *Morinda officinalis*

样品序号 Sample number	土壤类型 Soil type	pH	$w/(g\cdot kg^{-1})$				$w/(mg\cdot kg^{-1})$		
			全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	有机质 Organic matter	碱解氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K
1	红壤 Red soil	4.45	1.55	0.43	14.60	26.95	153.60	5.80	123.55
2	红壤 Red soil	4.25	1.91	0.62	11.18	27.72	157.52	46.26	154.32
3	红壤 Red soil	4.33	2.53	0.22	8.58	33.86	197.31	3.04	66.55
4	红壤 Red soil	4.50	2.35	0.25	9.13	43.09	188.70	4.67	68.00
5	红壤 Red soil	4.18	1.66	0.41	12.47	40.50	169.55	27.29	99.43
6	红壤 Red soill	4.10	2.00	0.20	12.89	30.25	199.93	3.62	71.67
7	红壤 Red soil	4.52	2.11	0.46	18.21	26.82	168.97	12.47	89.65
8	红壤 Red soil	4.51	2.06	0.26	10.05	37.04	202.02	11.27	131.75
9	红壤 Red soil	4.40	2.09	0.25	9.99	37.12	175.84	6.47	142.88
10	红壤 Red soil	4.25	1.40	0.21	17.32	36.23	342.07	3.45	74.70
11	红壤 Red soil	4.18	4.08	0.33	11.16	75.15	230.14	12.27	90.12
12	黄壤 Yellow soil	4.12	2.41	0.47	14.63	46.04	225.33	29.39	186.59
13	黄壤 Yellow soil	4.25	2.07	0.32	12.33	46.31	192.76	24.72	140.38
14	红壤 Red soil	4.08	1.06	0.27	6.78	37.05	162.21	14.09	90.78
15	红壤 Red soil	4.56	0.88	0.49	9.65	23.64	78.15	17.85	123.57
16	红壤 Red soil	4.66	2.70	0.66	7.17	33.68	118.69	38.14	146.22
17	红壤 Red soil	4.69	1.31	0.76	6.75	32.77	118.48	41.00	151.24
18	红壤 Red soil	4.68	1.47	0.47	4.99	28.03	136.20	32.77	136.34
平均值 Mean		4.37	1.98	0.39	10.99	36.79	178.75	18.59	115.99
最小值 Minimum		4.08	0.88	0.20	4.99	23.64	78.15	3.04	66.55
最大值 Maximum		4.69	4.08	0.76	18.21	75.15	342.07	46.26	186.59
标准误差 Standard error		0.01	0.04	0.01	0.20	0.65	3.13	0.79	1.97
变异系数/% Coefficient of variation		4.71	36.73	42.21	33.12	31.66	31.48	76.44	30.59

糖质量分数为 46.60~97.12 $g\cdot kg^{-1}$(表 4)。

2.3　巴戟天品质与土壤养分含量的相关性分析

从相关性分析结果 (表 5) 可以看出，土壤养分含量与巴戟天营养元素含量密切相关，其中，土壤全磷、速效磷、速效钾含量与巴戟天全氮含量均表现出极显著正相关关系，土壤速效钾含量与巴戟天全磷含量之间以及土壤全钾含量与巴戟天全钾含量之间均具有极显著正相关关系。土壤养分含量与巴戟天寡糖含量密切相关，其中，土壤碱解氮含量与巴戟天蔗糖含量呈极显著正相关关系，但却与耐斯糖和 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量呈显著负相关关系。土壤全磷、速效磷、速效钾含量与巴戟天 1-蔗果三糖含量均表现出极显著正相关关系，与耐斯糖含量表现出极显著或显著正相关关系。值得注意的是，土壤 pH 与巴戟天营养元素没有显著相关关系，但与巴戟天寡糖呈显著相关关系，其中，土壤 pH 与蔗糖含量表现出极显著的负相关关系，与 1-蔗果三糖、耐斯糖以及 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量均有显著或极显著的正相关关系，说明随着土壤 pH 的增加蔗糖含量降低，而 1-蔗果三糖、耐斯糖与 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量却呈增加趋势。另外，土壤有机质含量与巴戟天品质指标之间相关关系不显著，说明土壤有机质含量对巴戟天品质影响不大。

表 4 道地产区巴戟天肉质根全氮、全磷、全钾和寡糖含量

Table 4 Total N, total P, total K and oligosaccharide contents of succulent root of *Morindus officinalis* in genuine producing areas

$w/(g\cdot kg^{-1})$

样品序号 Sample number	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	蔗糖 Sucrose	1-蔗果三糖 1-Kestose	耐斯糖 Nystose	1^F-果呋喃糖基耐斯糖 1^F- Fructo-furanosaccharides
1	3.97	0.26	6.47	54.35	24.62	52.62	80.44
2	9.22	0.60	11.61	57.72	29.51	43.25	57.77
3	7.32	0.33	9.16	50.73	12.58	27.93	46.60
4	4.30	0.31	6.36	50.04	16.65	48.37	74.99
5	3.97	0.23	11.82	52.18	14.44	51.72	85.78
6	4.75	0.26	9.69	57.43	21.47	49.55	75.85
7	5.93	0.38	13.20	46.25	10.64	29.77	47.46
8	4.09	0.22	8.28	59.65	21.73	51.75	81.96
9	5.96	0.56	10.80	57.72	19.69	42.22	67.56
10	7.90	0.34	10.64	65.43	28.93	37.91	55.72
11	6.30	0.42	8.26	51.73	18.17	42.33	69.34
12	12.30	0.68	13.19	76.16	34.97	43.91	58.06
13	9.84	0.71	11.65	56.42	21.83	46.15	72.50
14	2.81	0.22	6.47	46.33	9.99	31.85	53.77
15	8.77	0.47	6.13	34.06	40.60	62.00	95.48
16	11.70	0.61	9.31	46.49	46.79	65.46	97.12
17	12.33	0.54	9.05	45.33	59.30	69.41	95.10
18	11.99	0.12	6.58	34.09	42.18	58.77	87.70
平均值 Mean	7.41	0.40	9.37	52.34	26.34	47.50	72.40
最小值 Minimum	2.81	0.12	6.13	34.06	9.99	27.93	46.60
最大值 Maximum	12.33	0.71	13.20	76.16	59.30	69.41	97.12
标准误差 Standard error	0.18	0.01	0.13	0.56	0.76	0.65	0.92
变异系数/% Coefficient of variation	43.51	44.07	25.36	19.27	51.83	24.64	22.75

表 5 巴戟天品质与土壤养分含量的相关性分析[1)]

Table 5 Correlation analysis between *Morinda officinalis* quality and soil nutrient contents

指标 Index	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	蔗糖 Sucrose	1-蔗果三糖 1-Kestose	耐斯糖 Nystose	1^F-果呋喃糖基耐斯糖 1^F- Fructofuranosaccharides
pH	0.373	−0.027	−0.349	−0.595**	0.578*	0.596**	0.570*
全氮 Total N	0.012	0.246	0.213	0.279	−0.246	−0.223	−0.193
碱解氮 Available N	−0.192	−0.079	0.345	0.712**	−0.384	−0.554*	−0.570*
全磷 Total P	0.651**	0.424	0.105	−0.303	0.749**	0.609**	0.455
速效磷 Available P	0.700**	0.455	0.241	−0.156	0.650**	0.513*	0.366
全钾 Total K	−0.228	0.111	0.593**	0.570*	−0.363	−0.431	−0.458
速效钾 Available K	0.645**	0.610**	0.254	0.178	0.614**	0.471*	0.324
有机质 Organic matter	−0.079	0.179	0.086	0.313	−0.258	−0.193	−0.131

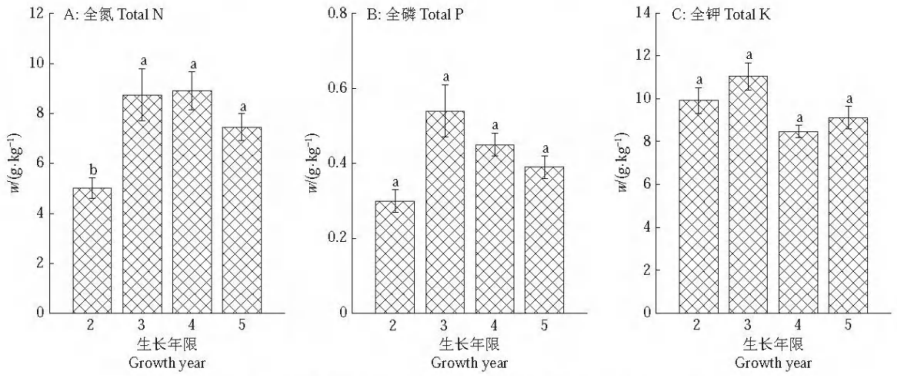
1) “*”和“**”分别表示达0.05和0.01水平的显著相关(Pearson法)

1) “*” and “**” indicate significant correlations at 0.05 and 0.01 levels, respectively (Pearson method)

2.4 不同生长年限巴戟天的品质指标含量

本次调查采集的是非林下种植环境的 18 个样地，巴戟天的生长年限包含 1 至 6 年生，由于 1 年生和 6 年生的仅有 1 个样点，故仅分析 2~5 年生巴戟天肉质根的营养元素和寡糖含量。

2.4.1 不同生长年限巴戟天药材中的营养元素含量 由图 1 可见，随着巴戟天生长年限的增长，其药用部分肉质根对全氮、全磷、全钾吸收积累量呈



各图中，柱子上方的不同小写字母表示生长年限间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences among different growth years ($P<0.05$, Duncan's method)

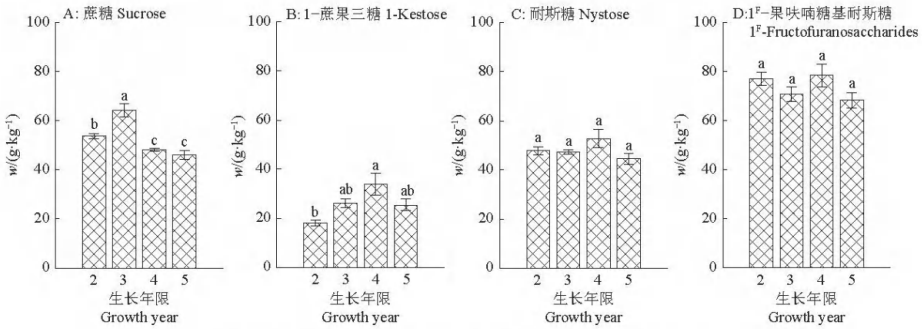
图 1　不同生长年限巴戟天药材营养元素含量

Fig. 1　Nutrient element contents in *Morinda officinalis* of different growth years

现先升高后降低的趋势，整体表现为全钾>全氮>全磷。2 年生巴戟天的全氮含量显著低于其他生长年限的，其他处理间的全氮含量没有显著性差异。全磷含量、全钾含量在不同生长年限之间无显著差异，但均在 3 年生时达到最大值，分别为 0.54、11.04 $g\cdot kg^{-1}$。

2.4.2　不同生长年限巴戟天药材中的寡糖含量

由图 2 可以看出，巴戟天生长年限不同，寡糖类成分含量各异。随着巴戟天生长年限的增加，蔗糖、1-蔗果三糖含量变化均呈现出先增加后下降的趋势。其中，蔗糖含量为 3 年生巴戟天最高，质量分数达到 64.08 $g\cdot kg^{-1}$，显著高于其他生长年限的，同时，2 年生巴戟天蔗糖含量显著高于 4 年生和 5 年生的，而 4 年生与 5 年生巴戟天的蔗糖含量之间无显著差异。在 1-蔗果三糖含量上，4 年生巴戟天显著高于 2 年生巴戟天 (高出 76.96%)，4 年生巴戟天达到 32.68 $g\cdot kg^{-1}$，与 3 年生、5 年生巴戟天没有显著差异，2 年生、3 年生与 5 年生巴戟天之间无显著差异。不同生长年限的巴戟天在耐斯糖和 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量上没有显著差异。



各图中，柱子上方的不同小写字母表示生长年限间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

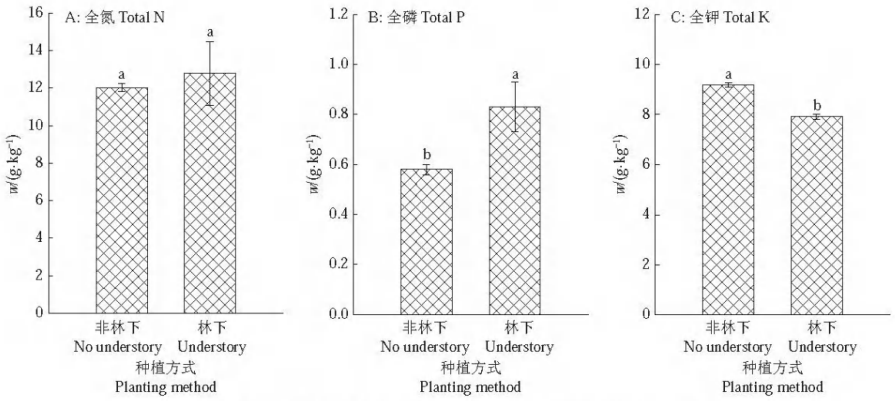
In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences among different growth years ($P<0.05$, Duncan's method)

图 2　不同生长年限巴戟天寡糖含量

Fig. 2　Oligosaccharide contents in *Morinda officinalis* of different growth years

2.5　林下与非林下种植巴戟天品质及其主成分分析

2.5.1　林下与非林下种植巴戟天的营养元素和寡糖含量　由于生产上巴戟天收获年龄为 4 年生，故本研究选择 4 年生的林下与非林下种植的巴戟天进行品质分析。林下与非林下种植的巴戟天全磷含量与全钾含量差异显著 (图 3)，林下种植的巴戟天全磷含量比非林下种植巴戟天高 44.79%，而全钾含量比非林下巴戟天低 13.78%，全氮含量无显著差异。



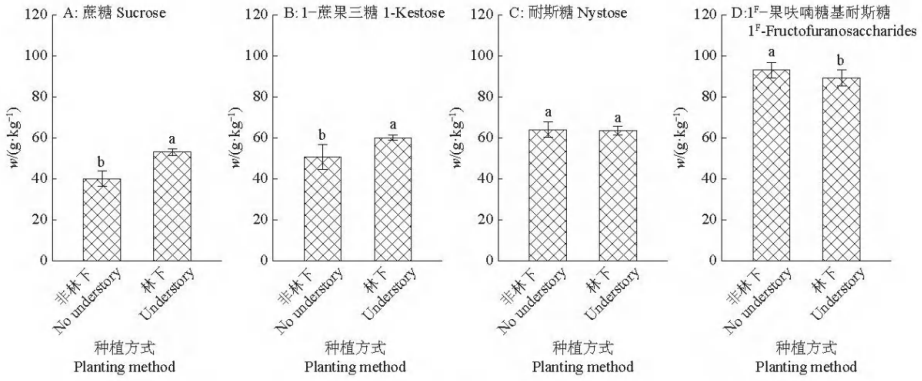
各图中，柱子上方的不同小写字母表示种植方式间差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences between different planting methods (P<0.05, Duncan's method)

图 3 不同种植方式对 4 年生巴戟天营养元素含量的影响

Fig. 3 Effects of different planting methods on nutrient element contents of 4-year-old *Morinda officinalis*

由图 4 可以看出，林下与非林下种植的巴戟天除耐斯糖含量没有显著差异外，其他寡糖含量间均有显著差异。其中，林下种植的 4 年生巴戟天蔗糖和 1-蔗果三糖质量分数分别达到 53.14 和 60.22 g·kg^{-1}，分别高出非林下种植巴戟天 32.49% 和 18.68%。而 1^{F}-果呋喃糖基耐斯糖含量却低于非林下巴戟天 3.97%。



各图中，柱子上方的不同小写字母表示种植方式间差异显著 (P<0.05, Duncan's 法)

In each figure, different lowercase letters on the columns indicate significant differences between different planting methods (P<0.05, Duncan's method)

图 4 不同种植方式对 4 年生巴戟天寡糖含量的影响

Fig. 4 Effects of different planting methods on oligosaccharide content of 4-year-old *Morinda officinalis*

2.5.2 林下与非林下种植巴戟天品质的主成分分析 主成分分析是对多个变量进行统计分析的一类定量分析方法，通过分析主成分载荷值和得分可以看出不同样品之间的关系，也可以解释样品的特点、分组、相似性及差别[21-22]。将巴戟天品质指标转化为 7 个主成分，分析结果如表 6。7 种指标可以提取出 2 种主成分，累计贡献率为 85.776%。

为了更好地解释各品质指标与成分因子之间的关系，将所提取的主成分因子进行旋转处理，使一个变量在较少的几个因子上有较高的载荷，其载荷值的大小反映各有效成分指标在主成分中的重要程度 (表 7)。通过主成分分析可知，前 2 个主成分反映了 7 个指标的大部分综合信息，用 2 个主成分评价不同种植方式下巴戟天品质的优劣是可行的。因此，可用营养因子 (F_1)、寡糖因子 (F_2) 代替原来 7 个指标 (X_1~X_7) 对巴戟天的品质进行分析，得到巴戟天品质前 2 个主成分的线性关系式分别为：

表 6　巴戟天品质指标的主成分初始特征值及累计贡献率

Table 6　Initial characteristic values and cumulative contribution rates of principal components of *Morinda officinalis* quality index

变量[1)] Variable	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Squared sum of extracted load		
	特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	特征值 Eigen value	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
X_1	3.264	46.632	46.632	3.264	46.632	46.632
X_2	2.740	39.144	85.776	2.740	39.144	85.776
X_3	0.776	11.079	96.855			
X_4	0.166	2.370	99.225			
X_5	0.043	0.609	99.834			
X_6	0.011	0.159	99.993			
X_7	0.000	0.007	100.000			

1)X_1: 全氮；X_2: 全磷；X_3: 全钾；X_4: 蔗糖；X_5: 1-蔗果三糖；X_6: 耐斯糖；X_7: 1^F-果呋喃糖基耐斯糖

1)X_1: Total N; X_2: Total P; X_3: Total K; X_4: Sucrose; X_5: 1-Kestose; X_6: Nystose; X_7: 1^F- Fructofuranosaccharides

表 7　巴戟天品质指标前 2 个主成分的载荷值

Table 7　Load values of the first two principal components of *Morinda officinalis* quality index

评价指标 Evaluation index	载荷值 Loading value	
	第一主成分 The first principal component	第二主成分 The second principal component
全氮 Total N	0.41	−0.15
全磷 Total P	0.52	0.17
全钾 Total K	−0.42	−0.11
蔗糖 Sucrose	0.36	0.45
1-蔗果三糖 1-Kestose	0.10	0.59
耐斯糖 Nystose	−0.28	0.51
1^F-果呋喃糖基耐斯糖 1^F- Fructofuranosaccharides	−0.42	0.36

$F_1=0.41X_1+0.52X_2-0.42X_3+0.36X_4+0.10X_5-0.28X_6-0.42X_7$,

$F_2=-0.15X_1+0.17X_2-0.11X_3+0.45X_4+0.59X_5+0.51X_6+0.36X_7$。

以每个主成分对应的特征值的方差提取贡献率建立综合评价模型：

$F=0.15X_1+0.36X_2-0.28X_3+0.40X_4+0.32X_5+0.08X_6-0.06X_7$。

计算林下与非林下种植方式下巴戟天品质的综合评分 (表 8)，得到不同种植方式下巴戟天品质特征的优劣顺序：7 号样地林下种植巴戟天>6 号样地林下种植巴戟天>6 号样地非林下种植巴戟天>7 号

表 8　4 年生巴戟天品质指标前 2 个主成分得分与排名

Table 8　Scores and rankings of the first two principal components in the quality index of 4-year-old *Morinda officinalis*

采样点编号 Sample plot number	种植方式 Planting method	第一主成分 The first principal component		第二主成分 The second principal component		综合得分 Synthesis score	排名 Rank
		得分 Score	排名 Rank	得分 Score	排名 Rank		
6	非林 No understory	−1.58	4	1.09	2	−0.36	3
	林下 Understory	−0.33	2	1.43	1	0.48	2
7	非林下 No understory	−0.87	3	−2.58	4	−1.65	4
	林下 Understory	2.78	1	0.07	3	1.54	1

样地非林下种植巴戟天。说明，林下种植的巴戟天品质优于同条件下非林下种植的巴戟天。

3 讨论与结论

3.1 讨论

土壤理化性质是反映土壤养分的重要指标，土壤养分是植物生长发育的主要营养来源，同时也是创造优质高产必备的物质条件之一，研究其对巴戟天品质的影响有非常积极的意义。本研究表明，巴戟天品质与土壤养分关系密切，这与刘瑾等[23-24]的研究结果一致。药理研究显示，巴戟天寡糖具有抗抑郁功效，其主要发挥功能的糖分为四~七糖[25]，如耐斯糖 (简称：四糖)、1-果呋喃糖基耐斯糖 (简称：五糖)，土壤碱解氮与巴戟天蔗糖含量呈极显著正相关关系，但与耐斯糖和 1^F-果呋喃糖基耐斯糖呈显著负相关关系，故减少土壤碱解氮的含量有利于巴戟天抗抑郁成分的积累。而土壤全磷、速效磷、速效钾对巴戟天 1-蔗果三糖、耐斯糖均表现出显著的正相关关系，表明提高土壤磷和钾的有效性，有助于促进巴戟天寡糖累积。土壤的酸碱性对巴戟天品质的影响较大，巴戟天更适合种植于弱酸性土壤中[26]，与研究发现弱酸性的红壤或棕壤较适宜巴戟天的生长一致[15]。土壤 pH 与巴戟天根部营养元素含量无显著相关性，与蔗糖含量呈现出极强的负相关性，而与另外其他 3 种寡糖之间具有正相关关系，说明当土壤呈弱酸性时，会降低巴戟天根部的蔗糖含量，但会提高 1-蔗果三糖、耐斯糖与 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量。土壤有机质是土壤肥力的重要组成部分，能够使植株正常生长发育，保证植物在生长过程中的养分需求[27]，但与巴戟天品质指标没有显著相关性。

不同生长年限的林下种植巴戟天的 1-蔗果三糖和耐斯糖含量均大于同年生的非林下巴戟天，说明林下巴戟天从土壤中获取的养分较非林下巴戟天的多，从而使更多的单糖转化为 1-蔗果三糖与耐斯糖。随着巴戟天生长年限的增加，巴戟天营养元素及寡糖含量呈现先增加后减少的变化趋势。这与玉竹 *Polygonatum odoratum*、川党参 *Codonopsis pilosula*[28] 等药用植物有效成分积累的趋势一致，这主要是因为巴戟天生长前期 (第 1~4 年) 通过植物光合作用不断贮存营养物质，而进入衰老期 (第 5 年) 后营养物质的消耗量大于累积量，导致有效成分含量下降。此外，巴戟天药材中发挥抗痴呆、抗抑郁、保护生殖系统等功效的成分主要是低聚糖[29-31]，而低聚糖需要由单糖在一系列酶的催化下才能逐渐被合成，只有经过种植年限的积累，低聚糖含量才会升高，且巴戟天药材种植 4 年后其有效药用成分均能满足《中华人民共和国药典》[20] 巴戟天干燥品耐斯糖含量不得少于 2.0% 的要求，故 4 年生巴戟天获得的药材质量最佳。

通过对不同种植方式下同年生巴戟天品质特征进行分析，林下种植的 4 年生巴戟天全磷、蔗糖、1-蔗果三糖含量显著高于非林下种植的，全钾、1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量却显著低于非林下种植的，可能是因为植物营养元素与有效成分并不是独立发挥作用，各成分之间具有一定相关性[32]，从而导致不同种植方式对巴戟天品质特征物质含量有不同的促进作用。树林的郁闭度较大，为林下巴戟天提供了很好的遮荫效果，起到降温保湿的作用[33]，这是林下种植的巴戟天有效成分含量优于非林下种植巴戟天的原因之一。

3.2 结论

土壤养分对巴戟天肉质根养分和寡糖含量有不同的影响，其中土壤 pH 与蔗糖含量表现出极显著的负相关性，与 1-蔗果三糖、耐斯糖以及 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量呈显著正相关性。土壤全磷、速效磷、速效钾含量与 1-蔗果三糖和耐斯糖含量呈显著正相关关系，表明在巴戟天生长过程中可以通过增加土壤速效磷与速效钾含量以提高其品质。不同生长年限的巴戟天肉质根全氮、全磷、全钾含量没有显著差异，而 3 年生巴戟天蔗糖含量显著高于其他生长年限的巴戟天，4 年生巴戟天的 1-蔗果三糖含量显著高于 2 年生巴戟天。林下与非林下种植的巴戟天肉质根全氮、全磷、全钾、蔗糖、1-蔗果三糖、耐斯糖和 1^F-果呋喃糖基耐斯糖含量无一致规律，但主成分分析法综合评分结果显示，林下种植巴戟天品质优于非林下种植的巴戟天。

参考文献：

[1] 陈志霞, 林励. 巴戟天的研究进展[J]. 中药材, 2001, 24(3): 209-211.

[2] 冯鸿耀, 曾令杰, 黄涵, 等. 巴戟天根、茎、叶中甲基异茜草素、水晶兰苷、多糖的分布与积累研究[J]. 华西药学杂志, 2017, 32(2): 208-210.

[3] 冉志芳, 杨小彤, 许子欣, 等. 不同产地巴戟天中微量元素比较分析[J]. 中华中医药杂志, 2019, 34(7): 2954-2958.

[4] 伍淳操, 吴文辉, 刘霞, 等. 巴戟天酒制炮制方法研究[J]. 中华中医药杂志, 2018, 33(1): 97-99.

[5] 赖满香, 阮志燕, 许意平. 补肾中药巴戟天药理作用研究进展[J]. 亚太传统医药, 2017, 1(13): 63-64.

[6] SINGH B, SHARMA R A. Indian *Morinda* species: A review[J]. Phytotherapy Research, 2019, 34(5): 924-1007.

[7] XU H L, LIU L L, CHEN Y X, et al. The chemical character of polysaccharides from processed *Morinda officinalis* and their effects on anti-liver damage[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 141: 410-421.

[8] 林仁昌. 永定县野生巴戟天资源短缺原因与林下种植思路[J]. 现代农业科技, 2013(11): 218-220.

[9] 陈立金, 江海涛, 李丽娟, 等. 马尾松肉桂人工复层林土壤理化性质的研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(11): 45-47.

[10] WANG M Y, WANG Q L, YANG Q, et al. Comparison of anthraquinones, iridoid glycosides and triterpenoids in *Morinda officinalis* and *Morinda citrifolia* using UPLC/Q-TOF-MS and multivariate statistical analysis[J]. Molecules, 2020, 25(1): 160.

[11] YIP K M, XU J, ZHOU S S, et al. Characterization of chemical component variations in different growth years and tissues of *Morindae officinalis* radix by integrating metabolomics and glycomics[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 67(26): 7304-7314.

[12] 高新开, 叶家宏, 曹子丰. 巴戟天环烯醚萜苷类及蒽醌类成分 HPLC 指纹图谱研究[J]. 中药新药与临床药理, 2014, 25(3): 315-318.

[13] 宫璐, 汪鹏, 谭瑞湘, 等. 南药巴戟天的全球产地区划[J]. 世界中医药, 2017, 12(5): 986-988.

[14] 丁平, 潘超美, 徐鸿华. 不同生物有机肥料对巴戟天主要有效成分的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2003, 17(4): 21-22.

[15] 邵玲, 李美映, 黎学荣, 等. 肇庆巴戟天两种种植模式的植物学性状及药效成分研究[J]. 中药材, 2019, 42(11): 2480-2485.

[16] 李美映, 邵玲, 林培华, 等. 种植模式对巴戟天生长的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(2): 163-170.

[17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

[18] 李倩. 巴戟天炮制过程中化学成分变化规律的研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2015.

[19] 黄钰辉, 张卫强, 甘先华, 等. 南亚热带杉木林分改造中不同树种组合模式评价[J]. 生态环境学报, 2016, 25(6): 956-964.

[20] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2015.

[21] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2000.

[22] 王树刚, 王振林, 王平, 等. 不同小麦品种对低温胁迫的反应及抗冻性评价[J]. 生态学报, 2011, 31(4): 1064-1072.

[23] 刘瑾, 丁平, 邵艳华, 等. 巴戟天不同产地土壤理化性质对其质量的影响[J]. 现代中药研究与实践, 2011, 25(4): 3-5.

[24] 刘瑾. 巴戟天道地药材形成的生态因子及分子机制研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2009.

[25] 章润菁. 不同产地巴戟天资源调查及质量评价研究[D]. 广州: 广州中医药大学, 2016.

[26] 罗新华, 陈瑞云. 巴戟天栽培技术[J]. 福建农业, 2010(8): 20-21.

[27] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 等. 土壤质量与土壤质量指标及其评价[J]. 生态学报, 2006, 26(3): 901-913.

[28] 吴凤云, 邱丽莎, 崔秀明, 等. 白及品质特征影响因素研究[J]. 中国医院药学杂志, 2016, 36(21): 1838-1844.

[29] WU Z, CHEN D, LIN F, et al. Effect of bajijiasu isolated from *Morinda officinalis* F. C. how on sexual function in male mice and its antioxidant protection of human sperm[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2015, 164: 283-292.

[30] XU L, XU D, HAN Y, et al. BDNF-GSK-3 beta-beta-catenin pathway in the mPFC is involved in antidepressant-like effects of *Morinda officinalis* oligosaccharides in rats[J]. International Journal of Neuropsycho-pharmacology, 2017, 20(1): 83-93.

[31] 陈地灵, 张鹏, 林励, 等. 巴戟天低聚糖对 A β_{25-35} 致拟痴呆模型大鼠的保护作用[J]. 中国中药杂志, 2013, 38(9): 1306-1309.

[32] 罗世琼, 林爱兰, 姚永红. 野生黄花蒿抗氧化成分与植株养分的相关性分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1622-1626.

[33] 王晖, 姜武, 陶正明, 等. 淳安县林下中药材复合种植模式[J]. 浙江农业科学, 2017, 58(7): 1190-1191.

【责任编辑　李晓卉】

華南農業大學学报

JOURNAL OF SOUTH CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY

华南农业大学学报

Huanan Nongye Daxue Xuebao

（双月刊，1959 年创刊，1980 年复刊）

第 42 卷　第 3 期　2021 年 5 月

Journal of South China Agricultural University

(Bimonthly, Started 1959, Resumed 1980)

Vol.42 No.3 May 2021

主管单位：华南农业大学
主办单位：华南农业大学
主　　编：刘雅红
编辑出版：华南农业大学学报编辑部
地　　址：广州市天河区五山路483号(510642)
网　　址：http://xuebao.scau.edu.cn
电子邮箱：journal@scau.edu.cn
电　　话：(020)85280069/38746672
印刷单位：广州一龙印刷有限公司
发行订购：华南农业大学学报编辑部
国外发行：中国国际图书贸易总公司
（中国国际书店）北京399信箱

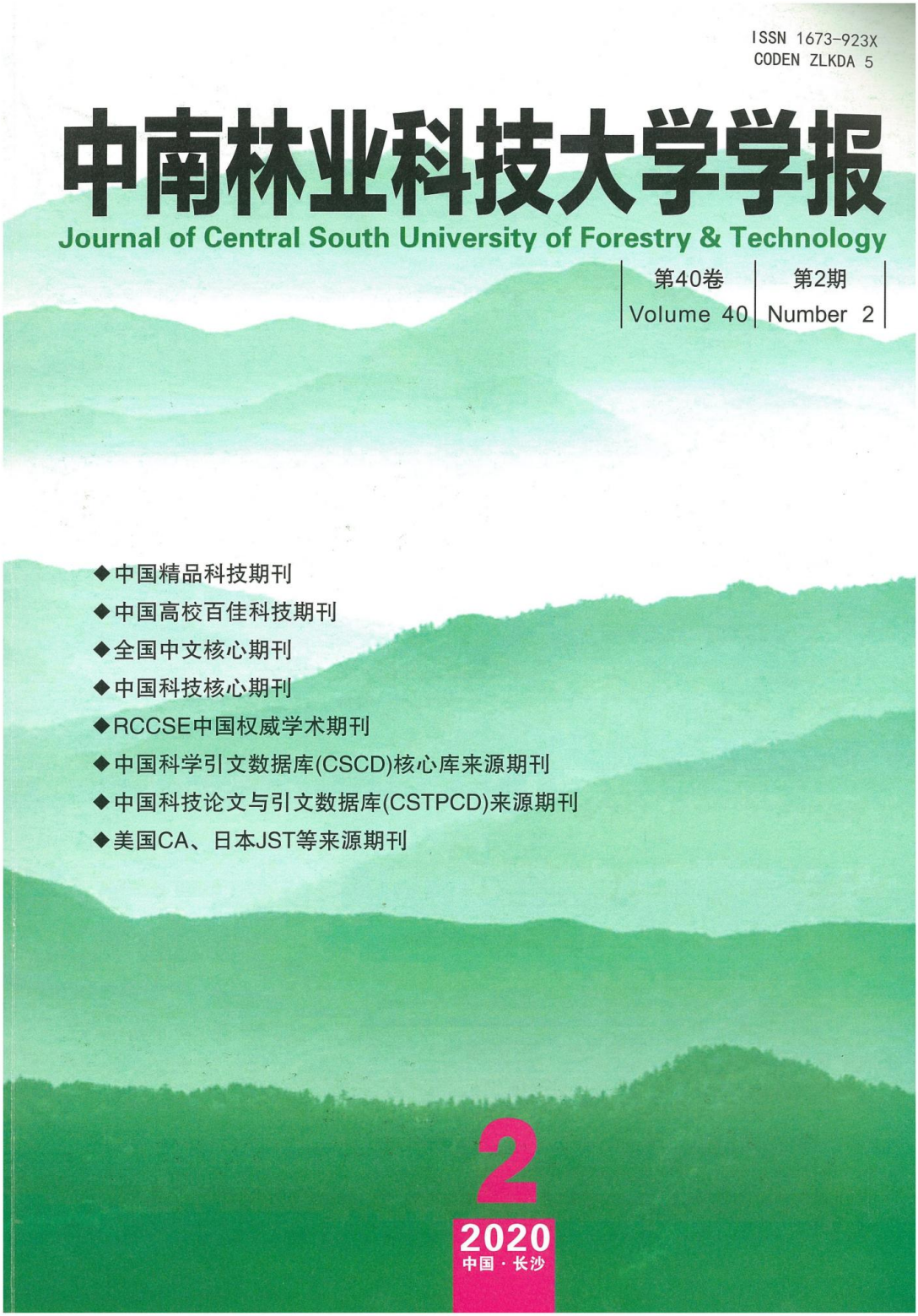
Responsible Institution: South China Agricultural University
Sponsor: South China Agricultural University
Chief Editor: LIU Yahong
Edited and Published by Editorial Department, Journal of South China Agricultural University
Address: Wushan, Guangzhou, 510642, China
Website: http://xuebao.scau.edu.cn
E-mail: journal@scau.edu.cn
Tel: (86-20)85280069/38746672
Distributed by China International Book Trading Corporation(P.O.Box 399 Beijing, China)

ISSN 1001-411X
CN 44-1110/S

国内外公开发行
国内定价：15.00 元/册

ISSN 1001-411X
05>
9 771001 411218

2.5.广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造



目　次

林　学

[期刊基本参数]CN43—1470/S*m*A4*174*zh*P*￥40.00*1000*20*2020—02*n

生态学

风景园林学

环境科学与工程

生态旅游

本期执行编辑：吴　彬

Journal of Central South University of Forestry & Technology

Vol. 40 No. 2
Feb. 2020

CONTENTS

English Editor: WU Bin

第 40 卷 第 2 期
2020 年 2 月

中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology

Vol. 40 No. 2
Feb. 2020

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.02.017

http: //qks.csuft.edu.cn

广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造

冼丽铧，徐彬瑜，翁殊斐，冯志坚

（华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642）

摘 要：【目的】城市鸟类及蜂蝶类群落结构多样性是城市生物多样性的重要组成部分和生态环境质量的重要评价标准之一。了解城市园林绿地食源树种的应用，探讨食源树种的生态特性及其景观特征。【方法】调查了广州市 12 处城市绿地食源树种的应用，观察鸟类及蜂蝶类的取食情况，记录绿地中食源树种的种类、应用频次、配置方式及生长状况，归纳分析食源树种群落构成、观赏特性、生态性等。【结果】广州园林绿地常见食源树种有 23 科 33 属 45 种，其中鸟类食源树种 25 种，蜂蝶类食源树种 20 种，以桃金娘科、桑科、大戟科为主，并以乡土种为主、外来驯化种为辅；食源树种的观赏与被取食时间主要集中于春夏季（31 种），秋冬季的相对较少（16 种）。【结论】广州市绿地的食源树种资源丰富，约 300 种，但常见鸟类及蜂蝶类食源树种仅占 18%，结合良好适应性、抗逆性、取食性、观赏性，归纳出 20 种优势乡土食源树种；同时对食源树种群落组成结构进行分析，在兼顾食源树种的观赏性与生态性的基础上，设计出 6 组可在广州城市园林绿地推广应用的生态配置群落，采用树种混交与立体复合栽植的形式，乔、灌、草结合，形成丰富的水平与垂直植物群落结构，提高绿地生境异质性，增加食源树种的数量及丰富度，提供丰富稳定的食物来源，为鸟类及蜂蝶类提供多样的稳定栖息地。研究结果将对城市园林绿地食源树种的合理选择与科学配置应用，以及营造鸟类及蜂蝶类昆虫生态景观具有现实指导意义。

关键词：食源树种；生态景观；城市绿地；植物群落

中图分类号：S727.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2020)02-0142-06

Application of food source tree species and the construction of ecological landscape in urban green space of Guangzhou

XIAN Lihua, XU Binyu, WENG Shufei, FENG Zhijian

（College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China）

Abstract:【Objective】As an important part of urban biodiversity and one of the important evaluation criteria for the quality of ecological environment, the structural diversity of urban bird , bee and butterfly communities was an important part of urban biodiversity. This study went to understand the application and discuss the ecology and landscape characters of the food source tree species in urban areas.【Method】The bird-feed trees and nectar trees for bees and butterflies were investigated at 12 urban green spaces in Guangzhou. The feeding conditions of birds and butterflies were observed, and the application frequency configuration and growth status of feeding source tree species in greenbelt were recorded. The community composition, the ornamental characteristics, the ecology of the urban green space were analyzed.【Result】Guangzhou was rich in tree species, about 300 species, but only 18% of common birds and butterflies' food source trees. The results showed that the common food source trees in the urban green space of Guangzhou belonged to 45 species, 33 genera, and 23 families, including 25 species of bird-feed trees and 20 species of nectar trees, which were the main of the Myrtaceae, Moraceae, Euphorbiaceae. The majority of the food trees in Guangzhou were indigenous species and supplemented by foreign domesticated species. The viewing time and the collection time of food source plants were in the spring and summer (31 species), and in the autumn and winter (16 species).【Conclusion】Combined with good adaptability, resistance, feeding ability and ornamental ability, 20 dominant native food source tree species were summarized. At the same time, based on the analysis of the composition and structure of the community of food source trees, and considering the ornamental and ecological characteristics of food source trees, 6 groups of ecological configuration communities that could be popularized and applied in Guangzhou urban green space were laid out. In the form of mixed tree species and three-dimensional compound planting, a rich horizontal and vertical plant community structure was formed through the combination of shrub and shrub to improve the heterogeneity of greenbelt habitat, increasing the number and richness of feeding tree species, and provided a rich and stable food source and diverse stable habitats for birds, bees and butterflies. The results would be of practical significance for the rational selection and scientific allocation of food source species in urban green space, as well as the construction of ecological landscape for birds and bee butterflies.

Keywords: food source trees; ecological landscape; urban green space; plant community

收稿日期：2019-01-07

基金项目：国家自然科学基金项目（51708227）；华南农业大学精品实践项目（zlgc19070）。

第一作者：冼丽铧，实验师，博士研究生。　　**通信作者：**翁殊斐，副教授，博士。E-mail：wsf07hhx28@scau.edu.cn

引文格式：冼丽铧，徐彬瑜，翁殊斐，等. 广州城市园林绿地食源树种应用及其生态景观营造 [J]. 中南林业科技大学学报，2020, 40(2):142-147.

XIAN L H, XU B Y, WENG S F, *et al*. Application of food source tree species and the construction of ecological landscape in urban green space of Guangzhou[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(2):142-147.

生态城市是近年来城市建设的热点，广州是连续六年保持全国前十的生态城市，但在城市化高速发展中，生物生态栖息地遭到破坏，生物多样性随之不断减少，对鸟类及蜂蝶类等生物的生存与发展造成了威胁。而城市鸟类及蜂蝶类群落结构多样性作为城市生物多样性的重要组成部分和生态环境质量的重要评价标准，反映了城市生物多样性水平[1]，直接驱动了生态系统服务功能，为人类福祉提供安全与健康的保障[2]，也表现出一个城市的生态健康度。

城市绿地建设是保护、恢复、提高城市生物多样性的重要举措[3]，广州市绿化率超过40%，在全国属于领先水平，绿地类型多样。木本植物不仅是园林绿地景观的骨架，而且还是鸟类及蜂蝶类栖息的重要场所，其中食源树种对动物生存和繁殖起直接作用，如植食性昆虫取食叶片不仅影响植物种群结构、群落组成和生态系统的功能，还影响食物网内物种的相互关系[4]。前人通过对木本植物的种类组成及其对鸟类群落的研究，提出招引鸟类及蜂蝶类的保护策略[5-7]，但在目前城市园林绿化建设中，缺少对食源树种挖掘与利用的研究。而合理配置食源树种不仅有利于构建适宜鸟类及蜂蝶类昆虫繁衍的生境，且有助于形成多种声、色、香结合的生态景观，丰富与愉悦游人的感官与游览体验。因此，通过营建生态植物群落，有助于改善城市生态系统，对缓解高密度城市扩张造成的栖息地破碎化、提高生物多样性具有现实指导意义。

1　材料与方法

1.1　试验地概述

广东省广州市（112°57′～114°03′E，22°26′～23°56′N）地处珠江三角洲北部，西江、北江、东江在此汇流入海，属于南亚热带季风气候带，以春（3—5月）、夏（6—8月）、秋（9—11月）、冬（12月、1—2月）来划分四季；年均气温22.8 ℃，1月最低，7—8月最高；雨水丰富，年均降水量1 842.8 mm，降水主要集中在每年4—9月，全年雨热同期、雨量丰沛，有利于植物生长。

1.2　研究方法

于2017年5月—2018年3月多次到广州城区范围的海珠国家湿地公园、华南植物园、华南农业大学、云台花园、流花湖公园、麓湖公园、天河公园、烈士陵园、珠江公园和花城广场等12处生态建设较好的城市园林绿地，观察鸟类及蜂蝶类的取食情况，记录绿地中食源树种的种类、应用频次、配置方式及生长状况，拍摄食源树种群落照片。根据 *Flora of China* 相关文献对广州市食源树种的学名、花果期、观赏特性、取食对象、取食部位等基本信息进行记录核查，并分析其树种组成、与鸟类及蜂蝶类的取食关系、观赏性特征、群落配置情况等。

2　结果与分析

2.1　食源树种科属组成分析

调查记录到广州园林绿地食源树种有62科164属302种（含变种），其中裸子植物10种、被子植物292种；乔木160种，灌木127种，藤本15种。根据鸟类及蜂蝶类的取食量与树种在园林绿地出现频次，归纳筛选出广州园林绿地常见食源树种有45种，隶属23科33属，以乡土树种（32种）为主，长期驯化适应本地环境的外来树种（13种）为辅；其中绿地常见的鸟类主要食源树种有25种，隶属14科18属（表1），以桃金娘科、桑科和苏木科为主，其中乔木21种，灌木4种；绿地常见的主要蜂蝶类食源树种20种，隶属12科15属（表2），以马鞭草科和大戟科为主，其中乔木12种，灌木8种。

从取食部位分析食源树种，主要分为嫩叶、花蜜、果实等，以取食花蜜类最多，有40种，占88.8%；取食果实类树种次之，有32种，占71.1%，其中以核果（15种）、浆果（6种）、聚花果（5种）等，这些果实属于肉果类，果实肉质而多汁，而如荚果（3种）、蒴果（2种）等干果类，由于成熟后果皮干燥难以进食，导致取食可能性相对较小；取食叶芽类树种最少。

2.2　食源树种的取食期与观赏特性分析

植物的花果是最主要的取食部位，鸟类及蜂蝶类的数量和物种丰富度随植物花果期的变化而变化。从取食季节来看，春、夏、秋和冬季供取食的树种分别有18、22、12和8种，其中以夏季供取食的树种最多，占48%，四季皆可取食有7种，其中主要集中在夏季，春季次之，秋季较少和冬季最少，存在季节分布不均的问题。从观赏季节上分析，广州城市绿地常见的观花、观果类食源树种主要集中于春夏季，秋冬季较少，春、夏、秋和冬季观花观果食源树种分别有12、13、5和5种，其中夏季观花观果树种最多，占28.8%。

从观赏特性来看，食源树种主要以观花、观果类为主，观叶类为辅，其中观花树种有24种，占53.3%，观果树种有9种，占20%，观叶树种有7种，占15.5%。木本植物的花朵是最容易产生

表 1 广州城市绿地主要鸟类食源树种名录†

Table 1 List of the main food source trees for birds in Guangzhou urban green space

树种 Species	科名 Family name	生长型 Growth type	取食季节 Feeding season	取食部位 Feeding site	果实类型 Fruit type	观赏特性 Ornamental characteristics	配置方式 Configuration
* 阴香 *Cinnamomum burmanni*	樟科	A	W	F	D	G	LP
* 樟树 *Cinnamomum camphora*	樟科	A	At/W	F/l	D	L	LP/SP
大花紫薇 *Lagerstroemia speciosa*	千屈菜科	A	Su	S/N	Ca	Fl/ L	CP/LP
红千层 *Callistemon rigidus*	桃金娘科	A	Su	N	Ca	Fl	CP
白千层 *Melaleuca leucadendron*	桃金娘科	A	Y	N	Ca	Fl	CP/LP
* 乌墨 *Syzygium cumini*	桃金娘科	A	Su	F	B	G	LP
* 蒲桃 *Syzygium jambos*	桃金娘科	A	Sp/ Su	F/N	B	Fl	CP/LP
* 洋蒲桃 *Syzygium samarangense*	桃金娘科	A	Sp/ Su	F/N	B	Fl /Fr	CP/LP
南天竹 *Nandina domestica*	小檗科	S	W	F	B	L/ Fr	CP
* 木棉 *Bombax ceiba*	木棉科	A	Sp	N	Ca	Fl/ L	LP/ SP
鸡冠刺桐 *Erythrina crista-galli*	蝶形花科	A	Y	S/N	P	Fl	SP
* 羊蹄甲 *Bauhinia purpurea*	苏木科	A	Sp/W	S/N	P	Fl	GP/LP
* 宫粉羊蹄甲 *Bauhinia variegata*	苏木科	A	Sp/Su	S / N	P	Fl	GP/LP
凤凰木 *Delonix regia*	苏木科	A	Su	N	P	Fl	SP
* 台湾相思 *Acacia confusa*	含羞草科	A	Sp/Su/At	S/N	P	Fl	SP/GP
* 构树 *Broussonetia papyrifera*	桑科	A	Su	F	Cf	Fr	GP/LP
* 高山榕 *Ficus altissima*	桑科	A	Sp/Su/At	F	Cf	G	LP/ SP
* 垂叶榕 *Ficus benjamina*	桑科	A	Su/At	F	Cf	G	LP
* 小叶榕 *Ficus microcarpa*	桑科	A	Su/At	F	Cf	G	LP/SP
* 黄葛榕 *Ficus virens*	桑科	A	Sp/Su/At	F	Cf	L	LP/SP
* 秋枫 *Bischofia javanica*	大戟科	A	At/W	F	D	G	LP
* 铁冬青 *Ilex rotunda*	冬青科	A	At/W	F	D	Fr / L	CP
* 海桐 *Pittosporum tobira*	海桐花科	S	Sp/At	F/N	Ca	G	H
* 朱槿 *Hibiscus rosa-sinensis*	锦葵科	S	Y	N	/	Fl	H
* 假连翘 *Duranta erecta*	马鞭草科	S	Su/At	F	D	Fl	CP/H

† * 为乡土树种。1. 生长型：A. 乔木；S. 灌木。2. 取食季节：Sp. 春；Su. 夏；At. 秋；W. 冬；Y. 全年。3. 取食部位：N. 花蜜；F. 果；S. 种子。4. 果实类型：Ca. 蒴果；Cf. 聚花果；B. 浆果；Po. 梨果；D. 核果；P. 荚果；/. 通常无果。5. 观赏特性：Fl. 观花；Fr. 观果；L. 观叶；G. 常绿。6. 配置方式：SP. 孤植；CP. 丛植；LP. 列植；GP. 群植；H. 绿篱。下同。

*Indigenous tree species. 1. Growth types: A. Arbor, S. Shrub. 2. Feeding seasons: Sp. Spring, Su. Summer, At. Autumn, W. Winter, Y. Year. 3. Feeding sites: N.Nectar, F.Fruit, S. Seed. 4. Fruit types: Ca. Capsule, Cf. Collective fruit, B. Berry, Po.Pome, D. Drupe, P.Pod, /. None. 5. Ornamental characteristics: Fl. Flower, Fr. Fruit, L. Leaf, G.Green. 6. Configuration: SP. Solitary plant, CP. Clump planting, LP. Linear planting, GP. Group planting, H. Hedge. The same below.

视觉美感的部位，主要食源树种中观花植物以覆盖花相为主，密满花相和团簇花相为辅，同时满足鸟类及蜂蝶类远距离和近距离的识别；观果树种的果实以奇、巨、丰为佳，果色上以与常绿背景形成鲜明对比的红色系为主；各季节的观叶树种则以常绿树种为主，色叶树种次之，尤其缺少春色叶和秋色叶类，不利于显现绿地季相变化和时空动感，且在异色叶、特色叶树种等方面较缺乏。

2.3 食源树种群落配置分析

食源树种的配置方式主要分为规则式和自然式，规则式种植主要为列植（21 种）与绿篱（8 种），自然式种植主要包括丛植（17 种）、孤植（15 种）、群植（7 种）。近年来广州绿地的规则式群落配置中采用行列种植方式，大面积草坪结合片植宫粉羊蹄甲、黄花风铃木 *Handroanthus chrysanthus*、美丽异木棉 *Ceiba speciosa* 等，形成宏伟壮观的花林草海景观，但由于植物种类和空间结构单调，在非花期景观空间效果较差。花林草海植物群落垂直层次结构和生境类型单一，花果期集中且短暂，不能保持食物四季可持续供应，易造成食物链破坏，影响绿地生物多样性。在自然式配置中，食源树种多用于顶层乔木，林下小乔木、中低层灌木大多以色叶或具观花价值的园林植物为主，然而部分常绿乡土优势食源树种如鸭脚木 *Schefflera chapana*、柃木 *Eurya japonica*、九节 *Psychotria asiatica* 等，由于观赏价值较低，在园林配置应用较少，造成食源树种种类单一，不利于丰富城市绿地生物多样性。此外，灌木如海桐、鹅掌藤等以绿篱形式种植为主，长期进行人工修剪而无法结果，难以形成稳定的生态植物群落。

表 2　广州城市绿地主要蜂蝶类食源树种名录

Table 2　List of the main bee and butterfly food source trees in Guangzhou urban green space

树种 Species	科名 Family name	生长型 Growth types	取食季节 Feeding seasons	取食部位 Feeding sites	果实类型 Fruit types	观赏特性 Ornamental characteristics	配置方式 Configuration
* 龙眼 *Dimocarpus longan*	无患子科	A	Su	N	D	Fr	LP / SP
* 荔枝 *Litchi chinensis*	无患子科	A	Su	N	D	Fr	LP / SP
* 枇杷 *Eriobotrya japonica*	蔷薇科	A	At/ W	N	Po	Fl/ Fr	CP
毛杜鹃 *Rhododendron × pulchrum*	杜鹃花科	S	Sp	N	Ca	Fl	CP/H
* 杜鹃 *Rhododendron simsii*	杜鹃花科	S	Sp	N	Ca	Fl	CP /H
* 九里香 *Citrus reticulata*	芸香科	S	Sp /Su	N/ l	B	G	H
* 五月茶 *Antidesma bunius*	大戟科	A	Sp	N	D	Fr	CP/ SP
* 重阳木 *Bischofia polycarpa*	大戟科	A	Sp	N	D	G	LP /SP
* 乌桕 *Triadica sebifera*	大戟科	A	Sp/Su	N/ l	Ca	L	SP
水石榕 *Elaeocarpus hainanensis*	杜英科	A	Su	N	D	Fl	CP/ SP
* 杧果 *Mangifera indica*	漆树科	A	Sp	N	D	Fl/ Fr	LP / SP
* 山茶 *Camellia japonica*	山茶科	S	Sp / W	N/ l	Ca	Fl	CP
* 木荷 *Schima superba*	山茶科	A	Su	N	Ca	Fl	CP
窿缘桉 *Eucalyptus exserta*	桃金娘科	A	Su	N	Ca	G	SP
大叶桉 *Eucalyptus robusta*	桃金娘科	A	Sp /Su	N	Ca	G	LP / SP
马缨丹 *Lantana camara*	马鞭草科	S	Y	N	D	Fl	CP
黄花马缨丹 *Lantana camara* 'Flava'	马鞭草科	S	Y	N	D	Fl	GP
蔓马缨丹 *Lantana montevidensis*	马鞭草科	S	Y	N	D	Fl	GP
* 桂花 *Osmanthus fragrans*	木犀科	S	Y	N	D	Fl	CP/ H
* 鹅掌藤 *Schefflera arboricola*	五加科	S	At	N	B	L	GP/ H

广州城市绿地建设中虽比较重视复层群落结构的营造，绿地植物群落配置以乔灌草结构为主，但更为稳定的乔灌藤草 4 层次结构所占比重仍然较少，灌木组成成分低 [8]，许多研究指出对于陆生鸟类，乔木层和灌木层的结构和组成对栖息地的质量起到决定性作用 [9]。当乔木平均高度超出 10 m 时，鸟类及蜂蝶类多样性将下降至较低水平，因此，在树高较高的植物群落中需增加林下灌木及小乔木 [10]，重点提高植物中间层的物种丰富度，乔灌草结合层间藤本形成丰富的 4 ～ 5 层次植物垂直群落结构，提高植物物种丰富度使植物花果期交错，延长树种取食期和观赏期，从而丰富林地类型，提升群落生境和景观异质性，为鸟类及蜂蝶类提供稳定的生态栖息地。

根据植物观赏特性与生态特性，以食源树种为基调树种，适当结合园林观赏植物，通过色彩与形态对比与协调，平衡与动势力，韵律与节奏等手法，协调观赏性园林植物与食源树种关系，形成高低错落，富有变化的植物群落景观 [11]。将高大常绿乔木类食源树种作为背景树，配置观赏较强的主景食源树种，林下耐荫的常绿灌木与小乔木类食源树种作为林下填充植物，并以食源花灌木类作为群落中底层前景植物，丰富植物群落的景观空间与色彩层次，形成景观与生态相结合的多层次植物群落，营造连续性的植物空间，使得植物群落生态效益尽可能达到最大化，在一定程度上缓解城市“热岛效应”[12]。根据上述分析结果，结合城市绿地现有植物资源，提出以下 6 类生态景观效益较好的群落配置：

1）窿缘桉 + 木荷 - 重阳木 + 阴香 + 鸡冠刺桐 - 山油柑 + 桃金娘 - 多花野牡丹 - 龙船花 *Ixora chinensis*+ 朱顶红 *Hippeastrum rutilum*- 地毯草 *Axonopus compressus*。

2）山杜英 + 木莲 *Manglietia fordiana*- 蒲桃 + 鸭脚木 - 柃木 + 九节 + 臭茉莉 - 赤桐 + 栀子 *Gardenia jasminoides*- 山菅兰 *Dianella ensifolia*+ 吉祥草 *Reineckea carnea*。

3）木棉 + 白兰 *Michelia alba*- 铁冬青 + 大花紫薇 + 宫粉羊蹄甲 - 桃金娘 + 山麦冬 *Liriope spicata*+ 葱兰 *Zephyranthes candida*。

4）苦楝 + 乌桕 - 黄牛木 + 山乌桕 - 盐肤木 + 石斑木 + 虾子花 - 黄花马缨丹 + 地稔 *Melastoma dodecandrum*。

5）朴树 + 白千层 - 复羽叶栾树 *Koelreuteria bipinnata*+ 台湾相思 - 洋蒲桃 + 杨桃 *Averrhoa carambola*- 九里香 + 朱槿 - 蜘蛛兰 *Hymenocallis littoralis*+ 蔓马缨丹。

6）乌墨 + 凤凰木 + 樟树 - 大花五桠果 *Dillenia*

turbinata+ 重阳木 - 山茶 + 玉叶金花 *Mussaenda pubescens*- 地毯草。

3 讨论与结论

3.1 优良乡土食源树种挖掘

广州市绿地的食源树种资源丰富，约 300 种，但常见鸟类及蜂蝶类食源仅占 18%，显示城市绿地食源树种的多样性和丰富度有待提高，在广州园林绿地常见的 45 种食源树种中，乡土树种 35 种，占 77%，开发利用程度较大，但仍有许多优势乡土树种，由于观赏性较弱或配置不得当，尚未得到充分合理的挖掘与利用。根据乡土优势食源树种的适应性、抗逆性、取食价值以及观赏性筛选出 20 种具有良好的开发利用前景的乡土食源树种：黄牛木 *Cratoxylum cochinchinense*、虾子花 *Woodfordia fruticosa*、盐肤木 *Rhus chinensis*、山乌桕 *Sapium discolor*、冬红 *Holmskioldia sanguinea*、苦楝 *Melia azedarach*、乌墨、山杜英 *Elaeocarpus sylvestris*、朴树 *Celtis sinensis*、构树、柃木、九节、鸭脚木、山油柑 *Acronychia pedunculata*、桃金娘 *Rhodomyrtus tomentosa*、石斑木 *Rhaphiolepis indica*、多花野牡丹 *Melastoma affine*、臭茉莉 *Clerodendrum chinense* var. *simplex*、赪桐 *Clerodendrum japonicum*、紫玉盘 *Uvaria microcarpa*。其中，鸟蜂同食树种 18 种，能够同时满足鸟类与蜂蝶类昆虫取食需要。

乡土食源树种开发利用几大优势：首先，乡土树种一般适应性与抗性相对较强，可适应于不同类型的绿地，其中盐肤木、山乌桕、苦楝耐干旱贫瘠能力尤为突出，可植于贫瘠的边坡地带，固坡护土改善土质，构树除了耐湿还具有优良的抗污染能力，可植于污染较大的地方，起净化环境作用，发挥生态效益，同时提升边坡、林下、阴湿等地的植物景观。其次，乡土食源树种无论作为食物、栖息地，还是作为营巢地，都更容易被鸟类及蜂蝶类所接受，且其花期与果实的成熟期往往与鸟类及蜂蝶类生物的繁殖期或迁徙期一致[6]；秋冬季候鸟的迁徙丰富了鸟类丰富度，但食源树种的花果期主要集中于春夏季，秋冬季相对缺少，秋冬季供应食物的乡土食源树种如盐肤木秋季盛开，蜜量大，补充秋季蜜源，冬季赤红色核果为鸟类提供丰富食源，调节食源树种时空分布不均的问题，解决秋冬季食源相对缺少的问题。此外，有些树种如苦楝，富含单宁，具有一定灭菌杀虫能力，可以抑制大规模病虫害爆发；桃金娘在食物链的构成上起着关键作用，其果实吸引大量的小昆虫及鸟类取食吹棉蚧，从而抑制病虫害发生，发挥了生物抑制作用，构成了鸟与植物的平衡互助关系。

3.2 食源树种的生态景观营造

食源树种的合理搭配有助于招引鸟类及蜂蝶类，可以展示多种声色效果，借助科普措施，有效提高公园的美感、生态和社会效益，丰富游人的感官体验，形成良好的生态园林景观[13]，在城市建设中具有独特的生态学意义与景观价值[14]。现有城市绿地形成规则式景观效果，大量采用规则式种植或需较高维护、频繁修剪的种植方式，林下光照过弱，花与果实不易形成，难以满足鸟类及蜂蝶类取食需求，且常喷洒除草剂与杀虫剂的管养方式，破坏绿地中生物多样性，难以为动物提供良好栖息环境。因此，为了合理利用食源树种，营造良好的鸟、蜂蝶类栖息环境，针对食源树种生态性来营造生态植物景观，提出以下几点建议：

1）随植物的物候变化，鸟类及蜂蝶类的数量和物种丰富度也有较大的变化[15]，增加食源树种的数量及丰富度，种植这类秋冬季食源树种，提供了丰富稳定的食物来源。如山乌桕，花序数量多、花期长、蜜腺发达、泌蜜量大，夏季吸引蜂蝶类昆虫取食，但花小不显眼，鸟类几乎不取食其花蜜，秋冬季果实成熟开裂，其富含高热量油脂的蜡质种子外露，是许多鸟类喜欢的食物。因本研究时间所限，未能在多个生长季进行观察，下一步研究有待对动植物之间相互关系及物种丰富度进行长期监测与观察，进一步缓解食源树种时空分布不均以及物种多样性欠缺的问题。

2）根据植物的生物学和生态学特性，采用树种混交与立体复合栽植的形式，乔、灌、草结合，形成丰富的水平与垂直植物群落结构，提高绿地生境异质性，为鸟类及蜂蝶类提供多样的稳定栖息地。如应用马缨丹属等招蜂引蝶的树种营造蝴蝶谷、蝴蝶屋，以及以铁冬青、水翁等树种配置与湿地、湖中岛屿，营造安静、不受人类干扰的生态栖息地，让公众对生态系统的生产者、消费者以及物质循环和能量循环有更直观的认识，起到良好的科普与环境教育作用。

3）将一些人流量较少的绿地僻静区域划出，在自然度和景观美学的原则上进行“近自然”景观规划，区域内采用多层次的种植结构和低维护的自然管养模式，模拟自然生境营建城市生态栖

息地，以“自然为师”，形成富有野趣的“近自然”林地景观[16-17]。绿化管理也分区，在城市园林绿地非核心地带，逐步减少对自然生态的人工干预，注意园林植物的养护管理，特别是整形修剪与病虫害防治环节，绿篱或灌木选择既可观花观果又可供取食的树种，修剪时适当保留老枝，草坪清理时不必除尽，适当保留掉落的果实种子，保障对鸟类及蜂蝶类有益的自然条件。尽量少喷农药及除草剂，通过合理配置杀虫植物或害虫天敌如鸟类、蜘蛛类、寄生昆虫等动物的招引性食源树种，利用生物抑制作用，防止大规模虫害爆发，从而形成互相牵制的良性循环生态植物群落。

参考文献：

[1] MARK H, KIM K. Land use, scale, and bird distributions in Phonenix metropolitan area[J]. Landscape and Urban Planning, 2002,62(2):55-68.

[2] Millennium Ecosystem Assessment. Ecosystems and human well-being: Synthesis[M]. Washington DC: Island Press, 2005.

[3] 隋金玲，张志祥，胡德夫，等. 北京市区绿化带内鸟类食源树种研究 [J]. 林业科学 ,2006,42(12):83-89.
SUI J L, ZHANG Z X, HU D F, *et al*. Studies on bird-feed trees at green belts of Beijing urban area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006,42(12):83-89.

[4] 胡鸿雁，郑征，王瑾，等. 片段化热带森林优势植物叶虫食及其影响因素研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2017,37(10):98-104.
HU H Y, ZHENG Z, WANG J, *et al*. Study on insect herbivory of dominant plants and its influencing factors in tropical forest fragments[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017,37(10):98-104.

[5] 王勇，许洁，李志刚，等. 城市公共绿地常见木本植物组成对鸟类群落的影响 [J]. 生物多样性 ,2014,22(2):196-207.
WANG Y, XU J, LI Z G, *et al*. The composition of common woody plant species and their influence on bird communities in urban green areas[J]. Biodiversity Science, 2014,22(2):196-207.

[6] 王绪平，李德志，盛丽娟，等. 城市园林中鸟类及蜂蝶类的重要性及其招引与保护 [J]. 林业科学 ,2007,43(12):134-143.
WANG X P, LI D Z, SHENG L J, *et al*. Significance of birds, bees and butterflies in urban gardens and their attraction and protection[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007,43(12):134-143.

[7] 侯建华，李川，安哲，等. 城市园林与夏季鸟类群落结构研究 [J]. 河北农业大学学报 ,2004,27(4):93-95.
HOU J H, LI C, AN Z, *et al*. The study of urban gardens and bird community structure in summer[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2004,27(4):93-95.

[8] 曹兴兴. 广州城市生物多样性保护规划研究 [D]. 广州：仲恺农业工程学院 ,2013.
CAO X X. Research on conservation planning of urban biodiversity in Guangzhou city[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2013.

[9] ERIK H. Clearance of understory in urban woodlands: assessing impact on bird abundance and diversity[J]. Forest Ecology and Management, 2010,260(1):125-131.

[10] 张皖清. 北京奥林匹克森林公园鸟类栖息地植物景观研究 [D]. 北京：北京林业大学 ,2015.
ZHANG W Q. Study of bird preference to plant habitat and species in Beijing urban park[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.

[11] 庄雪影. 园林树木学 [M]. 广州：华南理工大学出版社 ,2014.
ZHUANG X Y. Lanscape dendrology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2014.

[12] 李庆华. 微气候视角下苏州古典私家园林的植物景观营造 [J]. 西北林学院学报 ,2015,30(2):272-277.
LI Q H. Micro-climate perspective study based on the construction of plantscape in Suzhou classical private gardens[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015,30(2):272-277.

[13] 林石狮，王晓明，张寿洲，等. 吸引野生鸟类、蝶类的乡土食源植物虾子花 (*Woodfordia fruticosa*) 生态景观营造实践 [J]. 生物学杂志 ,2018,35(1):111-114.
LIN S S, WANG X M, ZHANG S Z, *et al*. A bird and butterfly-attractive ecological landscape with *Woodfordia fruticosa*[J]. Journal of Biology, 2018,35(1):111-114.

[14] 张立微，张红玉. 蝶类对生境的指示作用研究进展 [J]. 生物学杂志 ,2014,33(3):88-91.
ZHANG L W, ZHANG H Y. Research progress in butterfly as indicators for habitat change[J]. Journal of Biology, 2014,33(3): 88-91.

[15] FERGER S W, SCHLEUNING M, HEMP A, *et al*. Food resources and vegetation structure mediate climatic effects on species richness of birds[J]. Global Ecology and Biogeography, 2014,23(5):541-549.

[16] 曹加杰，余军军，吴向崇，等. 基于生态服务功能的城市公园水体景观营造方法探讨 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2018, 38(8):103-108.
CAO J J, YU J J, WU X C, *et al*. Discussion on the method of urban water landscape construction based on ecosystem service function[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018,38(8):103-108.

[17] 冯彩云. 近自然园林的研究及其植物群落评价指标的构建 [D]. 北京：中国林业科学研究院 ,2014.
FENG C Y. Study on close-to-nature landscape architecture and evaluation system on its plant community[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2014.

[本文编校：吴　彬]

中南林业科技大学学报

ZHONGNAN LINYE KEJI DAXUE XUEBAO

（月刊，1981年创刊）
第40卷第2期（总第224期） 2020年2月出版

主管单位 湖南省教育厅
主办单位 中南林业科技大学
主　　编 吴义强
社　　长 伍　谦
编辑出版《中南林业科技大学学报》编辑部
湖南长沙市韶山南路498号 邮政编码：410004
电话：0731-85623395
http://qks.csuft.edu.cn

印　　刷 长沙市雅捷印务有限公司
国外总发行 中国出版对外贸易总公司
（北京782信箱，邮编：100011）
国内发行 中南林业科技大学期刊社

JOURNAL OF CENTRAL SOUTH UNIVERSITY OF FORESTRY & TECHNOLOGY

(Monthly, Started in 1981)
Vol. 40 No. 2 (Sum 224) Feb. 2020

Administered by Education Department of Hunan Province

Sponsored by Central South University of Forestry & Technology

Chief Editor WU Yiqiang

Periodicals Press Director WU Qian

Edited & Published by Ed.Dept.of Journ.of CSUFT
(Changsha 410004, Hunan, China)
http://qks.csuft.edu.cn

Printed by Changsha Yajie Color Printing Co. Ltd.

Distributed abroad by China National Publishing Industry Trading Corporation
(P.O.BOX 782, Beijing,100011, China)

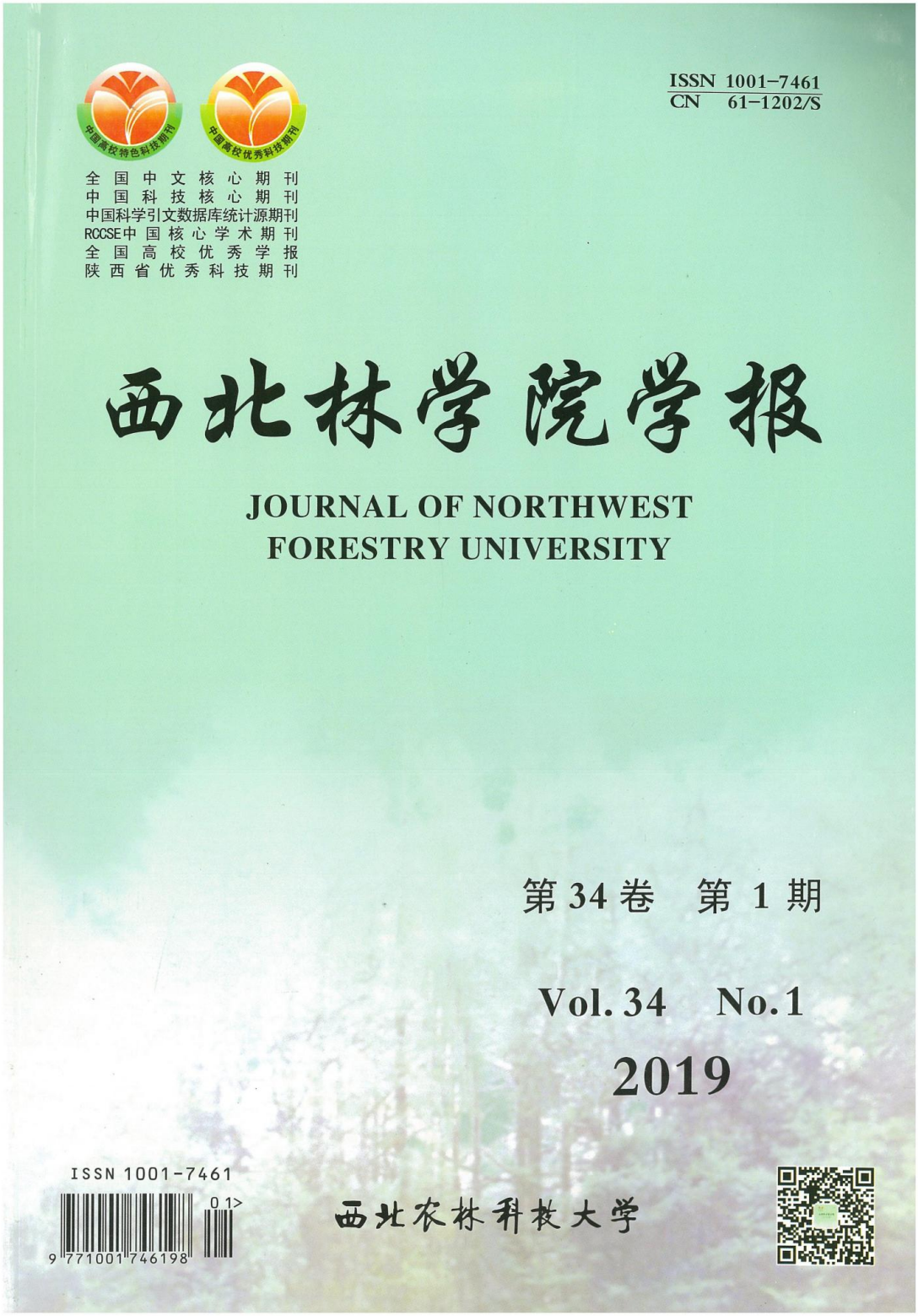
Distributed domestically by Periodicals Press of CSUFT

国际标准连续出版物号：ISSN 1673-923X
国内统一连续出版物号：CN43-1470/S

国内定价：40.00元/本

ISSN 1673-923X
9 771673 923200 02

2.6.广州市公园棚架式植物景观评价



西北林学院学报

第34卷　第1期　　(总第155期)　　2019年1月

目　　次

森林生物学

林木遗传育种与培育

森林保护学

森林经理学

木材科学

园林绿化与景观设计

期刊基本参数：CN61-1202/S＊1984＊b＊A4＊272＊zh＊P＊40.00＊1000＊41＊2019-01

JOURNAL OF NORTHWEST FORESTRY UNIVERSITY

Vol. 34 No. 1 (Sum. 155) Jan. 2019

CONTENTS

西北林学院学报 2019,34(1):261-266
Journal of Northwest Forestry University

doi:10.3969/j.issn.1001-7461.2019.01.40

广州市公园棚架式植物景观评价

冼丽铧,翁殊斐*,林熙迪,冯志坚

(华南农业大学 林学与风景园林学院,广东 广州 510642)

摘　要:棚架式绿化是垂直绿化的一种常见应用形式,棚架式植物景观是丰富城市垂直绿化景观的主要途径之一。对广州市14个公园45处棚架式植物景观进行实地调研分析,应用美景度评判法(SBE)进行景观评价。结果表明,棚架式植物景观常用植物17种,隶属12科17属,最常见的棚架植物为使君子(*Quisqualis indica*)、白花油麻藤(*Mucuna birdwoodiana*)、金银花(*Lonicera japonica*);常用棚架材料有木材、金属、混凝土、砖石以及其他复合结构等,其中以混凝土作为材料的棚架居多;根据外形特点将棚架构造分为"丌"型、"冂"型、"介"型、"冖"型、"丅"型、圆拱型、特殊型,除各式各样的特殊型构造外,以"丌"型构造的棚架数量最多。景观评价结果表明,公众更喜欢棚架植物生长繁茂、木质藤本与棚架整体协调的棚架式植物景观。本研究总结出一系列园林景观中棚架植物的应用形式,为棚架式植物景观营建和管理提供理论依据和实践参考。

关键词:棚架式植物景观;景观评价;美景度评判法;木质藤本;广州公园

中图分类号:TU986.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1001-7461(2019)01-0261-06

Evaluation of Scaffolding Plantscape in Guangzhou Park

XIAN Li-hua, WENG Shu-fei*, LIN Xi-di, FENG Zhi-jian

(*College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *Gungdong, China*)

Abstract: Scaffolding greening is a common application form of vertical greening, and scaffolding plantscape is one of the main ways to enrich urban three-dimensional landscape. In this study, 14 Guangzhou park including 45 scaffolding plantscape sites were analyzed, in which scenic beauty estimation (SBE) method was applied for plantscape evaluation. According to the results, there were 17 kinds of common plants, belonging to 12 families and 17 genera, and the most common kind of scaffolds was *Quisqualis indica*, *Mucuna birdwoodiana*, *Lonicera japonica*. Commonly used scaffolds were wood, metal, concrete, masonry and other composite structures. According to the characteristics of its appearance, the scaffolding structure was divided into "丌", "冂", "medium", "冖", "hit", arch, and special types and so on. Most of the scaffolding used a variety of special type structure, "丌" type structure set-up was in the greatest number. According to the landscape evaluation method, people preferred the vegetation landscape with woody vines and overall coordination. This study summarized the application forms of scaffolding plants in a series of garden landscapes, and provided theoretical and practical references for the scaffolding plantscape.

Key words: scaffolding plantscape; landscape evaluation; scenic beauty estimation; woody vine; Guangzhou park

棚架植物指利用自身生长特性,攀爬、缠绕或悬挂在棚架等构筑物上生长而形成景观的木质藤本植物。棚架式植物景观是将藤本植物和棚架结构进行组合搭配形成景观,充分利用城市绿化空间,占地面

收稿日期:2018-04-04　修回日期:2018-07-19
基金项目:广东省研究生教育创新计划项目(2017JGXM-MS09);广东省林业厅项目(F14040)。
作者简介:冼丽铧,女,硕士,实验师,研究方向:园林植物应用与城市绿化。E-mail:xianlihua@scau.edu.cn
*通信作者:翁殊斐,女,博士,副教授,研究方向:园林植物应用与城市绿化。E-mail:shufeiweng@scau.edu.cn

积小，景观效果明显[1]，而棚架结构为植物提供良好的生长环境，棚架结构与藤本植物形成的景观为游人营造休息娱乐的舒适环境，是人们驻足停留休息的理想去处。本研究对棚架式植物景观进行评价，有助于合理选择与搭配藤本植物和棚架结构，同时对建设城市公园绿地棚架式植物景观具有现实指导意义。

前人在棚架式植物景观方面的研究涉及建筑廊架[2-4]、藤本植物生长与应用[5-10]、垂直绿化功能[11-12]等方面，而鲜有从棚架材料结构与藤本植物等多方面研究棚架式植物景观。本研究从实例出发，实地调查广州市14个城市公园的棚架式植物景观，记录藤本植物种类、棚架构造类型与材料等，采用美景度评价法对广州市园林绿地中的棚架式植物景观进行评价，获知受公众喜爱的棚架式植物景观应用形式，以期满足城市园林绿化建设的需求，丰富园林植物景观的多样性，为棚架式植物景观设计提供依据和参考。

1 材料与方法

1.1 调查地选择

于2016年6月—2017年3月对广州市越秀公园、流花湖公园、广州兰圃公园、草暖公园、珠江公园、天河公园、岭南印象园、海珠湖公园、晓港公园、庄头公园、白云儿童公园、云台花园、广州文化公园、荔湾湖公园共14个公园45处棚架式植物景观进行的实地调研，对藤本植物种类及对应的棚架材料、类型、构造等进行比较分析。

1.2 研究方法

美景度评价法(Scenic beauty estimation，SBE)是一种具有简单、可靠、易操作、便于推广的特点的景观评价方法[13]。本研究拍摄棚架式植物景观照片作为评价样本，综合考虑植物种类，棚架结构与材质等因素，避免相似景观重复，增大评判者的工作量；从45处棚架式植物景观中选取出20处具有代表性的景观作为样本，每处景观单元选取3张照片，拼接合成为一张幻灯片。通过线上问卷让评判者为各个景观的美景度打分；评判者为华南农业大学园林专业高年级学生[8]。请评判者根据第一时间对景观单元的感受评分，评分标准采用7分制，即－3～3，数值越大，表示风景越美，数值越小，表示风景越差；评判者快速浏览一遍所有景观的照片，把握整体大致情况后再每张逐一评分。本次共回收120份问卷，经问卷网后台筛选，剔除无效的问卷，有效问卷为117份，其中园林及相近行业相关人员共50人，占总数42.7%，非相关人员共67人，占57.3%。为减少或消除不同评价者之间存在的审美尺度差异，对美景度评价值进行标准化处理[14]。

2 结果与分析

2.1 公园棚架植物科属组成分析

实地调查结果，广州城市公园主要棚架植物有17种，隶属12科17属(表1)。棚架植物的应用主要是以木质藤本植物为主，体现了热带植物景观特色。使君子和白花油麻藤在棚架式植物景观的植物选择中比较受青睐，应用频次较高，应用的公园数量也较多。使君子在8个公园应用共15次，应用频率高达33.3%。白花油麻藤则次之，在6个公园应用共8次，占总数17.8%。其中，使君子为乡土植物，在园林中配置应用不仅能体现景观的地域特色，而且其枝繁叶茂，叶青绿，花期长，芳香，且花色具有渐变的效果，初开时淡粉久而深红，其生长强健，对土壤要求不严，栽培管理容易，因此，在广州公园棚架植物材料中具有鲜明的优势。白花油麻藤四季常青，清明节前后开花，总状花序成束状，形似一只只小鸟，极具观赏价值，喜温暖湿润气候，耐荫耐旱，很适合于广州公园做园林大型花架的垂直绿化。光叶子花也是一种极易养护的木质藤本植物，在城市绿化中常做高架桥及天桥绿化等，花苞大、数量多且颜色艳，不同品种有不同颜色，如红、紫、白、橙等，花期长，十分壮观，具有易于造型的特点，因此值得在棚架景观中推广应用。

大多数棚架式植物景观仅应用一种植物，有个别案例应用2种或2种以上植物进行混合搭配，如珠江公园荫生植物园一处棚架的主体植物应用了扁担藤，搭配心叶蔓绿绒藤本修饰棚架柱干，以及珠江公园另一处大型棚架运用鹰爪花绿化棚顶，心叶蔓绿绒绿化混凝土柱干，从而软化了棚架的硬质柱干，丰富了整体效果。

2.2 公园棚架结构类型和材质分析

棚架的形态构造决定了棚架式植物景观的功能，棚架选用的材质决定了棚架式植物景观的风格。根据构造和材质的不同对棚架进行分类(表2)。

2.2.1 棚架构造分类 大多数棚架为廊式棚架，即棚架具有基本的通道功能，或直线形，或曲线形，或折线形，人能穿过棚架到达另一处地方。根据各廊式棚架的横截面形式将廊式棚架分为："丌"型、"冂"型、"介"型、"冖"型、"丅"型、圆拱型、特殊型。非廊式棚架的构造多种多样，有蘑菇型、厢型、门亭型、大空间棚架型等多种特殊构造，本研究将非廊式棚架构造类型归为特殊型。为促进植物攀援生长，在棚架顶面一般会铺设竹竿、木条、PVC管、铁丝网等，

为棚架顶面植物生长提供足够附着点,为植物铺满棚架顶面提供支撑。

在所调研的棚架中,“丌”型的棚架结构应用最多,达 12 次,“丌”型的棚架结构比较有助木质藤本植物的生长及景观效果的形成,而混凝土材质的棚架应用最多,达 17 次,混凝土的材质相较于其他材质来说,经济成本低,施工简易,因而出现频次也较多。各式各样的特殊型棚架占所有棚架的37.8%,特殊型棚架形态各异,体现了各公园设计的独特性和创意性,如流花湖公园和兰圃共 3 处以门亭与棚架结合的形式构造棚架式植物景观。另外,有部分特殊型棚架会以和建筑结合在一起的形式出现,如兰圃有个半亭的顶檐外圈延伸出一段棚架,岭南印象园一建筑后门顶上延伸出棚架连接到另一栋建筑的墙上等。特殊型棚架使用的材料多为混凝土材料,这也体现了混凝土作为建筑材料造型灵活多变的优点。“丌”型棚架应用最为频繁,占26.7%,同样多使用混凝土作为棚架材料。

表 1　广州市公园棚架植物种类

Table 1　Analysis of plant species in Guangzhou parks

棚架植物	应用频次	应用公园数量
使君子	15	8
白花油麻藤	8	6
金银花	3	3
鹰爪花(*Artabotrys hexapetalus*)	3	2
心叶薯绿绒(*Philodendron erubescens*)	3	2
紫萼龙吐珠(*Clerodendrum speciosum*)	2	2
炮仗花(*Pyrostegia venusta*)	2	2
紫藤(*Wisteria sinensis*)	2	2
锦屏藤(*Cissus verticillata*)	2	1
珊瑚藤(*Antigonon leptopus*)	1	1
光叶子花(*Bougainvillea glabra*)	1	1
异叶爬墙虎(*Parthenocissus tricuspidata*)	1	1
蓝花藤(*Petrea volubilis*)	1	1
金杯藤(*Solandra maxima*)	1	1
合果芋(*Syngonium podophyllum*)	1	1
扁担藤(*Tetrastigma planicaule*)	1	1
大花山牵牛(*Thunbergia grandiflora*)	1	1

表 2　广州市公园棚架材料及构造类型

Table 2　Analysis of the materials and construction types of the park scaffolding in Guangzhou

棚架材料	“丌”型	“冂”型	“介”型	“冖”型	“丁”型	圆拱型	特殊型	合计
木结构	1	0	0	1	0	0	2	4
金属结构	0	2	0	2	1	4	3	12
砖石结构	2	0	3	0	0	0	2	7
混凝土结构	7	0	1	0	0	0	9	17
其他复合结构	2	0	0	1	0	1	1	5
合计	12	2	4	4	1	5	17	45

2.2.2　棚架材质分析　一般棚架在材料选择上有木结构、金属结构、砖石结构、混凝土结构及其他复合结构等。在所有棚架中,混凝土结构及金属结构的棚架数量最多,分别占总数 37.8%和 26.7%,其优点是施工简便,抗压性和整体性比较好,是坚固耐用棚架构建材料,而砖石结构和木结构棚架虽然都具有自然的质感,容易与其他园林要素相协调,但由于广州降雨量丰富,且常年空气湿度高,因此棚架的构建材料要能良好地适应湿热环境条件,而木材在防腐、防蛀等要求更高,建造和维护方面的费用更多,故木结构的棚架数量最少。

2.3　棚架式植物景观美景度分析

将各个景观单元按照 SBE 值高低排列,得到美景值排序(表 3),表明城市公园棚架式植物景观中应用频次较多的使君子、白花油麻藤、鹰爪花等美景度值相对较低,而应用频次相对较少的锦屏藤、大花山牵牛、珊瑚藤、紫萼龙吐珠等的美景度值却较高,主要原因是该类藤本植物观赏特性奇特、生长良好,而前者枝繁叶茂,花感不显著,因此,各类植物景观美景度存在一定的差异。

美景度值最高的棚架景观为 P5 锦屏藤金属棚架(图 1),其次为 P20 金银花混凝土棚架(图 2)、P18 大花山牵牛混凝土棚架(图 3)。SBE 值最高的 P5 棚架式植物景观,位于岭南印象园正门入口处,由金属材料搭建成“冂”型结构,应用锦屏藤为棚架植物覆盖整个棚顶,千丝万缕的锦屏藤气根从棚架顶部垂挂而下。若干个大体量的“冂”型棚架纵向排列,制造出极强的空间感、层次感和纵深感,引导着游客沿着棚架纵深的方向游览。锦屏藤密集却不杂乱的气根成为整个棚架的焦点,自然而变的气根颜色,加上人工修整,使整个棚架景观显得与众不同,增加了趣味感,而锦屏藤在广州公园的应用并不多,且同一地方出现如此大体量的锦屏藤棚架景观更加罕见,公众对这样的景观自然感到神奇而喜欢。锦屏藤是一种多年生常绿蔓性草质藤本植物,主要观赏部位为其细长的气根,若应用于棚架,千丝万缕的气根密集而均匀地从棚顶悬垂下来,犹如帘幕,极具特色,且其生命力极强,非常容易栽培,建议在有铺

装的地方应用。

P20棚架式植物景观，位于广州兰圃，作为芳华园的入口棚架门亭，由混凝土材料表面作仿生竹竿处理搭建成特殊型的门亭结构，应用金银花作为棚架植物。芳华园作为中国古典庭园的一个缩景，其每一处细节的设计都别出心裁。它在棚架门亭的设计上做了仿生竹竿处理，既体现了竹在中华传统中谦虚进取、高雅脱俗的品质，又能更加和谐地融入周边的一草一木、一水一石，在古典园林中毫不突兀，搭配茂盛的金银花，使棚架门亭变得更加饱满，犹如从棚架本身长出来一般，每当开花，白花转黄，星星点点的金银花和整个棚架相得益彰。

表3 广州市公园棚架式植物景观美景度比较

Table 3 Comparison of landscape views of the plantscape in Guangzhou parks

美景度排名	景观单元编号	SBE值	景观单元描述
1	P5	0.886 7	“冂”型，金属结构，锦屏藤
2	P20	0.562 2	特殊型，混凝土结构，金银花
3	P18	0.258 0	“丌”型，混凝土结构，大花山牵牛
4	P3	0.234 7	特殊型，混凝土结构，珊瑚藤
5	P1	0.174 4	圆拱形，金属结构，红萼龙吐珠
6	P4	0.167 2	特殊型，木结构，光叶子花
7	P16	0.133 9	特殊型，混凝土结构，鹰爪花等
8	P7	0.122 1	“冖”型，金属结构，使君子
9	P13	0.053 3	“丌”型，石砖结构，白花油麻藤
10	P19	0.030 1	“丌”型，混凝土结构，蓝花藤
11	P14	−0.011 8	“介”型，石砖结构，扁担藤等
12	P8	−0.096 5	特殊型，金属结构，使君子
13	P2	−0.108 4	圆拱形，金属结构，金杯藤
14	P15	−0.160 9	特殊型，混凝土结构，心叶蔓绿绒
15	P17	−0.196 4	特殊型，金属结构，使君子
16	P6	−0.210 2	“丅”型，金属结构，使君子
17	P10	−0.315 2	“冖”型，复合结构，金银花
18	P11	−0.424 6	特殊型，复合结构，紫藤
19	P12	−0.449 7	“冖”型，木结构，白花油麻藤
20	P9	−0.649 1	“丌”型，复合结构，炮仗花

图1 锦屏藤金属棚架(P5)

Fig. 1 *C. verticillata* metal scaffolding (P5)

P18棚架式植物景观，位于越秀公园小鹿休闲广场前，由混凝土材料搭建成“丌”型结构，配以大花山牵牛为棚架植物。该处景观的整体植物配置手法十分有参考价值，在垂直方向上，形成“大型乔木群-棚架灌木藤本-小型地被灌木”的分层配置，在水平方向上，又用“乔木-棚架-灌木”的布局方式将棚架休憩空间与广场活动空间相对分隔开来，从而营造出一个植被类型丰富、荫蔽效果较强的休憩空间。

图2 金银花混凝土棚架(P20)

Fig. 2 *L. japonica* concrete scaffolding (P20)

图3 大花山牵牛混凝土棚架(P18)

Fig. 3 *T. grandiflora* concrete scaffolding (P18)

图4 炮仗花复合结构棚架(P9)

Fig. 4 *P. venusta* compound scaffolding (P9)

美景度值最低的棚架景观为P9炮仗花复合结构棚架(图4)，其次为P12白花油麻藤木结构棚架、P11紫藤复合结构棚架。P9棚架式植物景观是由混凝土和石砖材料复合搭建成“丌”型结构，应用炮仗花作为棚架植物，设计别有特色，石砖材料的运用使棚架更加稳重和具文化感，柱干的层层错开则使棚架空间层次感更强烈，然而由于棚架植物老枝枯瘪，新叶稀疏，开花较少，且不在盛花期，棚顶植物覆盖较少，整体景观效果差。炮仗花适合生长在阳光充足、

通风良好、土壤排水顺畅的地方,然而此处棚架与周边乔木没有较为合适的种植距离,乔木过于茂密以致遮挡大部分光照,棚架处于湖岸,植物土壤过于潮湿,排水不畅导致植物生长发育不良。

P12 棚架式植物景观是纯木材料搭建成"冂"型结构,用白花油麻藤作为棚架植物。简洁厚实的原木柱干和红漆顶梁构成的棚架,从该处景观单方面看,顶梁与柱干、棚架与坐凳之间的色彩搭配不协调,景观效果一般。同时,由于棚架植物植株较小,还未攀援覆盖至棚顶,因而棚架缺乏良好的荫蔽性。

P11 棚架式植物景观,是用混凝土和木材料复合搭建成一种特殊型结构,配以紫藤作为棚架植物,然而紫藤在广州公园生长表现一般,枝叶稀疏,影响景观效果。

通过对 *SBE* 值最高和最低的上述植物景观进行分析,可以看出,公众在对棚架式植物景观进行评价时,尤为看中棚架植物的生长状况。其次,整个棚架式植物景观整体是否协调,如棚架的构造能否较好地搭配植物,整体色彩搭配,棚架植物与周边植物的配置等,也是评判标准之一。此外,使用较多的使君子棚架式植物景观的 *SBE* 较低,主要原因是其枝叶繁茂,花色渐变,整体的花感较弱,因而在景观评价时美景度值偏低。

3　结论与讨论

目前城市可利用绿地面积越来越小,在城市园林绿化中应用棚架构建植物景观成为增加垂直绿化面积的一种重要途径。城市园林绿地中已应用的藤本植物,尤其是常绿木本藤本植物,存在着种类偏少、景观效果单一、乡土特色不明显等情况[9]。华南地区适生的木质藤本植物作为垂直绿化景观的重要材料,具有鲜明的热带地域特色,生命周期长,且许多种类都具有很高的观赏价值[7],然而,很多具有较高观赏价值的藤本植物如大花山牵牛、紫萼龙吐珠、珊瑚藤等未被广泛应用,建议今后加大优良藤本植物的推广应用,使得城市园林垂直绿化景观更加丰富多样。

一个优秀的棚架式植物景观,需要一个合适的棚架结构与藤本植物相协调搭配,并且有鲜明的景观特色。人们在对棚架式植物景观进行评价时,棚架植物的生长状况成为影响植物景观评价结果的重要因素之一,如植物生长是否繁茂、能否完整覆盖顶棚、有无病虫害等,以及整个棚架式植物景观整体协调程度如何,包括棚架的构造及支柱物选择能否较好地搭配植物及协助植物健康生长,整体色彩搭配是否协调,棚架植物与周边植物的配置是否合理,棚架式植物景观效果是否具有地带性特色等,都是评价依据之一。

因此,棚架式植物景观通过采用适应本地气候生长条件的乡土植物作为棚架植物,要求生长快速,尽快覆盖棚顶,设计过程中合理考虑植物光照条件、土壤状况等生长环境条件,保障植物能健康生长,同时,棚架的设计力求能达到与植物、与整体环境相和谐的效果,可从支柱物、棚架构造、材料、色彩等[15]方面考虑,特别是支持物与木质藤本植物的相互影响机制的深入研究,将有效提升棚架植物生长速度与景观效果,有助于提高棚架式植物景观的生态效益。此外,适当增加棚架周边环境的植被类型,丰富植物配置,使棚架景观在整体环境中更加自然,注重后期养护,定期修整植物形态、防治病虫害、适时追肥等措施,从而改善棚架式植物景观。

参考文献:

[1] PERINI K, ROSASCO P. Is greening the building envelope economically sustainable? An analysisto evaluate the advantages of economy of scope of vertical greening systems and green roofs[J]. Urban Forestry&Urban Greening, 2016, 20: 328-337.

[2] 詹光惠. 浅论中国园林中的廊架嬗变[D]. 重庆:西南大学, 2012.

[3] 陈润. 现代园林设计中传统材料及新型材料的使用[J]. 现代装饰:理论, 2012(2):15-16.

[4] VLEUT I, LEVY-TACHER S I, GALINDO-GONZÁLEZ J, *et al*. Positive effects of surrounding rainforest on composition, diversity and late-successional seed dispersal by bats[J]. Basic & Applied Ecology, 2015, 16(4):308-315.

[5] 陶建平,钟章成. 支持物倾角对攀援植物栝楼形态和生长的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(1):1-7.
TAO J P, ZHONG Z C. Effects of support angles on the morphology and growth in the herbaceous climber *Trichosanthes kirilowii*[J]. Actaecologica Sinica, 2003, 23(1):1-7. (in Chinese)

[6] WRIGHT A, TOBIN M, MANGAN S, *et al*. Unique competitive effects of lianas and trees in a tropical forest understory[J]. Oecologia, 2015, 177(2):561-569.

[7] 王琳琅,翁殊斐,袁喆. 广州园林木质藤本资源调查及其景观物候特点[J]. 中国园林, 2015, 31(7):64-67.
WANG L L, WENG S F, YUAN Z. Resources investigation and phenological characteristics of lianas in Guangzhou landscape[J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31(7):64-67. (in Chinese)

[8] 袁喆,翁殊斐,王琳琅. 广州园林绿地木质藤本景观美景度评价[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(4):301-306.
YUAN Z, WENG S F, WANG L L. Scenic beauty estimation of linan landscape in Guangzhou green open spaces[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(4):301-306. (in Chinese)

[9] 秦吉中,童开林.6种藤本植物的生态效应比较[J].西北林学院学报,2013,28(5):63-65.
QIN J Z, TONG K L. Contrast of ecological benefits on six vines[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(5):63-65. (in Chinese)

[10] 寿海洋.木质藤本植物在上海园林中的应用现状及建议[J].中国园林,2017,33(1):78-82.
SHOU H Y. Present situation and suggestions on the application of woody lianas in Shanghai landscape architecture[J]. Chinese Landscape Architecture, 2017, 33(1):78-82. (in Chinese)

[11] PERINI K, BAZZOCCHI F, CROCI L, *et al*. The use of vertical greening systems to reduce the energy demand for air conditioning. field monitoring in mediterranean climate[J]. Energy & Buildings, 2017, 143:35-42.

[12] 曾晓阳,柳林安,高永恒.成都市空间立体绿化藤本植物的选择[J].西北林学院学报,2012,27(1):196-200.
ZENG X Y, LIU L A, GAO Y H. Selection of vine plants in three-dimensional greening in Chengdu[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1):196-200. (in Chinese)

[13] 翁殊斐,朱锦心,苏志尧,等.岭南地区滨水绿地植物景观评价[J].林业科学,2017,53(1):20-27.
WENG S F, ZHU J X, SU Z Y, *et al*. Landscape quality assessment of waterfront plants in green areas of Lingnan region[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2017, 53(1):20-27. (in Chinese)

[14] 马少龙.福州市城市垂直绿化美学评价及构建初探[D].福州:福建农林大学,2011.

[15] BAKAY L. Sustainable Development, Knowledge Society and Smart Future Manufacturing Technologies[M]. Switzerland: Springer, 2015.

(上接第241页)

[9] SILVERSTEIN R A, CHEN Y, SHARMA-SHIVAPPA R R, *et al*. A comparison of chemical pretreatment methods for improving saccharification of cotton stalks[J]. Bioresource Technology, 2006, 98(16):3000-3011.

[10] ANTWI P, LI J Z, BOADI P O, *et al*. Estimation of biogas and methane yields in an UASB treating potato starch processing wastewater with backpropagation artificial neural network[J]. Bioresource Technology, 2017, 228:106-115.

[11] ASTRAY G, GULLÓN B, LABIDI J, *et al*. Comparison between developed models using response surface methodology (RSM) and artificial neural networks (ANNs) with the purpose to optimize oligosaccharide mixtures production from sugar beet pulp[J]. Industrial Crops & Products, 2016, 92:290-299.

[12] DAS S, BHATTACHARYA A, HALDAR S, *et al*. Optimization of enzymatic saccharification of water hyacinth biomass for bio-ethanol: Comparison between artificial neural network and response surface methodology[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2015, 3:17-28.

[13] 李勇,龚晓武,王珂,等.稀盐酸水解棉秆产糖工艺的神经网络模拟与优化[J].石河子大学学报:自然科学版,2017,35(4):407-413.

[14] 李志霞,聂继云,闫震,等.响应面法对3,5-二硝基水杨酸比色法测定水果中还原糖含量条件的优化[J].分析测试学报,2016,35(10):1283-1288.
LI Z X, NIE J Y, YAN Z, *et al*. Optimization of 3,5-dinitrosalicylic acid colorimetry determination conditions of reducing sugar in fruits by response surface method[J]. Journal of Instrumental Analysis, 2016, 35(10):1283-1288. (in Chinese)

[15] 杨博文,王晓晓,李曦,等.5种当归类药材多糖量的比较[J].中草药,2016,47(21):3896-3900.

[16] 汪雪,周国模,周健,等.基于贝叶斯改进的人工神经网络毛竹林碳通量估算[J].西北林学院学报,2017,32(1):203-209.
WANG X, ZHOU G M, ZHOU J, *et al*. Estimation of *Phyllostachys heterocycla* cv. *pubescens* carbon flux based on artificial neural networks improved by Bayesian[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1):203-209. (in Chinese)

[17] 张义林,董华,周恩泽.基于BP神经网络的热管式真空管集热器热性能预测校正模型[J].太阳能学报,2008,29(6):690-693.

[18] VANI S, SUKUMARAN R K, SAVITHRI S. Prediction of sugar yields during hydrolysis of lignocellulosic biomass using artificial neural network modeling[J]. Bioresource Technology, 2015, 188:128-135.

[19] WANG M, ZHOU D, WANG Y, *et al*. Bioethanol production from cotton stalk: a comparative study of various pretreatments[J]. Fuel, 2016, 184:527-532.

西北林学院学报
XIBEI LINXUEYUAN XUEBAO
（1984年创刊）
2019年1月 第34卷第1期（总第155期）
（双月刊）

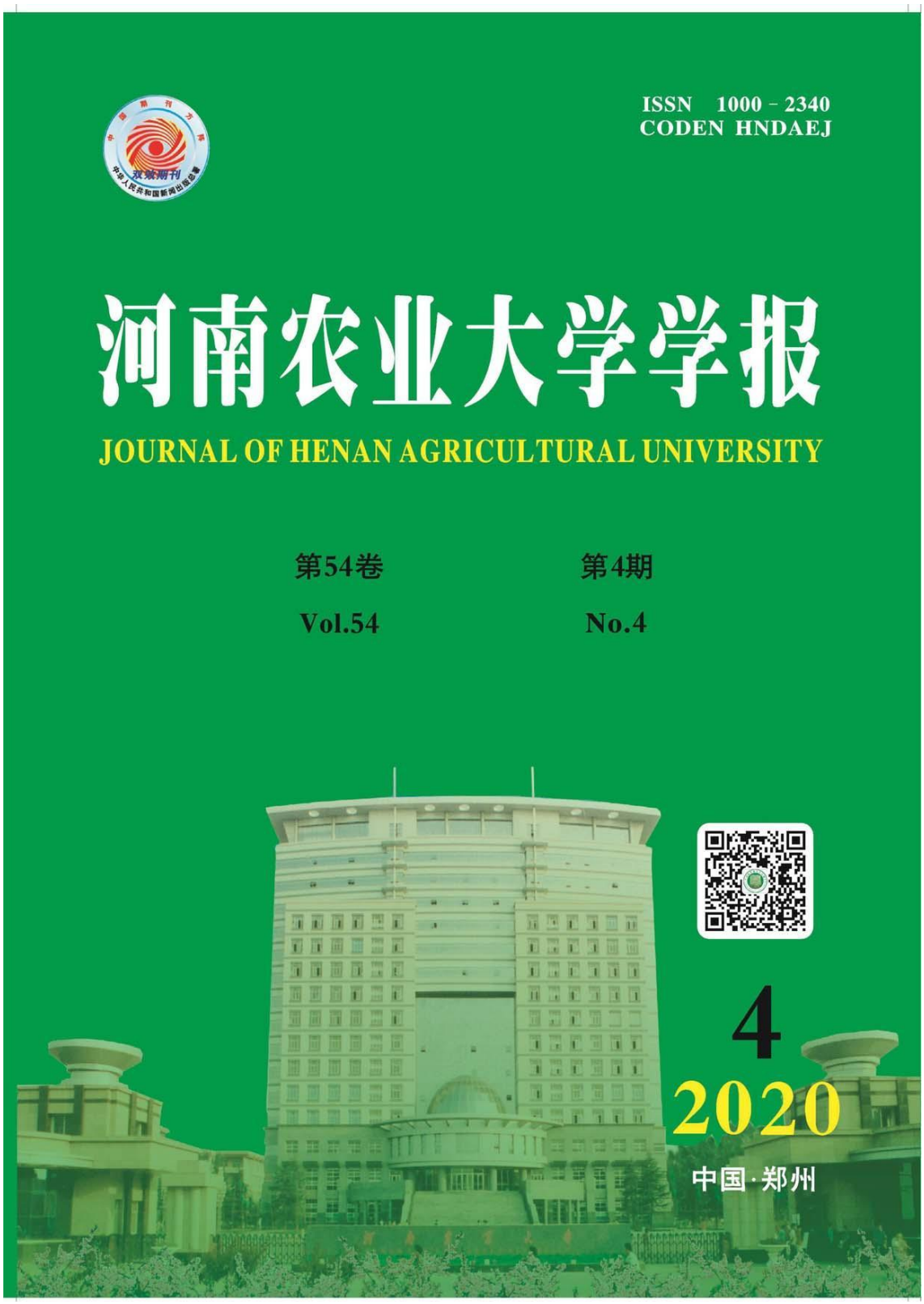
JOURNAL OF NORTHWEST FORESTRY UNIVERSITY
（Started in 1984）
Vol.34 No.1（Sum.155）Jan.2019
（Bimonthly）

主管单位：中华人民共和国教育部
主办单位：西北农林科技大学
编辑出版：西北林学院学报 编辑部（陕西杨陵邰城路3号 邮政编码：712100）
电　　话：029-87082059
电子信箱：xlxb@vip.163.com
网　　址：http://www.xblxb.cn
主　　编：刘建军
副 主 编：窦延玲（专职）
印　　刷：陕西森奥印务有限公司
国内总发行：陕西省西安市邮局
国内订阅：全国各地邮局
国外发行：中国国际图书贸易总公司（北京市车公庄西路35号）

Administrated: Ministry of Education P.R.China
Sponsored: Northwest A&F University
Edited & Published: Editorial Dep. of J. of NWFU (Yangling, Shaanxi, China, Postcode 712100)
Tel: 029-87082059
E-mail: xlxb@vip.163.com
Website: http://www.xblxb.cn
Chief Editor: LIU Jian-jun
Deputy Chief Editor: DOU Yan-ling
Printed: Shaanxi Senao Printing Co., Ltd.
Distributed Subscription: All Local Post Offices in China(No.52-99)
Foreign Distri: China International Book Trading Co.(No. 35 Chegongzhuang West Road, Beijing, China)(BM5621)

国际标准连续出版物刊号：ISSN 1001-7461
国内统一连续出版物刊号：CN 61-1202/S
公开发行　邮发代号：52-99　国内定价：40.00元

2.7.28 种防火林带树种树叶抗火性能研究



河南农业大学学报

第 54 卷第 4 期　　2020 年 8 月

目　次

期刊基本参数：CN 41-1112/S * 1960 * b * A4 * 190 * zh * P * ¥10.00 * 1 000 * 24 * 2020-08

JOURNAL OF HENAN AGRICULTURAL UNIVERSITY

Vol. 54 No. 4 Aug. 2020

CONTENTS

文章编号:1000-2340(2020)04-0575-07

28种防火林带树种树叶抗火性能研究

冼丽铧[1], 陈嘉杰[2], 陈红跃[1], 刘小玲[1], 卢志桥[1], 龚军凡[2]
(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642;
2. 中山市国有森林资源保护中心, 广东 中山 528458)

摘要:为探究树种的防火能力,科学选择防火林带树种,提高生物防火林带的树种多样性,对28种防火林带树种的理化指标进行测定,应用因子分析和聚类分析方法对其抗火性能进行综合排序与分类。结果表明,树叶热值与灰分、挥发分与固定碳之间呈极显著相关关系,热值与挥发分之间、灰分与挥发分之间呈显著相关关系;综合排序表明鸭脚木、夹竹桃、米老排、大叶相思、深山含笑、黧蒴、木荷、红花油茶、铁冬青、台湾相思、醉香含笑、凤凰木为抗火性较好的12个树种。聚类分析结果表明,抗火性强的树种有4种,夹竹桃、鸭脚木、大叶相思、铁冬青;抗火性较强的树种有7种,黧蒴、米老排、醉香含笑、台湾相思、深山含笑、木荷、山杜英;抗火性中等的树种有6种,西南木荷、乌桕、凤凰木、红花油茶、土沉香、樟树;抗火性较弱的树种有8种,枫香、柠檬桉、黄葛榕、马占相思、观光木、红苞木、红锥、山乌桕;抗火性弱的树种有3种,多花山竹子、蝴蝶果、假苹婆。

关键词:防火林带;抗火性能;因子分析;聚类分析
中图分类号:S718.43 文献标志码:A
DOI:10.16445/j.cnki.1000-2340.2020.04.003

Fire resistance of 28 tree species in fire-prevention belt

XIAN Lihua[1], CHEN Jiajie[2], CHEN Hongyue[1], LIU Xiaoling[1], LU Zhiqiao[1], GONG Junfan[2]
(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Forest Resources Protection Center of Zhongshan, Zhongshan 528458, China)

Abstract: In order to explore the fireproof ability of tree species, select tree species of fireproof forest belt scientifically and improve the species diversity of biological fireproof forest belt, the physical and chemical indexes of 28 species of fireproof forest belt tree species were measured in this study. Factor analysis and cluster analysis method was used to rank their fire performances. The results showed that the calorific value was significantly correlated with ash, volatiles matter and fixed carbon, and the calorific value was significantly correlated with volatiles and ash was significantly correlated with volatiles. Comprehensive ranking indicated that 12 species, *Schefflera octophylla*, *Nerium indicum*, *Mytilaria laosensis*, *Acacia auriculiformis*, *Michelia maudiae*, *Castanopsis fissa*, *Schima superba*, *Camellia japonica*, *Ilex rotunda*, *Acacia confusa*, *Michelia macclurei*, and *Delonix regia*, had good fire resistance. The results of clustering analysis showed that four kinds of trees, *Schefflera octophylla*, *Nerium indicum*, *Acacia auriculiformis*, and *Ilex rotunda* had the strongest fire resistance. Seven kinds of trees, *Castanopsis fissa*, *Mytilaria laosensis*, *Michelia macclurei*, *Acacia confusa*, *Michelia maudiae*, *Schima superba*, and *Elaeocarpus sylvestris*, had stronger fire resistance. Six kinds of trees, *Schima wallichii*, *Sapium sebiferum*, *Delonix regia*, *Schima superba*, *Aquilaria sinensis*, and *Cinnamomum camphora*,

收稿日期:2020-04-17
基金项目:中山市国有森林资源保护中心项目(F18372)
作者简介:冼丽铧(1987—),女,广东广州人,实验师,博士研究生,从事园林植物应用与城市绿化教学科研工作。
通信作者:陈红跃(1964—),男,广东汕头人,教授,博士。

had general fire resistance. Eight kinds of trees, *Liquidambar formosana*, *Eucalyptus citriodora*, *Ficus lacor*, *Acacia mangium*, *Michelia odora*, *Rhodoleia parvipetala*, *Castanopsis hystrix*, and *Sapium discolor*, had weaker fire resistance. Three kinds of trees, *Garcinia multiflora*, *Cleidiocarpon cavaleriei*, *and Sterculia lanceolata*, had the weakest fire resistance.

Key words: fire-prevention belt; fire resistance; factor analysis; clustering analysis

中山市是国家森林城市之一，加入了珠三角国家森林城市群，其森林防火意义重大。该市防火林带共应用了31个树种，隶属17科24属，其中，豆科、山茶科和樟科树种较多，而林带内树种数量较多的是木荷 *Schima superba*、台湾相思 *Acacia confusa*、柠檬桉 *Eucalyptus citriodora*、鸭脚木 *Schefflera octophylla*，防火林带林分树种组成较单一。树种是构成生物防火林带的主体，树种抗火性能的研究是评价林分抗火性能的重要内容，树种不同，森林的抗火性能有差异[1-3]。叶片作为乔木、灌木最容易燃烧的部分，成为森林火灾传播的主要媒介，水分含量、挥发分、发热量为树叶着火温度的主要因子[4]，植物功能性状不仅便于评价植物的抗火性能，也有利于筛选防火植物[5]。有研究对不同地带性森林乔木叶片热值特征，开展多因素的综合性研究。叶片碳含量是叶片热值变异的主要影响因素[6]，木本植物叶片热值的研究可以为科学评估其火灾危险性以及相应产生火行为提供基础数据[3,7-8]。森林木本植物活叶片抗火性能研究，有助于完善树种阻火性评价方法、筛选适宜的生物防火树种的研究[9-10]，但迄今对防火树种筛选以及综合评价方法的系统研究较少。在防火林带建设中，筛选和栽植抗火性能较强的树种是森林防火的关键[5]。本研究以中山市防火林带的树种为研究对象，采集并测定了28个常见木本植物叶片的热值，通过比较不同叶片的厚度、相对含水量、热值、灰分等理化性质指标，运用因子分析和聚类分析的方法，对树种叶片抗火性进行综合排序，探讨树种间抗火性能的差异，以期为中山市乃至粤港澳大湾区的高效防火树种选择及防火林带建设提供参考。

1 研究区概况

中山市(113°9′~113°46′E，22°11′~22°46′35″N)位于广东省中南部，热带北缘，热量丰富，全年最热为7月，日均温度为28.4 ℃，相对湿度年均83%，全年太阳辐射量最强为7月，光照最多为7—10月，属亚热带季风气候，光热充足，植被类型主要为热带季雨林型的常绿季雨林，森林覆盖率达23.08%，林地面积为2.87万 hm^2，林地森林覆盖率为96.70%，森林质量位于全省前列，生物防火林带411条，总长达591.8 km。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2018年6—8月，根据中山市生物防火林带的树种应用现状以及珠三角防火林带树种应用情况，在中山树木园选择了中山市现有的以及适合栽植的优良树种28种，以乡土树种为主，外来树种为辅，树龄基本在15~20 a之间，供试树种名录见表1。

表1 供试的树种名录

Table 1 Species list in the experiment

树种 Tree species	科名 Family	生活型 Life form	树种 Tree species	科名 Family	生活型 Life form
大叶相思 *Acacia auriculiformis*	豆科	常绿乔木	铁冬青 *Ilex rotunda*	冬青科	常绿乔木
台湾相思 *Acacia confusa*	豆科	常绿乔木	枫香 *Liquidambar formosana*	金缕梅科	落叶乔木
马占相思 *Acacia mangium*	豆科	常绿乔木	醉香含笑 *Michelia macclurei*	木兰科	常绿乔木
土沉香 *Aquilaria sinensis*	瑞香科	常绿乔木	深山含笑 *Michelia maudiae*	木兰科	常绿乔木
红花油茶 *Camellia chekiangoleosa*	山茶科	常绿小乔	木观光木 *Michelia odora*	木兰科	常绿乔木
黧蒴 *Castanopsis fissa*	壳斗科	常绿乔木	米老排 *Mytilaria laosensis*	金缕梅科	常绿乔木
红锥 *Castanopsis hystrix*	壳斗科	常绿乔木	夹竹桃 *Nerium indicum*	夹竹桃科	常绿灌木
樟树 *Cinnamomum camphora*	樟科	常绿乔木	红苞木 *Rhodoleia parvipetala*	金缕梅科	常绿乔木
蝴蝶果 *Cleidiocarpon cavaleriei*	大戟科	常绿乔木	山乌桕 *Sapium discolor*	大戟科	常绿乔木
凤凰木 *Delonix regia*	苏木科	常绿乔木	乌桕 *Sapium sebiferum*	大戟科	落叶乔木
山杜英 *Elaeocarpus sylvestris*	杜英科	常绿乔木	鸭脚木 *Schefflera octophylla*	五加科	常绿乔木
柠檬桉 *Eucalyptus citriodora*	桃金娘科	常绿乔木	木荷 *Schima superba*	山茶科	常绿乔木
黄葛榕 *Ficus lacor*	桑科	落叶乔木	西南木荷 *Schima wallichii*	山茶科	常绿乔木
多花山竹子 *Garcinia multiflora*	藤黄科	常绿乔木	假苹婆 *Sterculia lanceolata*	梧桐科	常绿乔木

2.2　试验方法

2.2.1　树木叶片厚度及相对含水量测定　每种试验树种各选 3 棵,每棵树在其向阳面选择成熟叶片 5 片,用游标卡尺测量叶片的厚度。叶片厚度测定后,采集叶片,用塑料袋密封带回实验室,用于相对含水量的测定,叶片相对含水量采用烘干称重法测定,取样时间在上午植株露水或雨水蒸发后进行,称取叶片鲜重,放入烘箱 105 ℃杀青 1 h,在 80 ℃下烘干至恒重,并称干重。计算叶片相对含水量,公式如下:

$$相对含水量=\frac{叶片鲜重-叶片干重}{叶片鲜重}\times 100\%$$

2.2.2　热值测定　按照 3 棵树、每棵树 5 片成熟叶的重复数采集叶片,进行热值、灰分、挥发分及固定碳测定与计算。采用 105 ℃烘干恒重法,样品在 80 ℃条件下烘 16 h 至恒重,用粉碎机粉碎后,每个样各取 6 g,装入塑料袋,密封备用。热值用德国 IKA C2000 自动量热仪,灰分和挥发分用 XL-1 型箱式高温炉测定,参考国家标准 GB/T212—2008《煤的工业分析方法》[11] 测定,固定碳采用以下公式计算:固定碳 = 100% - 灰分 - 挥发分。

2.2.3　数据处理　采用 Pearson 系数进行相关分析,采用 Factor Analysis 进行主成分分析,以上分析均采用 SPSS 19.0 统计软件,数据整理、计算与作表均采用 Microsoft Excel 2007 软件进行。

3　结果与分析

3.1　28 种树种叶片厚度及相对含水量分析

由表 2 可知,叶片最厚的为红花油茶,达 0.36 mm,其次是多花山竹子、夹竹桃、红苞木;叶片最薄的是黄葛榕,仅 0.16 mm,其次是西南木荷、凤凰木、山乌桕。叶片相对含水量最高的是多花山竹子,达 58%,其次是山乌桕、米老排、蝴蝶果;叶片相对含水量最低的是黄葛榕,仅 25%,其次是土沉香、观光木、夹竹桃。叶片厚度和叶片含水量影响着叶片的燃烧性能,叶片厚度越大,其含水量越高,叶片的燃烧速度越慢,起到较好的抗火性。

表 2　28 种树种叶片的抗火性指标

Table 2　Fire prevention ability of 28 tree species

树种 Tree species	叶片厚度/mm Leaf thickness	相对含水量/% Relative moisture content	热值/(kJ·g^{-1}) Caloric value	灰分/% Crude ash content	挥发分/% Volatile matter	固定碳/% Fixed carbon
大叶相思 *Acacia auriculiformis*	0.24	39	21.57	5.32	73.28	21.40
台湾相思 *Acacia confusa*	0.27	34	21.59	4.51	75.48	20.01
马占相思 *Acacia mangium*	0.27	42	21.35	5.05	72.14	22.81
土沉香 *Aquilaria sinensis*	0.22	26	19.06	7.21	75.46	17.33
红花油茶 *Camellia chekiangoleosa*	0.36	44	18.77	6.05	73.81	20.14
黧蒴 *Castanopsis fissa*	0.19	43	20.77	3.01	78.67	18.32
红锥 *Castanopsis hystrix*	0.20	45	18.98	3.43	72.38	24.19
樟树 *Cinnamomum camphora*	0.20	37	19.76	7.13	74.76	18.11
蝴蝶果 *Cleidiocarpon cavaleriei*	0.21	47	18.97	4.54	73.88	21.58
凤凰木 *Delonix regia*	0.18	46	20.02	4.36	71.12	24.52
山杜英 *Elaeocarpus sylvestris*	0.20	37	18.70	3.36	75.64	21.00
柠檬桉 *Eucalyptus citriodora*	0.24	45	20.32	5.30	69.61	25.09
黄葛榕 *Ficus lacor*	0.16	25	18.25	8.81	70.53	20.66
多花山竹子 *Garcinia multiflora*	0.35	58	18.98	3.59	80.64	15.77
铁冬青 *Ilex rotunda*	0.24	38	19.89	6.49	78.28	15.23
枫香 *Liquidambar formosana*	0.23	35	17.40	9.22	70.38	20.40
醉香含笑 *Michelia macclurei*	0.26	39	20.60	4.05	75.59	20.36
深山含笑 *Michelia maudiae*	0.27	38	21.66	4.30	76.73	18.97
观光木 *Michelia odora*	0.22	28	19.96	5.49	76.93	17.58
米老排 *Mytilaria laosensis*	0.23	47	21.94	2.86	78.40	18.74
夹竹桃 *Nerium indicum*	0.35	33	20.51	7.64	80.28	12.08
红苞木 *Rhodoleia parvipetala*	0.33	34	20.89	1.97	77.22	20.81
山乌桕 *Sapium discolor*	0.19	48	19.39	3.13	73.61	23.26
乌桕 *Sapium sebiferum*	0.22	37	17.82	5.17	75.55	19.28
鸭脚木 *Schefflera octophylla*	0.28	40	21.71	4.74	82.27	12.99
木荷 *Schima superba*	0.21	45	19.80	3.96	74.05	21.99
西南木荷 *Schima wallichii*	0.17	38	19.78	4.16	73.23	22.61
假苹婆 *Sterculia lanceolata*	0.25	35	18.03	9.96	73.42	16.62

3.2 28 种树种叶片热值分析

不同植物种类，其叶片的厚度、相对含水量等理化性质不同，热值也不同，树木叶片的热值情况见表2。测试结果表明，28 个树种的热值在 17.40 ~ 21.94(kJ·g^{-1})间变化，平均值为 19.90 (kJ·g^{-1})，其中热值最高的是米老排，达 21.94 kJ·g^{-1}，其次是鸭脚木、深山含笑、台湾相思、大叶相思；热值最小的是枫香，为 17.40 kJ·g^{-1}，其次是乌桕、假苹婆、黄葛榕、山杜英。

3.3 28 种树种叶片灰分、挥发分及固定碳分析

在叶片燃烧过程中，叶片灰分含量一定程度上能对有焰燃烧起阻滞作用，灰分含量越高，叶片的抗火性越强。从表 2 可以看出，灰分的变化区间是 1.97% ~9.96%，灰分含量最高的是假苹婆，为 9.96%，其次是枫香、黄葛榕、夹竹桃、土沉香；灰分含量最低的是红苞木，为 1.97%，其次是米老排、鼠蒴、山乌桕、山杜英。

树木叶片挥发分含量的变化区间为 69.61% ~82.27%，挥发分含量最高的是鸭脚木，达 82.27%，其次是多花山竹子、夹竹桃、鼠蒴、米老排，挥发分含量最低的是柠檬桉，为 69.61%，再次是枫香、黄葛榕、凤凰木、马占相思。植物叶片中固定碳在可燃组分中的相对含量反映样品木质素含量水平，木质素是可燃组分的重要组成之一，树木叶片固定碳的变化区间为 12.08% ~25.09%，固定碳含量最高的是柠檬桉，达 25.09%，其次是凤凰木、红锥、山乌桕；固定碳含量最低的是夹竹桃，为 12.08%，其次是鸭脚木、铁冬青、多花山竹子、假苹婆。

3.4 28 种树种抗火性综合排序

为综合比较不同树种叶片的抗火性能，对 6 个变量进行相关分析，分析过程得到的相关矩阵如表 3 所示。从表 3 可以看出，热值与灰分、挥发分与固定碳之间呈极显著相关关系，热值与挥发分之间、灰分与挥发分之间呈显著相关关系。由于多数因子之间存在相关性，对各因子进行主成分分析，结果如表 4 所示。共提取了 6 个综合因子，与原始提供的因子一样多，其中提取了 3 个综合因子为主成分，3 个综合因子的累计贡献率达到了 79.725%，为了解释主成分的意义，采用了 Kaiser 标准化正交旋转法，旋转后因子负载重新进行分配，使公因子负载系数向更大或更小方向变化旋转，在 5 次迭代后收敛，结果如表 5 所示。

表3 28 种树种叶片特征与防火因子间的相关分析

Table 3 Pearson's correlation coefficients between growth index and fire prevention factors for 28 tree species

变量 Variable	叶片厚度 Leaf thickness	相对含水量 Moisture content	热值 Caloric value	灰分 Crude ash content	挥发分 Volatile matter	固定碳 Fixed carbon
叶片厚度 Leaf thickness	1.000					
相对含水量 Moisture content	0.319	1.000				
热值 Caloric value	0.469	0.170	1.000			
灰分 Crude ash content	0.067	0.499	0.002**	1.000		
挥发分 Volatile matter	0.313	0.226	0.024*	0.050*	1.000	
固定碳 Fixed carbon	0.074	0.225	0.400	0.053	0.000**	1.000

注：** 表示在 0.01 水平上显著相关，* 表示在 0.05 水平上显著相关。

Note: ** means significant correlation at 0.01 level; * means significant correlation at 0.05 level.

表4 28 种树种主成分分析结果

Table 4 The eigenvalues and contribution ratio for principal component analysis of 28 tree species

变量 Variable	初始特征值 Initial eigenvalues			提取的因子累载荷量 Extraction sums of squared loadings			旋转平方和载入 Rotation sums of squared loadings		
	特征值 Eigen values	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative	特征值 Eigen values	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate	特征值 Eigen values	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
1	2.048	34.134	34.134	2.048	34.134	34.134	1.950	32.494	32.494
2	1.727	28.783	62.917	1.727	28.783	62.917	1.750	29.164	61.658
3	1.008	16.808	79.725	1.008	16.808	79.725	1.084	18.067	79.725
4	0.828	13.800	93.525						
5	0.388	6.475	100.000						
6	0.000	0.000	100.000						

表 5　28 种树种主成分矩阵与旋转主成分矩阵

Table 5　The matrixes for principal component and rotating principal component of 28 tree species

评价指标 Evaluation index	主成分 Principal component			旋转主成分 Rotating principal		
	1	2	3	F_1	F_2	F_3
叶片厚度 Leaf thickness	0.186	0.576	0.433	0.497	-0.255	0.492
相对含水量 Moisture content	-0.329	0.083	0.853	-0.171	0.009	0.902
热值 Caloric value	0.586	-0.551	0.155	0.206	0.788	-0.087
灰分 Crude ash content	-0.300	0.855	-0.239	0.191	-0.917	0.008
挥发分 Volatile matter	0.946	0.054	0.089	0.829	0.455	-0.103
固定碳 Fixed carbon	-0.759	-0.592	0.061	-0.952	0.122	0.098

主成分 F_1 在固定碳、挥发分上的载荷较大,体现了主要受固定碳、挥发分因子影响的叶片抗火性 x_1,把主成分 1 命名为 y_1;主成分 F_2 在灰分和热值上的载荷较大,体现了主要受灰分和热值因子影响的抗火性能 x_2,把主成分 2 命名为 y_2;主成分 F_3 在相对含水量和叶片厚度上的载荷较大,体现了主要受相对含水量和叶片厚度因子影响的抗火性能 x_3,把主成分 3 命名为 y_3。根据表 4 和表 5 结果,计算出 3 个主成分的得分 y_1、y_2、y_3 以及综合得分 y,$y = 0.324\,9\,y_1 + 0.291\,6\,y_2 + 0.180\,7\,y_3$,最后对综合评分进行排序,结果如表 6 所示。从综合得分差异并结合叶片的理化特征分析,对 28 个树种进行抗火性排序和分类,结果表明:鸭脚木、夹竹桃、米老排、大叶相思、深山含笑、黧蒴、木荷、红花油茶、铁冬青、台湾相思、醉香含笑、凤凰木为抗火性较好的树种,表现出很强的抗火性;马占相思、红苞木、山杜英、樟树、黄葛榕得分比较接近,为抗火性中等的树种;观光木、山乌桕、土沉香、红锥、乌桕为抗火性较差的树种,西南木荷、枫香、柠檬桉、假苹婆、多花山竹子、蝴蝶果得分较接近,为抗火性最差的树种。

表 6　28 种树种植物综合得分

Table 6　Score of living leaves of 28 tree species

树种 Tree species	主成分得分 Principal component scoring			综合评分 Comprehensive evaluation	综合排名 Comprehensive ranking
	y_1	y_2	y_3		
鸭脚木 *Schefflera octophylla*	1.231 2	0.752 0	0.515 1	0.712 5	1
夹竹桃 *Nerium indicum*	1.383 6	0.044 0	0.523 1	0.556 9	2
米老排 *Mytilaria laosensis*	0.367 6	0.985 2	0.657 8	0.525 6	3
大叶相思 *Acacia auriculiformis*	0.679 7	0.426 0	0.479 5	0.431 7	4
深山含笑 *Michelia maudiae*	0.404 4	0.662 4	0.527 7	0.419 9	5
黧蒴 *Castanopsis fissa*	0.292 5	0.818 1	0.472 0	0.418 9	6
木荷 *Schima superba*	0.033 0	0.905 8	0.600 7	0.383 4	7
红花油茶 *Camellia chekiangoleosa*	0.692 8	-0.066 0	0.820 5	0.354 1	8
铁冬青 *Ilex rotunda*	0.680 4	0.160 9	0.452 7	0.349 8	9
台湾相思 *Acacia confusa*	0.269 8	0.589 8	0.437 8	0.338 8	10
醉香含笑 *Michelia macclurei*	0.145 2	0.491 6	0.571 4	0.293 8	11
凤凰木 *Delonix regia*	0.216 0	0.336 4	0.557 2	0.269 0	12
马占相思 *Acacia mangium*	-0.193 8	0.394 6	0.710 0	0.180 4	13
红苞木 *Rhodoleia parvipetala*	-0.016 9	0.186 5	0.650 7	0.166 5	14
山杜英 *Elaeocarpus sylvestris*	-0.132 7	0.321 1	0.416 3	0.125 8	15
樟树 *Cinnamomum camphora*	0.158 5	0.013 8	0.385 2	0.125 1	16
黄葛榕 *Ficus lacor*	-0.171 9	0.558 5	-0.036 3	0.100 5	17
观光木 *Michelia odora*	-0.150 9	0.368 6	0.217 0	0.097 7	18
山乌桕 *Sapium discolor*	-0.485 7	0.430 6	0.713 6	0.096 7	19
土沉香 *Aquilaria sinensis*	0.336 6	-0.126 4	0.133 3	0.096 6	20
红锥 *Castanopsis hystrix*	-0.291 3	0.176 9	0.649 6	0.074 3	21
乌桕 *Sapium sebiferum*	0.038 6	-0.083 1	0.469 5	0.073 1	22
西南木荷 *Schima wallichii*	-0.198 3	-0.012 6	0.383 1	0.001 1	23
枫香 *Liquidambar formosana*	-0.520 9	0.269 0	0.470 9	-0.005 7	24
柠檬桉 *Eucalyptus citriodora*	-0.654 2	0.155 0	0.779 5	-0.026 6	25
假苹婆 *Sterculia lanceolata*	0.299 0	-0.734 8	0.483 2	-0.029 8	26
多花山竹子 *Garcinia multiflora*	-0.105 9	-0.948 2	1.410 8	-0.056 1	27
蝴蝶果 *Cleidiocarpon cavaleriei*	-0.360 7	-0.578 7	0.766 1	-0.147 6	28

3.5 28 种树种抗火性聚类分析

以不同树种的叶片厚度、叶片相对含水量、热值、灰分、挥发分、固定碳为聚类指标，使用离差平方和法对 28 种树种抗火性进行系统聚类，得出 28 种树种的抗火性分类，聚类树形图如图 1 所示。

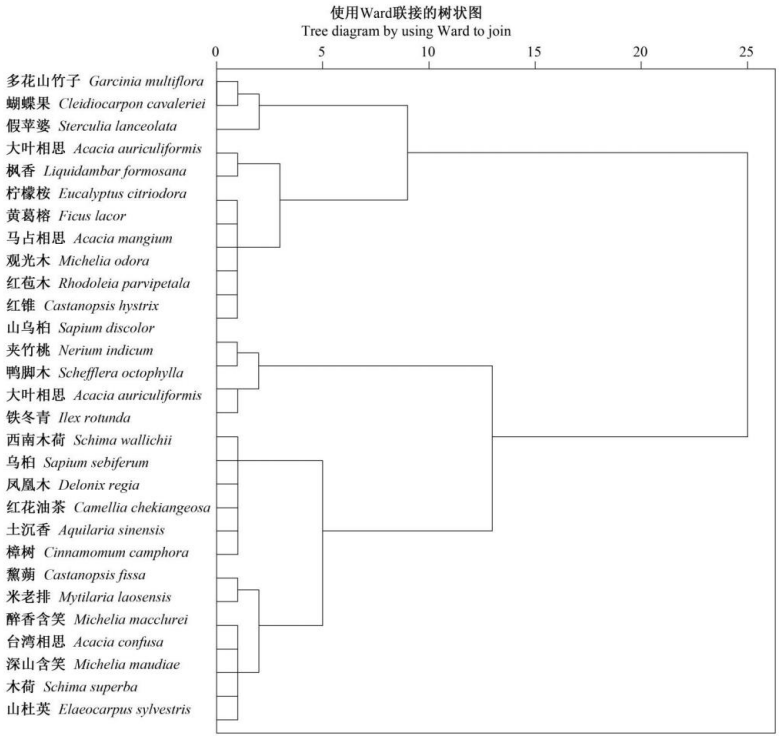


图 1 28 种树种的系统聚类图

Fig. 1 Dendrogram using average linkage

图 1 中 28 种树种依据抗火性由强到弱被分为 5 类：Ⅰ类夹竹桃、鸭脚木、大叶相思、铁冬青；Ⅱ类黧蒴、米老排、醉香含笑、台湾相思、深山含笑、木荷、山杜英；Ⅲ类西南木荷、乌桕、凤凰木、红花油菜、土沉香、樟树；Ⅳ类枫香、柠檬桉、黄葛榕、马占相思、观光木、红苞木、红锥、山乌桕；Ⅴ类多花山竹子、蝴蝶果、假苹婆。

4 讨论与结论

树木叶片理化特征不同对树种抗火性的影响程度不同，可得出不同树种在抗火、耐火及阻火性能上的强弱[1,2]。有研究表明，决定特定植物可燃物火蔓延的临界含水量与其干基热值密切相关[1,3]，热值越高，往往需要吸收较少量的能量以蒸发叶片持有的水分，对火势的蔓延和传播贡献越大，导致树冠火较易蔓延，而热值越低，则反映出叶片需要吸收更多的热量才得以蒸发叶片持有的水分，使得树冠火蔓延得较慢，甚至难以蔓延而自动熄灭。挥发分或固定碳的含量波动与植物叶片主要组成及其热解特性有关，挥发分含量越高，相对来说材料的可燃性越佳，固定碳多说明木质素含量高，相对含有半纤维素和纤维素的量少，热稳定性强[1,4]。本研究对中山市 28 种常见防火林带树种的叶片厚度、叶片相对含水量、热值、灰分、挥发分、固定碳 6 个因子进行测定和分析，应用因子分析法对其进行抗火性排序和分类，树木叶片抗火性由强到弱依次为：鸭脚木、夹竹桃、米老排、大叶相思、深山含笑、黧蒴、木荷、红花油茶、铁冬青、台湾相思、醉香含笑、凤凰木、马占相思、红苞木、山杜英、樟树、黄葛榕、观光木、山乌桕、土沉香、红锥、乌桕、西南木荷、枫香、柠檬桉、假苹婆、多花山竹子、蝴蝶果。Ⅰ类抗火性强，夹竹桃、鸭脚木、大叶相思、铁

冬青;Ⅱ类抗火性较强,黧蒴、米老排、醉香含笑、台湾相思、深山含笑、木荷、山杜英;Ⅲ类抗火性中等,西南木荷、乌桕、凤凰木、红花油茶、土沉香、樟树;Ⅳ类抗火性较弱,枫香、柠檬桉、黄葛榕、马占相思、观光木、红苞木、红锥、山乌桕;Ⅴ类抗火性弱,多花山竹子、蝴蝶果、假苹婆。

本研究采用因子分析和聚类分析方法探讨了 28 种树种的抗火性能排序,其中与前人研究发现铁冬青、木荷、樟树、米老排、醉香含笑为抗火性较强树种[15-17]一致,但如西南木荷、山乌桕等树种在采用两种方法对其抗火性进行判定存在一定差异性,可能由于叶片抗火性只是树种抗火性的一部分,而选取的抗火性评价因子有限。

参考文献:

[1] 谢玉敏,李军伟. 树种燃烧性的研究[J]. 森林防火,1999,62(3):38-39.

[2] 舒立福,田晓瑞,李红,等. 我国亚热带若干树种的抗火性研究[J]. 火灾科学,2000,9(2):1-7.

[3] 陶骏骏,王海晖,姚奉奇,等. 木本植物叶片热值测试和分析[J]. 林业科学研究,2018,31(2):48-54.

[4] 李振问,阮传成. 防火树种着火特性的研究[J]. 福建林学院学报,1995,15(3):198-202.

[5] 李修鹏,杨晓东,余树全,等. 基于功能性状的常绿阔叶植物防火性能评价[J]. 生态学报,2013,33(20):6604-6613.

[6] 宋广艳,何念鹏,侯继华. 中国不同地带性森林乔木叶片热值特征及其影响因素[J]. 林业科学研究,2016,29(1):133-139.

[7] QUAAK P, KNOEF H, STASSEN H E. Energy from biomass: a review of combustion and gasification technologies[M]. Washington: World Bank Publications,1999.

[8] 国家林业局森林防火办公室. 中国生物防火林带建设[M]. 北京:中国林业出版社,2003.

[9] 梁琴,陶建平,邓锋,等. 喀斯特山区 9 种常见树木叶片在防火期的阻火性分析[J]. 林业科学,2015,51(3):102-108.

[10] 李世友,赵家刚,张雨瑶,等. 滇中地区 11 种森林木本植物活叶片抗火性能[J]. 华中农业大学学报,2015,34(5):25-30.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T 212—2008 煤的工业分析方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[12] 邹璐,陶远胜,甘继权,等. 井冈山自然保护区 16 种树叶的抗火性排序[J]. 江西农业大学学报,2012,34(5):976-982.

[13] 陶骏骏,王海晖,姚奉奇,等. 木本植物叶片热值测试和分析[J]. 林业科学研究,2018,31(2):48-54.

[14] 王寅,王海晖,朱凤,等. 树叶组成的热解反应及热稳定性的理论解析[J]. 林业科学,2012,48(11):98-106.

[15] 李小川,吴泽鹏,陈宏通,等. 广东省珠江三角洲城市森林抗火树种筛选研究[J]. 热带亚热带植物学报,2003,11(4):316-318.

[16] 舒立福,田晓瑞,寇纪烈. 广西大桂山区防火树种的选择研究[J]. 林业科学,1999,35(1):69-76.

(责任编辑:李莹)

(上接第 574 页)

[17] 朱亚艳,何花,秦雪,等. 马尾松二代育种亲本遗传多样性分析[J]. 中南林业科技大学学报,2014,34(9):65-69.

[18] 谭小梅,周志春,金国庆,等. 马尾松二代无性系种子园子代父本分析及花粉散布[J]. 植物生态学报,2011,35(9):937-945.

[19] 林能庆. 马尾松无性系种子园结实量与生长性状的相关分析[J]. 防护林科技,2013,3(10):10-12.

[20] 徐进,王章荣,陈亚斌,等. 马尾松种子园无性系结实量、种实性状及遗传参数的分析[J]. 林业科学,2004,40(4):201-205.

[21] 张国洲,谢维斌. 马尾松种子园无性系种实性状研究[J]. 种子,2012,31(1):88-89.

[22] 段琼. 马尾松千粒重变异规律及其应用[J]. 四川林业科技,2002,23(2):38-41.

(责任编辑:李莹)

全国中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国期刊方阵双效期刊
全国农林类核心期刊
全国优秀科技期刊
中国高校优秀科技期刊
河南省优秀科技期刊
河南省一级期刊

- 《国际农业科技情报系统》（AGRIS）来源期刊
- 《化学文摘》（CA）来源期刊
- 《国际农业与生物科学中心文摘》（CABI）固定收录期刊
- 《文摘杂志》（AJ）来源期刊
- 《中国科学引文数据库》（CSCD）来源期刊
- 《中国科技论文统计源期刊》（CSTPC）来源期刊
- 《中文核心期刊要目总览》核心期刊
- 《中国科技期刊引证报告》来源期刊
- 《中国学术期刊（光盘版）》（CAJ-CD）全文收录期刊
- 《中国期刊网》全文收录期刊
- 《中国学术期刊综合评价数据库》来源期刊
- 《中国核心期刊（遴选）数据库》来源期刊
- 《中国科技文献（光盘版）数据库》（CSTDB）来源期刊

河南农业大学学报
Henan Nongye Daxue Xuebao
（双月刊 1960年创刊）
第54卷 第4期（总第220期）2020年8月

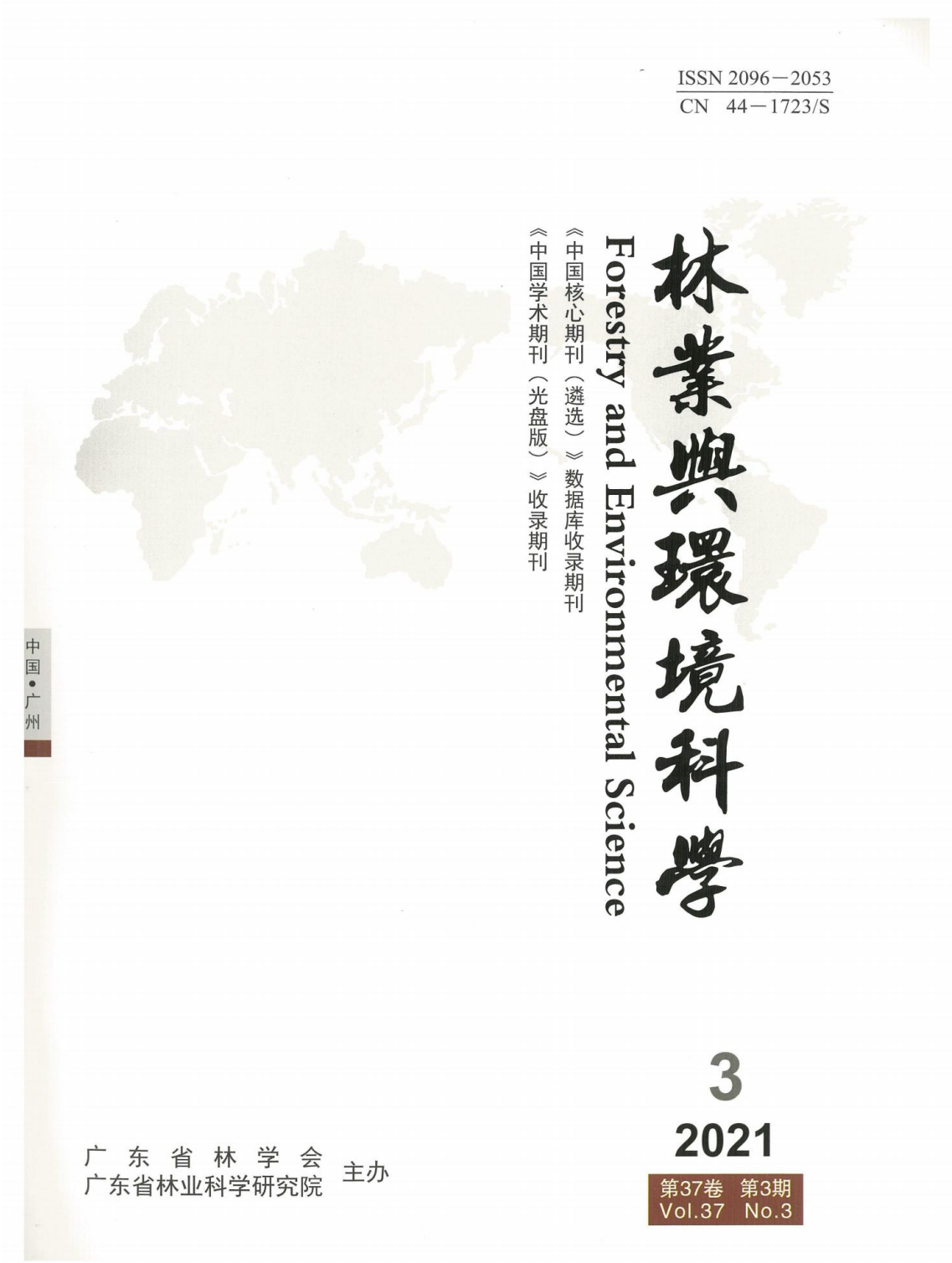
JOURNAL OF HENAN AGRICULTURAL UNIVERSITY
(Bimonthly, Started in 1960)
Vol.54 No.4 (Sum. No. 220) Aug. 2020

主管单位 河南农业大学
主办单位 河南农业大学
编辑出版 《河南农业大学学报》编辑部（郑州市文化路95号）
邮政编码 450002
电　　话 0371-63558885
网　　址 http://nnxb.cbpt.cnki.net
电子函件 hnndxb@henau.edu.cn
主　　编 张改平
印　　刷 河南金河印务有限公司
订 购 处 全国各地邮局
国内发行 郑州市邮政局
国外发行 中国出版对外贸易总公司（北京782信箱）

Responsible Institution: Henan Agricultural University
Sponsored by: Henan Agricultural University
Edited & Published by: Editorial Board of Journal of Henan Agricultural University (95 Wenhua Rd., Zhengzhou, China)
Post Code: 450002
Tel: 0371-63558885
Website: http://nnxb.cbpt.cnki.net
E-Mail: hnndxb@henau.edu.cn
Editor-in-Chief: ZHANG Gaiping
Printed by: Henan Jinhe Printing Co., Ltd.
Distributed Abroad by: China Publishing Foreign Trade Corporation (P.O. Box 782, Beijing, China)

刊号：ISSN 1000-2340 / CN 41-1112/S
国内邮发代号：36-132　定价：10.00元
ISSN 1000-2340

2.8. 重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展



林业与环境科学
Forestry and Environmental Science
2021年6月第37卷第3期

目　次

Forestry and Environmental Science
Jun. 2021 Vol.37 No.3

CONTENTS

重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展*

冼丽铧　梁登裕　冯嘉仪　吴道铭　陈红跃
（华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642）

摘要　工业、农业和交通等来源引起的土壤重金属污染问题日益突出，土壤环境质量形势严峻，污染土壤的生态修复与治理已然成为亟待解决的科学问题。植物修复技术是修复重金属污染土壤的一种有效途径。基于园林植物对重金属元素的富集和吸收作用，植物修复技术具有经济、生态、环保、对环境破坏力度小、美化环境等优势，已成为众多学者关注的研究热点。文章通过查阅文献资料，对近年园林植物修复重金属污染土壤领域的研究成果进行了梳理与阐述，从园林植物修复土壤重金属的技术、重金属富集园林植物的筛选、植物修复技术的联合应用等方面进行了总结归纳和分析，同时对植物修复土壤重金属污染的发展前景进行了展望。

关键词　园林植物；重金属污染土壤；超富集植物；植物修复联合技术
中图分类号：X53　**文献标志码**：A　**文章编号**：2096-2053（2021）03-0124-09

Remediation Technology and Its Application of Landscape Plants for Heavy Metal Contaminated Soil

XIAN Lihua　LIANG Dengyu　FENG Jiayi
WU Daoming　CHEN Hongyue
（College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou,Guangdong 510642, China）

Abstract　The environmental problem of soil heavy metal pollution caused by industry, agriculture, transportation, etc. is becoming increasingly prominent. The situation of soil environmental quality is severe, and ecological remediation and treatment of polluted soil have become an urgent scientific problem to be solved. Phytoremediation technology is considered as an effective approach to remediation of soils contaminated by heavy metals. Based on the enrichment and absorption of heavy metal elements by landscape plants, phytoremediation technology has become a research focus of scholars for its advantages in economy, ecology, environmental protection, small damage to the environment and beautification of the environment. In this paper, the landscape phytoremediation of heavy metal contaminated soil in recent years and the research achievements in the field were studied by summarizing and analyzing the consult literature in the following aspects: 1) landscape plant repairing technology of soil heavy metal, 2) heavy metal enrichment of landscape plant selection, 3) joint application of phytoremediation technology. The development prospect of phytoremediation of soil heavy metal pollution was prospected.

Key words　landscape plants; heavy metal contaminated soil; superenriched plants; joint phytoremediation techniques

* **基金项目**：国家自然科学基金项目 (41807112)，广州市生态环境局项目（h20210335），华南农业大学大学生创新创业训练计划项目（2019002）。
第一作者：冼丽铧（1987—），女，实验师，从事园林植物应用与城市绿化研究，E-mail：xianlihua@scau.edu.cn。
通信作者：陈红跃（1964—），男，教授，主要从事森林培育教学与研究，E-mail：chenyue@scau.edu.cn。

随着人口的快速增长及城市化、工业化、农村集约化进程的加速，矿山开采与冶炼、农业生产中化肥农药的大量施用，城市建设发展用地、城市生活污水和工业污水大量排放[1]等情况加剧，重金属元素大量进入土壤系统，致使土壤的重金属污染日渐严重。2014年，国土资源部与环境保护部发布了《全国土壤污染状况调查公报》[2]，其中指出我国土壤重金属超标率达16%以上，土壤环境形势严峻。重金属元素是一类难以降解的积累性元素，常见重金属元素包括锰（Mn）、锌（Zn）、铜（Cu）、镍（Ni）、镉（Cd）、铅（Pb）、铬（Cr）、汞（Hg）、砷（As）、银（Ag）、锡（Sn）等。在环境污染方面，Cd、Hg、Pb、Cr、As等重金属的生物毒性较强，Cu、Zn、Ni、Sn、钴（Co）、钒（V）等重金属也具有毒性。土壤中的重金属经过植物富集后沿食物链在营养级之间传递，从而进入人体，危害人类生命健康。如人体暴露于高水平的Pb会导致严重的健康隐患，可导致缺乏协调性或神经系统瘫痪，尤其对幼儿智力发育有着严重的不良影响[3]，在华南沿海地区具有代表性的森林土壤，Pb含量较高，均超过土壤污染风险管控标准规定的风险筛选值70 mg · kg^{-1}[4]。Cd在人体内含量超标会导致泌尿系统功能紊乱，甚至影响骨骼发育；As是成人和儿童急性重金属中毒的最常见原因，会导致呼吸系统疾病，如肺功能降低甚至肺癌[5-6]；Hg是一种神经毒素，会损害人的中枢神经系统，包括语言中枢和听觉中枢，还会导致肌无力[7]。同时，重金属污染还对生态系统构成了隐性威胁，也对城市的生存发展提出了严峻的挑战。目前世界各国环境工作者都在共同关注土壤重金属污染问题，治理修复土壤重金属污染已成为一项研究热点。

将园林植物用于修复遭受重金属污染的土壤，不但能够减轻土壤的污染程度，而且还能净化空气、美化环境，避免重金属从食物链进入人体，带来环境与社会效益[8]。我国辽阔的国土和复杂多样的地形地势造就了丰富的植物资源，有可能蕴藏大量的超富集植物。丰富的植物资源为开展园林植物修复技术方面的研究提供了良好的条件，本文旨在对近年植物修复重金属污染土壤的研究作一综合论述，以期为园林植物在土壤重金属修复上的应用提供参考。

1 园林植物修复重金属污染土壤技术

园林植物指应用于园林绿化的植物，可分为庭荫植物、行道树、花灌木、绿篱植物、垂直绿化植物、地被植物、室内装饰植物等[9]。园林植物不仅可用作组景、观赏、装饰、分隔空间、防护、庇荫等，更是城市复合生态系统的重要组成元素，在空气净化、土壤修复、气候调节、生态环境的改善等方面起着不可或缺的作用。植物修复技术指利用天然生长植物，或通过基因工程手段培育的新植物，对土壤重金属污染进行修复的一类技术的总称，这一技术可利用植物系统本身或其根际微生物群落来挥发、固定或移除土壤中的重金属，去除或减缓由重金属污染物及其它有机或无机毒物造成的土壤污染[10]。植物修复土壤重金属污染的技术主要包括植物提取作用、植物挥发作用和植物固定作用。植物修复技术可实现治理过程的原位性，成本低廉且效果永久，更具有后期处理简易和环境美学兼容等优点[11-12]，是治理重金属污染土壤的优良选择。

1.1 植物提取

植物提取基于植物的过度积累机制[13]，指利用超富集植物根系大量吸收土壤中的重金属并转运到地上的可收割部分，通过定期收获植物或植株死亡来去除土壤中的重金属，以达成修复重金属污染土壤的目标[14]，适用于重金属污染较严重且已知污染重金属元素的土壤。超富集植物分为两类：包括超积累植物和诱导积累植物。超积累植物能够较强地吸收富集重金属，诱导积累植物虽无超积累特性，但经过改造同样能够被诱导出超积累能力。植物提取目前是最广为使用的，其发展前景也十分广阔。

1.2 植物挥发

植物挥发是利用一些植物根系分泌的特殊物质，或由于植物代谢潜能与根际微生物的共同作用，使土壤中的重金属转化为可挥发形式释放到环境中的方法[15]，对于消除土壤中的重金属效果显著，但目前可应用范围仅限于极少数的挥发性重金属如Hg和硒（Se）[14]。植物挥发虽然能够使土壤中重金属的含量暂时降低，但同时又会污染周围的环境，因而采用植物挥发技术必须满足转化产物毒性小于未转化前的条件，以避免对环境造成危害。

1.3 植物固定

植物固定是利用植物根部积累、沉淀、转化重金属，降低污染基质中重金属的流动性，减少其被生物利用；或通过根表皮细胞吸附重金属元素，使其固定于植物体内或体表，进而减轻土壤重金属污染的植物修复技术[14]。该技术适用于轻度重金属污染土壤。用于植物固定的植物应具有较发达的根系，根系分泌物能够沉淀、吸附或还原重金属，并且金属从根到芽的迁移率较低[16-17]。然而，植物固定只能短暂地固定重金属，无法将其从土壤中去除，一旦周围环境改变，就可能使重金属重新活化继而恢复毒性，因此目前植物固定修复技术仍需改进。

2 重金属富集园林植物的筛选

应用植物修复重金属污染土壤的重点在于选择适宜的超富集植物。大部分重金属在植物的生长周期内属于非必需元素，其在植物体内积累达到一定含量时会影响植物细胞的生理活性，导致植物的生理指标降低、生理活动受到抑制[18-19]。实验证明，植物细胞分裂受到重金属含量升高的负面影响[20-21]。重金属毒性会抑制植物细胞中的细胞质酶活性，并由于氧化应激而导致细胞结构受损[22-23]。随着重金属在土壤中含量的升高以及时间的延长，重金属对植物造成的毒害作用也会相应增大[24-26]。所以，植物对重金属的吸收富集能力、对重金属毒害的耐受力这两项能力的强弱是决定其是否可应用于植物修复的重要条件。

重金属富集植物筛选的理论原则主要包括以下几点：（1）理想的重金属富集植物应满足易于获得、生长速度快、根系统发达、生物量较大、具有较强的抗病虫害能力等条件[27]；（2）由于污染重金属种类较多，在选择园林绿化植物时需考虑不同重金属对土壤毒害的协同作用，选择对重金属耐受性较高的植物[28]，特别是具有较强的排毒和隔离能力的植物[29-30]；（3）在选择修复植物时应集中在乡土植物范围，保护当地的生物多样性[31-32]，轻易引进外来植物可能会导致物种入侵，破坏生态系统结构平衡[33]；（4）木本植物比草本植物具有更高的生物量和生长率，在中低浓度的重金属污染土壤中能够正常生长，因此在富集重金属的潜力方面，木本植物比草本植物更有效[34-35]。学者 Ent 等[35]根据干燥叶片中的金属浓度，给出如下超富集植物标准：Cd 100 μg · g^{-1}；钴、Cu、Cr 300 μg · g^{-1}；Pb、Ni 1 000 μg · g^{-1}；Zn 3 000 μg · g^{-1}。

目前，研究已发现大约500种超富集植物，其中菊科、十字花科、石竹科、莎草科、葫芦科、豆科、鸢尾科、唇形科、禾本科、堇菜科、大戟科、紫罗兰科占多数[36-37]。常见 Cd 超富集园林植物有柳树 *Salix babylonica*、东南景天 *Sedum alfredii*、南天竹 *Nandina domestica*、杜鹃 *Rhododendron simsii*、雪松 *Cedrus deodara*、桑树 *Morus alba*、银杏 *Ginkgo biloba*、法国冬青 *Viburnum odoratissimum* var. *awabuki*、芦苇 *Phragmites communis* 等；常见 Pb 超富集园林植物有桂花 *Osmanthus* sp.、红花檵木 *Sedum alfredii*、侧柏 *Nandina domestica*、杜鹃、法国冬青、南天竹、杨梅 *Myrica rubra*、芦苇等；常见 Hg 超富集园林植物有杨梅、黄杨 *Buxus sinica*、冬青 *Ilex chinensis*、牵牛 *Ipomoea nil*、榆树 *Ulmus pumila* 等；常见 Cr 超富集园林植物有美人蕉 *Canna indica*、芦苇、牵牛、绿萝 *Epipremnum aureum*、白花三叶草 *Trifolium repens* 等；常见 As 超富集园林植物有杏树 *Armeniaca vulgaris*、柳树、杨树、芦苇等[8,38]。其中柳树、南天竹、杜鹃、冬青、杨梅、芦苇对多种重金属有较强的富集吸收能力，且在重金属污染土壤中有较强耐受力，生态功能与环境效益良好，因此在重金属污染土壤修复中可优先选择。

近年来，园林植物对土壤中重金属元素吸收和富集特征的相关研究报道屡见不鲜，针对不同重金属元素的植物筛选也取得了一定的进展（表1）。张长锋[39]研究发现矮型四季菊 *Dendranthema morifolium* 对 Cd 的耐受能力和富集能力较强，可作为理想的土壤 Cd 污染修复植物。崔爽等[40]研究发现，美女樱 *Verbena hybrida* 对 Pb 的耐受性较强，可用于固定修复土壤 Pb 污染。侯静等[41]进行水培试验发现，牵牛能够较强地耐受和富集重金属 Hg，加上具有美化环境的优点，可以作为 Hg 污染土壤的修复植物在城市进行大范围推广运用。Cui 等[42]研究鸡冠花 *Celosia cristata* 等3种植物对 Pb 的耐受和积累特征，结果表明鸡冠花是耐受 Pb 的优良树种。董冰冰等[43]研究圆叶牵牛 *Ipomoea purpurea* 和黑麦草 *Lolium perenne* 对 Cr 的积累量和耐受程度，结果表明，二者均能够用作修复 Cr 污染土壤的植物资源。

表 1 我国常见园林植物对土壤中重金属元素吸收和富集特征

Table 1 Characteristics of absorption and enrichment of heavy metals in soil by common landscape plants in China

应用的园林植物 The applied landscape plants	重金属元素 Heavy metal element	重金属含量 Heavy metal content	实验方法 Experimental method	地上部富集系数平均值 Average aboveground enrichment coefficient	地下部富集系数平均值 Average underground enrichment coefficient	转运系数平均值 Average transport coefficient	引用文献 References
山矾	Cd	10~100 mg · kg^{-1}	培养法	2.83	3.99	0.7	[38]
矮型四季菊	Cd	0~80 mg · kg^{-1}	盆栽试验	6.76	5.04	1.39	[39]
美女樱	Pb	1000 mg · kg^{-1}	盆栽试验	0.26	—	0.23	[40]
牵牛	Hg	20 mg · kg^{-1}	盆栽试验	1.47	—	1.13	[41]
硫华菊 *Cosmos sulphureus*	Cd	0~150 mg · kg^{-1}	盆栽试验	2.69	—	0.53	[44]
杨梅	Pb	0~10 mmol · L^{-1}	水培条件	—	—	0.13	[45]
白花三叶草	Cr	0~400 mg · kg^{-1}	盆栽试验	1.22	1.54	0.78	[46]
高羊茅 *Festuca arundinacea*	Cr	0~400 mg · kg^{-1}	盆栽试验	1.16	1.44	0.78	[47]
狗牙根 *Cynodon dactylon*	Cr	2 375.42 mg · kg^{-1}	采样调查	0.33	0.98	0.34	[47]
云南泡花树 *Meliosma yunnanensis*	Cr	28.40 mg · kg^{-1}	采样调查	0.92	—	—	[48]

3 修复重金属污染土壤的园林植物应用效果

应用园林植物修复重金属污染土壤是促进城市生态恢复与美化环境的一种有效途径，我国已利用植物修复技术在矿工业区生态修复、固体废弃物资源利用等方面进行了尝试，目前仍集中在试验阶段。我国广东、广西、贵州、江苏等地学者利用乡土植物开展了相关研究（表 2），其中所用园林植物多集中于禾本科、大戟科、菊科等。

4 不同植物修复技术的联合应用

近年来，将其它治理重金属污染土壤方法与植物修复技术联合应用已成为兴起的新型修复技术，能够极大地弥补单一修复技术的缺陷，是未来植物修复重金属污染土壤领域一个极具前景的发展方向。在实践运用过程中，植物修复主要通过与电压修复、螯合剂诱导、改良剂修复、微生物修复和基因工程等方法联合来对土壤进行修复[58]（表 3），从分子生物学、物理化学等方面分析联合修复的效果，达到治理修复的目标。

4.1 螯合剂 – 植物修复

螯合剂与土壤中的重金属相结合，可提高土壤中重金属的含量，从而使植物吸收重金属的能力更加强化[59]。Komárek 等[60]研究发现，施加乙二胺四乙酸能够显著提高有效态重金属在土壤中的含量，加强了杂交杨树对重金属的吸收；Liphadzi 等[61]研究发现向土壤中加入乙二胺四乙酸后向日葵 *Helianthus annuus* 地上部的 Pb 含量明显增加，提取重金属量比不添加螯合剂高约 4 倍。

4.2 基因工程 – 植物修复

使用基因重组技术向植物体内导入具有积累金属特性的外源基因，再移入田间试验进行确认[62]。赵汝等[63]研究转基因高羊茅对 Pb 的耐受性与吸收能力发现，DREB1A 基因并未改变高羊茅对 Pb 的转运机制，但增强了高羊茅对 Pb 的耐受性及富集能力；Tang 等[64]发现矮松 *Pinus virginiana* 导入 CaPF1 基因后，对金属 Cd、Cu、Zn 的抗性也有所提高。

4.3 微生物 – 植物修复

利用一些微生物对重金属的沉淀、吸收、还原和氧化等作用，把重金属污染物转化为毒性较低的物质，来减少土壤中重金属的毒害作用[65]。Wang 等[66]将美洲黑杨 *Populus deltoides* 接种根瘤菌后，其吸收富集 As 的浓度提高了 1~3 倍；Polti

表2 应用于修复重金属污染土壤的园林植物及其修复效果

Table 2 Landscape plants applied to remediation of soil contaminated by heavy metals and their remediation effects

研究地点 Sites	应用的园林植物 The applied landscape plants	污染重金属 Contaminated heavy metal	实验方法 Experimental method	修复效果 Remediation effect	参考文献 References
	天堂草 *Cynodon dactylon*、美人蕉	Zn、Cd、Ni	盆栽试验	50%污泥处理中的美人蕉及25%污泥处理中的天堂草对Zn、Ni和Cd的去除效果良好	[49]
广东	鸭脚木 *Schefflera octophylla*、小叶黄杨 *Buxus sinica* var. *parvifolia*、金叶假连翘 *Duranta erecta* 'Golden Leaves'、金光变叶木 *Codiaeum variegatum* 'Chrysophyllum' 等植物	Cd、Cr、Zn	采样调查	金叶假连翘、金边岑叶槭可修复Cd；细叶鸡爪槭、金光变叶木可修复Cr；鸭脚木、小叶黄杨可修复Zn	[50]
陕西	广玉兰 *Magnolia Grandiflora*、海桐 *Pittosporum tobira*、夹竹桃 *Nerium oleander*	Zn、Pb、Cu、Ni、Cd	采样调查	海桐对Pb、Ni的吸收富集能力较高；夹竹桃对Zn、Ni的吸收富集能力较高；广玉兰对Cu、Cd、Pb的吸收富集能力较高。	[51]
贵州	绿萝、吊兰 *Chlorophytum comosum*、吊竹梅 *Zebrina pendula*	Cu、Zn、Cd	盆栽试验	绿萝对Cu和Zn的修复效率较高，吊兰对Cd的修复效率较高，吊竹梅对Zn的修复效率较高	[52]
江苏	吊兰	Zn、Pb	盆栽试验	吊兰对Zn的富集效果较好，对Pb的转运效果较好	[53]
天津	孔雀草 *Tagetes patula*	Cd-多氯联苯	盆栽试验	孔雀草对Cd的富集系数与转移系数均可达到超积累植物的标准	[54]
广西	地瓜榕 *Ficus tikoua*	Pb	土培法	地瓜榕具有修复高浓度Pb污染土壤的潜力	[55]
	宛田红花油茶 *Camellia polyodonta*、棕竹 *Rhapis excelsa*、博白大果油茶 *Camellia gigantocarpa*	Cd	土培法	3种植物对Cd污染土壤的修复能力相对较弱	[56]
	棕竹、宛田红花油茶	Mn	土培法	棕竹对Mn的耐性较强；宛田红花油茶可用于净化污染较轻地区	[57]

等[67]将链霉菌接种于玉米 *Zea mays* 幼苗上种植在200 mg · kg^{-1}的Cr（Ⅵ）污染土壤中，玉米的生物量增加了57%，土壤中的生物可利用Cr含量下降了96%。

4.4 电压－植物修复

电极周围的土壤溶液通过电压条件可发生电化学反应，导致土壤的理化性质改变，增加土壤中重金属的含量，从而增强植物对重金属的积累和吸收[68]。徐海舟[69]研究东南景天联合直流电场修复Cd污染土壤发现，直流电场作用下可促进东南景天生长，且植株地上部分对Cd的吸收富集量有明显提高。

4.5 化学改良剂－植物修复

在土壤中加入磷酸盐、石灰、硅酸盐等土壤改良剂可以调节土壤理化性质及营养。陈永华等[70]研究改良剂对夹竹桃、栾树 *Koelreuteria paniculata*、泡桐 *Paulownia fortunei* 和苎麻 *Boehmeria nivea* 的影响，结果表明土壤中的重金属含量显著低于未添加改良剂处理的重金属含量，植物对Pb和Zn的转运与富集能力也有一定的提高。

5 超富集植物安全处置与有效利用

超富集植物收获后，若未进行妥善安全的处置，其体内富含的重金属成分可能重新返回到环境，造成二次污染。近年来，众多学者们[71]研究出了一系列技术来处置修复后的植物生物质，不同技术存在各自的优点与不足。焚烧法、高温分解法、灰化法的减量化达90%以上，液相萃取法和植物冶金法环境风险低，金属可回收，但其减量化较低（表4）。

6 展望

当前植物修复技术在迅速发展，具有广大的应用前景。从植物资源方面，我国植物种类丰富，为我国进行筛选超富集植物与应用奠定了坚实的基础。对比传统的工程、化学、物理修复等技术，

表 3 联合应用多种修复技术修复重金属污染土壤

Table 3 Combined application of multiple remediation technologies to remediate heavy metal contaminated soil

应用的园林植物 Applied landscape plants	污染重金属 Contaminated heavy metal	实验方法 Experimental method	联合应用 Combined application of technology	参考文献 References
杂交杨树	Pb	盆栽试验	螯合剂乙二胺四乙酸	[60]
向日葵	Pb	大田实验	螯合剂乙二胺四乙酸	[61]
高羊茅	Pb	水培试验	DREB1A 基因	[63]
矮松	Cd、Cu、Zn	培养皿试验	Ca PF1 基因	[64]
美洲黑杨	As	盆栽试验	微生物菌体	[66]
玉米	Cr	盆栽试验	链霉菌	[67]
东南景天	Cd	盆栽试验	直流电场	[69]
夹竹桃、栾树、泡桐、苎麻	Pb、Zn	盆栽试验	改良剂	[70]

表 4 超富集植物安全处置方法及其优缺点

Table 4 Safe disposal methods of superenriched plants and their advantages and disadvantages

处置方法 Disposal methods	优点 Advantages	缺点 Disadvantages	参考文献 References
焚烧法	减量化在 90 % 以上，便于运输和储存，热能发电，炉渣中镉、铜、铅等金属可回收，底灰可农用。	耗能大，排放危险废气，灰分固化过程中需要投加化学药剂，设备及运行维护费用高。	[72]
高温分解法	减量化在 90 % 以上，密闭条件进行可减少有害气体排放，裂解气和生物油可作燃料，焦炭渣可熔炼含铅、锌等植物以回收重金属，底灰可农用。	植物含水率不能超过 30 %，焦炭渣中含有固化的硫和重金属等，具有潜在风险；设备安装、调试及日常运行维护费用昂贵。	[73]
堆肥法	环境风险低，减量化大于 25%，堆肥可农用。	处理周期长达 2-3 个月，堆肥产物需后续处理，大规模推广应用的费用较高。	[74]
灰化法	减量化大于 90%，飞灰颗粒小、比表面大、且具有多孔性，可应用于对污水处理，金属可回收。	技术不成熟，无工业化应用。	[75]
压缩填埋法	减量化大于 50%，金属可回收。	技术不成熟，没有关于渗滤液中重金属回收及压缩产物处理的报道。	[76]
液相萃取法	环境风险低，金属可回收。	减量化较低，技术不成熟，无工业化应用。	[77]
植物冶金法	环境风险低，金属可回收。	减量化较低，周期较长且受季节和气候等因素影响显著，工艺流程复杂。	[78]

植物修复优势明显：操作简单便捷、投资和维护成本较低、无二次污染且后期易于处理，可恢复土地使用功能，改善城市生态环境。从可持续发展层面，植物修复更符合环境保护的标准，占用资源少，能够促进物质循环，有益于形成良好的生态系统。利用园林植物治理修复土壤重金属污染是一条经济、绿色、可持续的生态修复途径。

虽然利用园林植物修复重金属污染土壤具有诸多优点及显著的环境、经济、社会效益，但在实际应用中仍存在一定的局限性：（1）植株生物量低：许多超富集植物生物量较低，植株体量矮小，生长速度较慢，极大地影响了修复效率，机械化作业条件难以实现；（2）引种困难：超富集植物大多来自野外，且具有较强的区域分布性，对水分、气候、盐度、土壤肥力、酸碱度等生长条件有一定的标准，使引种栽培受到限制；（3）专一性强：单种超富集植物通常具有特定吸收富集的一到两种重金属元素，对其它重金属则反映为中毒症状，因此使植物修复技术在治理多种重金属交叉污染土壤方面的应用受到限制；（4）循环污染：由于器官腐败、落叶以及死亡后未及时回收处理等原因，富集在植物体内的重金属可能重新返回到环境中，造成二次污染。

近年来，超富集植物的筛选与应用、多种修

复技术的联合应用、分子生物学手段的应用等成为植物修复的重要发展方向。有学者在全国范围内甚至国外调查统计超富集植物资源，了解超富集植物的分布区域并创建相应的数据库，对发现的超富集植物进行培育筛选[71]。超富集植物的筛选可以与分子生物学手段结合，利用转基因技术，把相关超积累调控基因和耐受基因转入至生长速度快、生物量较大的污染地区乡土植物体内，通过强化和筛选，最终得到转基因超富集植物。微生物因其降解重金属的能力也可被用于植物修复[72]，可降解重金属微生物的基因重组技术包括使用新载体将基因片段引入植物宿主、开发调节基因表达的新方式、使用靶向诱变和随机诱变来增加生物降解酶的活性[73-74]。

超富集园林植物应能够一定程度上耐受所修复的重金属，才能够在被污染的土壤上正常生长。不同植物可耐受的重金属有差异，在单一重金属污染情况下和多种重金属交叉污染情况下，其对于重金属的富集量也有较大差异。目前超富集园林植物对多种重金属耐性机制相关方面的研究较为欠缺，而且局限在单一生态环境范畴内，难以进行宏观判断。若能研究出减少甚至无二次污染且具有一定经济效益的重金属回收利用技术，将成为植物修复技术极具前景的发展方向。土壤淋洗、电化学和植物提取等方法各有其优劣势及适用范围，若能根据实际污染情况选择适合方法，在修复土壤重金属污染实践中进行综合应用，效果可能事半功倍。植物修复技术虽然存在一定的局限性，但其在生态修复上应用前景广阔，需要科研工作者的进一步研究，完善并加强各类园林植物修复重金属污染土壤的实践环节，创立实践基地，进行植物修复重金属污染土壤的示范，对超富集植物的作用和机理进行持续研究。

参考文献

[1] 刘彩红, 胡喻华, 张春霞, 等. 广东沿海红树林生态修复模式研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(4): 102-106.

[2] 环境保护部和国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J].油气田环境保护, 2014, 24(3): 66.

[3] FLORA G J S. Arsenic toxicity and possible treatment strategies: Some recent advancement[J]. Current Trends in Biotechnology and Pharmacy, 2012, 6(3): 280-289.

[4] 谭琳, 肖丽娜, 江瑶, 等. 森林土壤重金属空间分布特征及污染评价: 以华南沿海地区为例[J].林业与环境科学, 2021, 37(1): 116-121.

[5] Dadzie E. Assessment of heavy metal contamination of the Densu River, Weija From Leachate[D]. Kumasi: Kwame Nkrumah University of Science and Technology, 2012.

[6] TSCHIRHART C, HANDSCHUMACHER P, LAFFLY D, et al. Resource management, networks and spatial contrasts in human mercury contamination along the Rio Beni (Bolivian Amazon)[J]. Human Ecology, 2012, 40(4): 511-523.

[7] LAKHERWAL D. Adsorption of heavy metals: A review[J]. Environmental Research and Development, 2014, 4(1): 41-48.

[8] 曹瑞祺, 方松林, 曹盼宫. 重金属污染土壤园林植物修复研究进展[J]. 北方园艺, 2019(16): 145-152.

[9] 冯志坚, 陈锡沐, 翁殊斐. 园林植物学: 南方版[M]. 重庆: 重庆大学出版社: 2013.

[10] ANDERSON T A, GUTHIE E A, WALTON B T. Bioremediation in the rhizosphere[J]. Environmental Science and Technology, 1993, 27(13): 2630-2636.

[11] 白向玉. 剩余污泥中重金属污染的蚯蚓活化: 花卉植物修复机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2010.

[12] 陈凌. 土壤镉污染的植物修复技术[J]. 无机盐工, 2009, 41(2): 4547.

[13] JUTSZ A M, GNIDA A. Mechanisms of stress avoidance and tolerance by plants used in phytoremediation of heavy metals[J]. Archives of Environmental Protection, 2015, 41(4): 96-103.

[14] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J].土壤通报, 2004, 35(3): 366-370.

[15] TAK H I, AHMAD F, BABALOLA O O. Advances in the application of plant growth-promoting rhizobacteria in phytoremediation of heavy metals[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, 223: 33-52.

[16] OJUEDERIE O B, BABALOLA O O. Microbial and plant-assisted bioremediation of heavy metal polluted environments: a review[J]. International Journal of Environmental Rresearch and Public Health, 2017, 14(12): 1504.

[17] ISLAM M S, UENO Y, SIKDER M T, et al. Phytofiltration of arsenic and cadmium from the water wnvironment using *Micranthemum umbrosum* (J. F. Gmel) S. F. Blake as a hyperaccumulator[J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(10): 1010-1021.

[18] 鲁如坤, 熊礼明, 时正元. 关于土壤-作物生态系统中镉

的研究[J]. 土壤, 1992, 24(3): 129-132.
[19] 沙尔比亚·阿合尼亚孜. 重金属对植物影响及其解决措施[J].现代农业科学, 2009, 16(5): 182-183.
[20] POURRUT B, SHAHID M, DUMAT C, et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants[J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2011, 213: 113-136.
[21] JADIA C D, FULEKAR M H. Phytoremediation of heavy metals: recent techniques[J]. African Journal of Biotechnology, 2009, 8(6): 921-928.
[22] CHIBUIKE G U, OBIORA S C. Heavy metal polluted soils: effect on plants and bioremediation methods[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2014, 1: 1-12.
[23] GAUR N, FLORA G, YADAV M, et al. A review with recent advancements on bioremediation-based abolition of heavy metals[J]. Environmental Science: Processes and Impacts, 2014, 16(2): 180-193.
[24] 陈怀满. 土壤—植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-14.
[25] 赵文静, 郭伟, 赵仁鑫, 等. 稀土元素对土壤-植物系统中重金属行为的影响及其机理研究进展[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 508-512.
[26] JABEEN R, AHMAD A, IQBAL M. Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms[J]. The Botanical Review, 2009, 75(4): 339-364.
[27] 王梦军, 韩张雄, 董抒浩, 等. 园林植物中重金属元素检测及其对重金属污染土壤修复综述[J]. 山东林业科技, 2018, 48(5): 122-124.
[28] Muszyńska E, Hanus-Fajerska E. Why are heavy metal hyperaccumulating plants so amazing?[J]. Biotechnology, Computational Biology and Bionanotechnology, 2015, 96(4): 265-271.
[29] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: how and why do they do it? and what makes them so interesting?[J]. Plant Science, 2011, 180(2): 169-181.
[30] Leguizamo M A O, Gómez W D F, Sarmiento M C G. Native herbaceous plant species with potential use in phytoremediation of heavy metals, spotlight on wetlands—a review[J]. Chemosphere, 2017, 168: 1230-1247.
[31] Montes C, Rendón M, Varela L, et al. Manual de restauración de humedales mediterráneos[M]. Sevilla: Consejería de Medio Ambiente, 2007.
[32] PIMENTEL D, MCNAIR S, JANECKA J, et al. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions[J]. Agriculture Ecosystems and Environment, 2001, 84(1): 1-20.
[33] CHU S, JACOBS D F, LIAO D, et al. Effects of landscape plant species and concentration of sewage sludge compost on plant growth, nutrient uptake, and heavy metal removal[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(35): 35184-35199.
[34] SHUKLA O P, JUWARKAR A A, SINGH S K, et al. Growth responses and metal accumulation capabilities of woody plants during the phytoremediation of tannery sludge[J]. Waste Management, 2011, 31(1): 115-123.
[35] ENT A V, BAKER A J M, REEVES R D, et al. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction[J]. Plant and Soil, 2013, 362(1-2): 319-334.
[36] BAKER A J M, BROOKS R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallicelements. a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. Biorecovery, 1989, 1: 81-126.
[37] PRASAD M N V. Phytoremediation of metal-polluted ecosystems: hype for commercialization [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2003, 50(5): 686-701.
[38] 顾翠花, 王懿祥, 白尚斌, 等. 四种园林植物对土壤镉污染的耐受性[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2536-2544.
[39] 张长锋. 4种花卉对镉的生理响应及富集特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
[40] 崔爽, 肖明月, 刘艺芸, 等. 3种花卉对铅的吸收富集能力研究[J]. 草原与草坪, 2014, 34(3): 82-84.
[41] 侯静, 姜华, 关晓欢, 等. 汞抗性花卉的筛选与牵牛对汞胁迫的响应[J]. 大连交通大学学报, 2012, 33(1): 83-88+93.
[42] CUI S, ZHANG T, ZHAO S, et al. Evaluation of three ornamental plants for phytoremediation of Pb-contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(4): 299-306.
[43] 董冰冰, 陈友媛, 惠红霞, 等. 黑麦草和牵牛花对铬耐受能力和积累效果的指标表征研究[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 4044-4053.
[44] 林立金, 马倩倩, 石军, 等. 花卉植物硫华菊的镉积累特性研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 141-146.
[45] 何新华, 陈力耕, 何冰, 等. 铅对杨梅幼苗生长的影响[J]. 果树学报, 2004, 21(1): 29-32.
[46] 王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 等. 铬胁迫对3种草本植物生长及铬积累的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(6): 2028-2037.
[47] 郑施雯, 魏远, 顾红波, 等. 铬污染地区植物重金属含量特征与耐性植物筛选研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2): 205-211.
[48] 毕波, 刘云彩, 陈强, 等. 10个常绿树种对砷汞铅镉铬的富积能力研究[J]. 西部林业科学, 2012, 41(4): 79-83.
[49] 陈秋丽, 张朝升, 李淑更, 等. 园林植物修复污泥施肥土壤重金属污染的应用研究[J]. 仲恺农业工程学院学报, 2009, 22(3): 5-10.

[50] 周霞, 林庆昶, 李拥军, 等. 花卉植物对重金属污染土壤修复能力的研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(14): 8133-8135.
[51] 方松林.不同园林植物对土壤重金属的吸收及修复效应[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(14): 210-214; 222.
[52] 杨丹, 刘燕, 刘勇. 4种园林植物修复河道疏浚底泥中重金属污染的试验研究[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(4): 224-227.
[53] 白向玉, 刘汉湖, 韩宝平, 等. 花卉植物修复剩余污泥中重金属的实验研究[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 39-44; 105.
[54] 苗欣宇, 李潇. 孔雀草修复重金属-多氯联苯复合污染土壤的实验研究[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 361-368.
[55] 赵健, 仇硕, 李秀娟, 等. 三种园林植物对土壤中重金属Pb的吸收及修复研究[J]. 北方园艺, 2010(23): 79-82.
[56] 张翠萍, 仇硕, 赵健, 等. 3种园林植物对土壤重金属Cd的吸收及修复研究[J]. 广西农业科学, 2010, 41(10): 1101-1103.
[57] 李秀娟, 仇硕, 赵健, 等. 4种园林植物对土壤重金属Mn的吸收及修复研究[J]. 广西农业科学, 2010, 41(9): 951-954.
[58] 杨芸. 重金属胁迫下园林植物耐性及其联合稳定修复研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2019.
[59] 王晓娟, 王文斌, 杨龙, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内的转运途径及其调控机制[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7921-7929.
[60] Komárek M, Tlustos P, Száková J, et al. The use of maize and poplar in chelant-enhanced phytoextraction of lead from contaminated agricultural soils[J]. Chemosphere, 2007, 67(4): 640-651.
[61] LIPHADZI M S, KIRKHAM M B, MANKIN K R, et al. EDTA-assisted heavy-metal uptake by poplar and sunflower grown at a long-term sewage-sludge farm[J]. Plant and Soil, 2003, 257(1): 171-182.
[62] NEDELKOSKA T V, DORAN P M. Characteristics of heavy metal uptake by plant species with potential for phytoremediation and phytomining[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(5): 549-561.
[63] 赵汝, 韩烈保, 曾会明. 铅胁迫下转DREB1A高羊茅对铅的吸收与耐受性研究[J].中国草地学报, 2010, 32(2): 54-60.
[64] TANG W, CHARLES T M, NEWTON R J. Overexpression of the pepper transcription factor CaPF1 in transgenic *Virginia pine* (*Pinus virginiana* Mill.) confers multiple stress tolerance and enhances organ growth[J]. Plant Molecular Biology, 2005, 59(4): 603-617.
[65] 马旭红, 吴云海, 杨凤. 土壤重金属污染的探讨[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(5): 52-54.
[66] WANG Q, XIONG D, ZHAO P, et al. Effect of applying an arsenic-resistant and plant growth-promoting rhizobacterium to enhance soil arsenic phytoremediation by *Populus deltoides* LH05[J]. Journal of Applied Microbiology, 2011, 111(5): 1065-1074.
[67] Polti M A, Atjián M C, Amoroso M J, et al. Soil chromium bioremediation: synergic activity of actinobacteria and plants[J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2011, 65(8): 1175-1181.
[68] 袁敏, 铁柏清, 唐美珍. 土壤重金属污染的植物修复及其组合技术的应用[J]. 中南林业科技大学学报, 2005, 25(1): 81-85.
[69] 徐海舟. 直流电场—东南景天联合修复Cd污染土壤效率的研究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2015.
[70] 陈永华, 张富运, 吴晓芙, 等. 改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(10): 3852-3859.
[71] 惠琳. 土壤重金属污染及植物修复技术[J]. 黑龙江水专学报, 2006, 33(1): 102-104.
[72] Wasilkowski D, Swę DZIOŁ Ż, Mrozik A. Przydatność genetycznie modyfikowanych mikroorganizmów do bioremediacji zanieczyszczonych środowisk[J]. Chemik, 2012, 66(8): 817-826.
[73] WOLEJKO E, WYDRO U, LOBODA T. The ways to increase efficiency of soil bioremediation[J]. Ecological Chemistry Engineering, 2016, 23(1): 155.
[74] ZAIDI A, WANI P A, KHAN M S. Bioremediation: A natural method for the management of polluted environment[C]//ZAIDI A, WANI P A, KHAN M S. Toxicity of Heavy Metals to Legumes and Bioremediation, India, 2012: 101-114.
[75] 唐莲, 刘振中, 蒋任飞. 重金属污染土壤植物修复法[J]. 环境保护科学, 2003, 29(6): 33-36.
[76] GHOSH M, SINGH SP. A review on phytoremediation of heavy metals and utilization of its by-products[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2005, 3: 1-18.
[77] SAS-NOWOSIELSKA A, KUCHARSKI R, MAŁKOWSKI E, et al. Phytoextraction crop disposal—an unsolved problem[J]. Environmental Pollution, 2003, 128(3): 373-379.
[78] ANDERSON CWN, BROOKS RR, CHIARUCCI A, et al. Phytomining for nickel, thallium and gold[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 67(1): 407-415.

林业与环境科学
FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
（双月刊，1985 年创刊）
第 37 卷 第 3 期 2021 年 6 月 20 日
主管单位　广东省林业局
主办单位　广东省林学会
　　广东省林业科学研究院
协办单位　广东省林业调查规划院
　　广东省岭南综合勘察设计院
　　广东省林业科技推广总站
　　广东生态工程职业学院
　　广州碳汇林业有限公司
　　广东省湿地保护协会
编辑出版　林业与环境科学编辑部
　　地址：广州市天河区广汕一路 233 号
　　邮编：510520
　　电话：020-87028081
　　邮箱：gdly@sinogaf.cn
　　http://www.gdforestscience.com
印　　刷　广州永祥印务有限公司
发行订购　林业与环境科学编辑部
发行范围　公开发行
广告发布登记通知书　440000100120

FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
（Bimonthly，Started in 1985）
Vol.37 No.3 Jun. 20，2021
Administered by Forestry Department of Guangdong Province
Sponsored by Forestry Society of Guangdong Province
　　Guangdong Academy of Forestry
Edited &Published by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
　Add: No.233 Guangshan 1st Rd.，Tianhe District，
　　Guangzhou510520，China
　Tel: 020-87028081
　E-mail: gdly@sinogaf.cn
　http://www.gdforestscience.com
Printed by Guangzhou Yongxiang Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
Distributed Limits: Openly Published and Distributed

国内定价：20.00 元 / 册，120.00 元 / 年
ISSN 2096-2053

ISSN 2096－2053
CN　44－1723/S

2.9.基于无人机航拍的校园植物景观美景度评价——以华南农业大学为例

亚热带植物科学　　目　录　　2019 年 第 48 卷 第 3 期
（总第 144 期）

★植物生理生化★

★植物生态与资源分类★

★植物栽培与组培★

★资讯★

期刊基本参数：CN 35-1243/S*1972*q*16*102*zh*P*￥15.00*1000*19*2019-09

封面图片：非洲马铃果 *Voacanga africana* 中吲哚类生物碱老刺木胺处理的人肝癌细胞(BEL7402、SMMC7721)、正常肝细胞(Changliver)、卵巢癌细胞(SKOV3)四株细胞株呈现细胞凋亡形态。详见正文第 209～214 页。

亚热带植物科学 2019,48(3): 285～290.
Subtropical Plant Science

基于无人机航拍的校园植物景观美景度评价
——以华南农业大学为例

冼丽铧，吴楠烨，陈红跃，梁婉莹，黄子航，甘洪旭

(华南农业大学林学与风景园林学院，广东 广州 510642)

摘　要：基于无人机航拍摄影技术，结合植物现状调查和问卷调查，应用美景度评判法对华南农业大学八类植物景观进行评价。结果表明，基于无人机的航拍影像，华南农业大学植物群落复层结构清晰可见，空间布局层次丰富，植物景观质量整体水平良好；植物色彩丰富度和植物多样性与美景度值有显著相关性，是影响校园植物景观美景度值的有效影响因子。

关键词：无人机航拍图像；校园植物景观；美景度评判法；华南农业大学

Doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2019.03.014
中图分类号：TU984.14　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-7791(2019)03-0285-06

Evaluation of Campus Plant Landscape by UAV Aerial Photography
——Taking South China Agricultural University as an Example

XIAN Li-hua, WU Nan-ye, CHEN Hong-yue, LIANG Wan-ying, HUANG Zi-hang, GAN Hong-xu

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong China)

Abstract: Based on unmanned aerial vehicle (UAV) aerial photography, plant application status investigation and questionnaire survey, eight kinds of plant landscape types of South China Agricultural University were evaluated using beauty degree evaluation method. Results showed that plant community stratified structure in South China Agricultural University was clearly visible, space layout was abundant, overall level of plant landscape was good. Plant color richness and plant diversity were significantly correlated with plant landscape, which were effective factors affecting the landscaping value of campus plants. The research results provided a reference for the evaluation and construction of plant landscape.

Key words: UAV aerial images; campus plant landscape; scenic beauty estimation; South China Agricultural University

园林植物是校园环境的重要组成部分，不仅能调节校园小气候环境[1]，而且能美化校园环境。良好的校园植物景观有助于宣传展示学校风貌，体现校园文化内涵[2]，对于建设特色校园有着重要意义。植物景观是指植被、植物群落、植物个体所表现的形象通过人们的观感传到大脑皮层，产生一种实在美的感受和联想[3]。校园植物景观的特色是在自然环境基础上融合各地区的文化习俗而形成的，一个校园的植物应用、色彩的搭配、氛围的营造和配置模式，可在一定程度上反映高校的办学性质及所处地域的文化特色[4]。校园植物景观潜移默化地影响着在校园环境中学习、生活的师生们。

当前，国内外较多学者从照片、动画媒介[5]、色彩、历史、人文的视角，对校园植物多样性、植物结构和配置[6]、植物意境[1]等方面出发，应用美景度评价法或层次分析法等量化方法对植物景观进行研究。然而，随着数字化信息新时代的到来，航空拍摄技术改变了人们的观赏视角，空中观测和空中

收稿日期：2019-03-12　　**修回日期**：2019-04-01
基金项目：华南农业大学大学生创新创业训练计划项目(201710564036)
作者简介：冼丽铧，硕士，实验师，从事园林植物应用与城市绿化研究。E-mail: xianlihua@scau.edu.cn
注：陈红跃为通信作者。E-mail: chenyue@scau.edu.cn

拍摄成为一种广泛采用的景观资源评价技术。从俯视观察的角度获取照片，易于全局性观测，使得人们对景观对象的四维空间进行整体评价[7]。本文基于无人机航拍摄影技术，对华南农业大学校园植物景观进行航拍，对校园植物应用现状进行调查以及问卷调查，最后应用美景度评判方法评价校园植物景观，为园林植物景观评价技术及营造提供参考。

1 研究对象与方法

1.1 研究对象

华南农业大学坐落于广东省广州市(地理坐标 23.16°N，113.34°E)，校园植物景观具有鲜明的热带、亚热带特色，是全国最美大学之一。其中天河区五山路校部土地总面积 293.8 hm^2，初步建成“五湖四海一片林的紫荆校园”的环境，自然景色与人文景观交相辉映。学校的植物主要配置以宫粉羊蹄甲 *Bauhinia variegata*、黄花风铃木 *Handroanthus chrysanthus*、茶花 *Camellia japonica*、光叶子花 *Bougainvillea glabra* 为特色的开花树种，与“花城”广州呼应，并逐渐成为广州的一张特色名片。本次植物景观评价以华南农业大学的八类植物景观为对象，分别是行道树景观、水体景观、建筑景观、亭子景观、出入口景观、广场景观、石景以及停车场景观。

1.2 方法

1.2.1 **美景度评价法** 美景度评价法(Scenic Beauty Estimation Method，SBE 法)，具有简单、可靠、易操作、便于推广的特点[8]。该方法已广泛应用于森林自然景观、景观生态林、植物景观、旅游区景观、观光茶园等方面的美学评价[9]。SBE 法是让评判者根据植物景观评价标准，包括色彩、线条、形态、质感、构图、季相变化、景观地带性特色、植物生长势和物种多样性等 10 个方面进行评价[10]。该方法以公众为依据，而不是依靠少数专家评判，因此更能客观反映景观的实际美学价值；美景度值是通过对各个样本的评分进行标准化处理，其他因素对其影响甚微[11]。

1.2.2 **评价照片选取** 本次评价的照片拍摄于 2016 年 10 月至 2018 年 4 月，历经春夏秋冬；拍摄工具为大疆 PHANTOM 3 Professional 无人机以及大疆悟 Inspire Pro 无人机，像素 1600 万。选择晴朗的白天进行拍摄，共获得 274 张照片，选取 36 张作为本次美景度评价的景观单元照片，其中春景 20 张，夏景 6 张，秋、冬景各 5 张。对 36 张照片进行编号，编号 1、2 分别为新正门、南门出入口景观，编号 3～8 依次为行政楼前、紫荆路、西园、鄱阳路、洪泽湖、第四教学楼行道植物景观，编号 9～12 依次为行政楼、茶山、竹林草海、第五教学楼广场植物景观，编号 13～17 依次为行政楼、香园、图书馆、第四教学楼、第六教学楼的建筑植物景观，编号 18～21 依次为林风亭、华瑞亭、儒亭、静思亭的植物景观，编号 22～26 依次为西湖、鄱阳湖、昭阳湖、院士广场、湿地公园的滨水植物景观，编号 27～31 依次为儒园、“华南农学院”、行政楼北门、鄱阳湖、林学与风景园林学院的石头植物景观，编号 32～36 依次为行政楼西、行政楼东、第六教学楼、新学生活动中心、图书馆后停车场植物景观。

1.2.3 **评判人员选择** 根据前人 SBE 法的研究，专业与非专业背景受测群体对测评目标的评分具有高度一致性，其中景观专业群体的辨别能力和一致性更好[12−13]。本研究有 207 名评判者参与，其中 33.82%为女性，66.18%为男性；大学生占 82%，其他人员占 18%。

1.2.4 **评判过程** 本次问卷的 36 张照片中，亭子景观和出入口景观各 3 张，其余植物景观类型各 5 张，每张图片根据景观要素分解评分表进行评分(表 1)。景观要素包括植物色彩丰富度、植物与硬质景观协调性、植物多样性、植物景观空间层次丰富度以及对景观的喜爱程度。评判完成收回 207 份问卷，全部有效。

1.2.5 **数据处理** 由于个体审美评价标准不一，为避免对评价结果造成影响，因此需要对评价值进行标准化处理。处理公式如下：$Z_{ij} = (R_{ij}-R_j) / S_j$。其中，$Z_{ij}$ 为第 j 评判者对第 i 个景观的评判标准化值；R_{ij} 为第 j 评判者对第 i 个景观的评判值；R_j 为第 j 评判者所有评判值的平均值；S_j 为第 j 评判者的评判值标准差。$Z_i = \sum Z_{ij} / N_i$。其中，Z_i 为第 i 个景观的标准化得分值均值，为 SBE 值；N_i 为第 i 个景观评判人员的数量。

表 1　景观要素分解评分表

Table 1　Landscape elements decomposition

指标	项目	分类指标描述及评分	指标	项目	分类指标描述及评分
植物色彩丰富度 X1	X11	色彩无(1 分)	植物景观空间层次丰富度 X4	X41	无空间营造(1 分)
	X12	色彩单调，分布不均，稀疏(2 分)		X42	空间单一且与植物完全隔离(2 分)
	X13	色彩单调，分布均匀，浓厚(3 分)		X43	空间层次单一，造型古板，结合少许植物(3 分)
	X14	色彩丰富，多种色彩结合生硬(4 分)		X44	空间狭窄，有层次设计但与植物结合生硬(4 分)
	X15	色彩丰富，多种色彩互相完美结合(5 分)		X45	空间宽敞，安排合理，层次丰富，与植物有机结合(5 分)
植物与硬质景观协调性 X2	X21	硬质景观代入生硬，突兀，影响了植物美观(1 分)	对植物景观的喜爱度 X5	X51	不喜欢(1 分)
	X22	硬质景观比例太大，难以突出植物景观(2 分)		X52	有点不喜欢(2 分)
	X23	无硬质景观(3 分)		X53	既不喜欢也不讨厌(3 分)
	X24	与硬质景观勉强结合，没有特色(4 分)		X54	一般喜欢(4 分)
	X25	与硬质景观有机结合，具有特色(5 分)		X55	很喜欢(5 分)
植物多样性 X3	X31	植物配置不协调，林下荒草丛生，地表裸露(1 分)			
	X32	种类丰富，但种植间距小，拥挤不协调(2 分)			
	X33	单一树种群值，群体效果明显，整体协调统一(3 分)			
	X34	种类丰富，竖向层次分明，林冠线起伏不明显(4 分)			
	X35	种类丰富，竖向层次分明，林冠线起伏明显(5 分)			

1.2.6 **多元线性回归模型的建立**　利用 SPSS 19.0 进行线性回归分析，逐步建立模型，模型以受测样本的 SBE 值作为自变量，以受测样本的五个景观要素的量值作为因变量，统计分析对象景观的美景度与各景观要素的关系，通过检验确定有效的影响因子。

2　结果与分析

2.1 各植物景观单元美景度值

表 2 为华南农业大学校园各植物景观单元美景度值。从表 2 可以看出，36 个景观单元中有 19 个(52.78%)的 SBE 值为非负数，有 17 个(47.22%)样本的 SBE 值为负数。其中，SBE 最大值为 9 号单元(图 1: A)，为 0.70811；其次是 3 号(图 1: B)，其 SBE 值为 0.57772；再次是 14 号(图 1: C)，其 SBE 值为 0.48830；36 号的 SBE 值最小，为−0.56904(图 1: D)。

广场景观中美景度值最高的是行政楼广场景观，也是所有参评植物景观中美景度值最高的(图 1: A)。缤纷的植物颜色是受喜欢的关键，黄花风铃木、宫粉羊蹄甲和黄葛榕 *Ficus virens* 是主要树种。从整体布局来看，行政楼的红砖绿瓦、片植的宫粉羊蹄甲、列植的处于盛花期的黄花风铃木与初春萌叶期草绿色叶的黄葛榕相得益彰。花海之外整齐划一的大王椰子 *Roystonea regia* 和银海枣 *Phoenix sylvestris* 是很好的背景树，整体呈现一派欣欣向荣的景象。中间宽阔的升旗阶梯广场是师生们喜爱的活动区域，广场和植物与周边建筑相融合，人与自然和谐统一。

表 2　华南农业大学校园各植物景观单元美景度值

Table 2　Each plant landscape unit scenic beauty numerical in South China Agricultural University

美景度排名	景观单元编号	SBE 值	美景度排名	景观单元编号	SBE 值
1	9	0.70811	19	27	0.00844
2	3	0.57772	20	7	−0.02643
3	14	0.48830	21	30	−0.03256
4	13	0.48431	22	10	−0.04310
5	19	0.37526	23	33	−0.09850
6	5	0.36940	24	28	−0.09894
7	22	0.29577	25	1	−0.10255
8	25	0.28833	26	29	−0.16302
9	4	0.28584	27	26	−0.22679
10	20	0.27442	28	34	−0.25281
11	24	0.26460	29	35	−0.27693
12	21	0.20228	30	16	−0.27867
13	6	0.17143	31	31	−0.31010
14	32	0.11087	32	12	−0.33758
15	2	0.10730	33	8	−0.37944
16	23	0.10434	34	11	−0.40598
17	18	0.04136	35	17	−0.50512
18	15	0.02633	36	36	−0.56904

行政楼前行道树景观美景度值排名第二，是行道树景观类型中排名最高的(图 1: B)。主要行道树种有黄花风铃木和黄葛榕。从行道树的布局来看，温暖的金黄色与清新绿色行道树“人”字排开，形成黄绿色的过渡，呈现出自然而虚幻的感官体验，花海于后面映衬，深绿色的非洲桃花心木 *Khaya senegalensis* 行道树作为背景，形成了浓淡兼备而鲜活的画面，景观效果良好。

香园建筑景观美景度值排名第三，是建筑类景观中排名最高的(图 1: C)。以宫粉羊蹄甲和白花洋紫荆为主要树种，自然式

混合栽植，并点植一棵高大的南洋楹 *Albizia falcataria*，整体借助坡地营造出山林的意境，而香园建筑隐于花海中，屋顶的颜色与花海相称，整体立面效果色彩层次丰富，视觉效果佳。

美景度欠佳的图书馆后停车场景观美景度值最低，虽然主要种植的也是黄花风铃木，但由于栽植不久，长势欠佳，枝叶稀疏，对停车场的覆盖遮荫效果不足，且色彩单一，缺乏美感，导致整体视觉效果较差(图 1: D)。从立体空间来看，裸露的铺装地面和挡土墙以及密集的汽车，不易获得人们的喜爱。建议适当减少对树池的铺装，为植物根系生长提供足够的空间；在挡土墙周围栽植攀援植物或观花灌木，以修饰裸露的挡土墙，从而使得停车场景观更丰富。

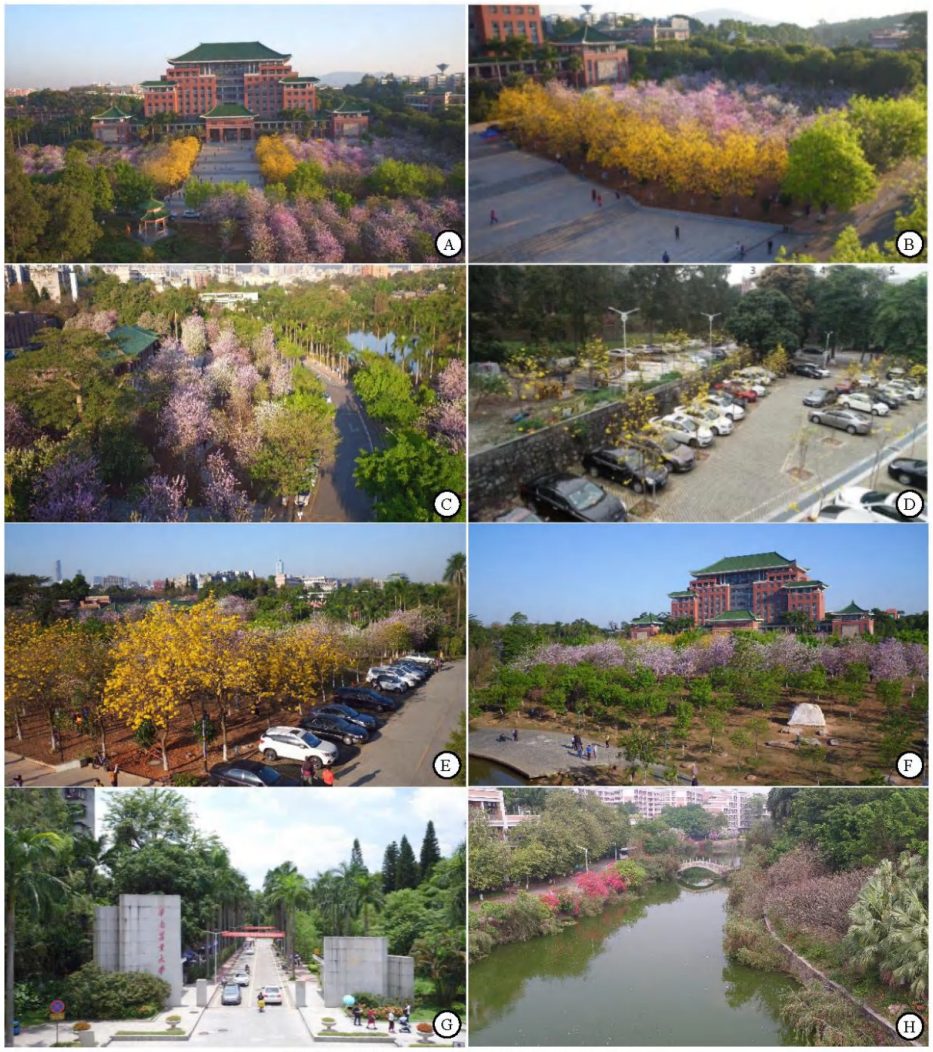


图 1 华南农业大学校园部分植物景观单元

Fig. 1 Plant landscape units in South China Agricultural University

A.行政楼广场景观；B.行政楼前行道树景观；C.香园建筑景观；D.校园图书馆后停车场景观；E.行政楼前停车场景观；F.儒园石景；G.南校门出入口景观；H.西湖滨水景观

停车场景观中美景度值最高的为行政楼前停车场景观(图 1: E)。该景观以黄花风铃木为行道树进行列植，形成了长条形的停车场。植物长势良好，色彩层次分明，布局简洁明了，背面一片羊蹄甲花海景观，对整体景观起到良好的塑造作用。

石景景观中，美景度值最高的为儒园石景(图 1: F)。缓坡地上种植了福建山樱花 *Cerasus campanulata*、鸡爪槭 *Acer palmatum*、宫粉羊蹄甲等；草坪植被覆盖度良好，形成了疏林草地的景观；儒园的石景突出，视野广阔，景观序列丰富，为师生提供了休憩的场所，是师生乃至周边市民露营活动的重要场地之一。

出入口景观美景度值最高的为南门出入口景观(图 1: G)，该景观以富有南亚热带风情的大王椰子和提琴形叶子的琴叶榕 *Ficus pandurata* 为行道树，搭配落叶乔木木棉 *Bombax ceiba*，还有群植的塔型树冠的南洋杉 *Araucaria heterophylla* 与丛植的棕榈科散尾葵 *Chrysalidocarpus lutescens*；林下栽植花灌木，如四季桂 *Osmanthus fragrans*、琴叶珊瑚 *Jatropha integerrima*、龙船花 *Ixora chinensis*；行道树下摆设一列栽有凤尾鸡冠花 *Celosia argentea*、长春花 *Catharanthus roseus*、一串红 *Salvia splendens* 等一二年生花卉的花钵，营造出层次感较丰富的出入口景观。整体植物竖向分布层次分明，空间布局丰富，仪式感强烈，彰显地域特色，景观效果佳。

西湖滨水景观是水景类美景度值最高的(图 1: H)。虽然是冬季的植物景观，但盛开的光叶子花鲜艳夺目，并配置有棕榈科植物蒲葵 *Livistona chinensis*、落叶期的鸡蛋花 *Plumeria rubra*；沿水岸还密集种植多花红千层 *Callistemon viminalis*，其枝条柔软下垂，修饰了硬质挡土墙。该景观整体植物种类丰富而自然，但因缺乏养护管理，植物配置总体略显杂乱。

2.2 植物资源与植物景观分析

选取的 36 张照片中应用的植物有 121 种，隶属 59 科 98 属，其中棕榈科和豆科的树种较多，应用频率较高的有宫粉羊蹄甲、大王椰子、黄葛榕、黄花风铃木、木棉、散尾葵等；灌木应用较多的有光叶子花、假连翘 *Duranta repens*、红花檵木 *Loropetalum chinense*、多花红千层、龙船花、灰莉 *Fagraea ceilanica* 等；草本地被主要有地毯草 *Axonopus compressus*、花叶良姜 *Alpinia zerumbet* ‘Variegata’、狗牙根 *Cynodon dactylon*、蜘蛛兰 *Taeniophyllum glandulosum*、三裂叶蟛蜞菊 *Wedelia trilobata*、肾蕨 *Nephrolepis auriculata* 等(图 2)。美景度值高的景观，其植物资源多且生长状况良好，枝叶繁茂，高低错落，花色或叶色突出，色彩丰富，四季景观不同且各具特色；四季常青的棕榈科植物交相辉映，突出了南亚热带特色。

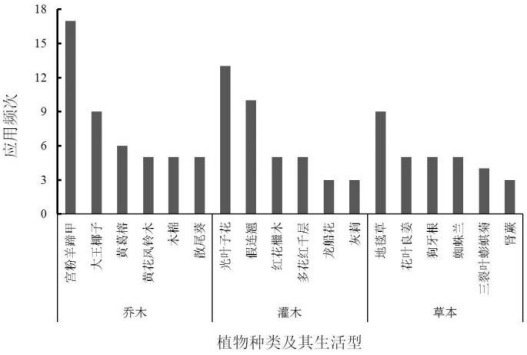


图 2　植物景观单元中应用频次较高的植物种类

Fig. 2　High frequency of plant application in plant landscape units

2.3 美景度评价景观要素回归分析

以植物色彩丰富度、植物与硬质景观协调性、植物多样性、植物景观空间层次丰富度以及对景观的喜爱程度五个要素作为因变量，SBE 值为自变量进行多元线性回归分析。结果表明，植物色彩丰富度(Sig.=0.000<0.05)、植物多样性(Sig.=0.032<0.05)与美景度有显著相关性，植物景观空间层次丰富度(Sig.=0.246>0.05)、植物与硬质景观协调性(Sig.=0.197>0.05)、对植物景观的喜爱度(Sig.=0.523>0.05)与美景度无显著相关性(表 3)。因此，各要素对华南农业大学校园植物景观美景度的影响度大小为植物色彩丰富度>植物多样性>植物与硬质景观协调性>植物景观空间层次丰富度>对植物景观的喜爱度。

剔除与美景度相关性较小的三个要素之后，重新进行以植物色彩丰富度和植物多样性两要素为因变量、SBE 值为自变量的多元线性回归分析，可得回归方程 $Y= -3.916 + 0.433X1 + 0.667X3$，其中 X1 为植物色彩丰富度，X3 为植物多样性，Y 为 SBE 值(表 3)。

表 3 美景度评价景观要素回归分析

Table 3 Analysis of regression to landscape elements in scenic beauty evaluation

模型	回归系数	标准化回归系数	T	Sig.	模型	回归系数	标准化回归系数	T	Sig.
(常数)	−4.372		−35.666	0.000	(常数)	−3.916		−30.873	0.000
植物色彩丰富度 X1	0.265	0.279	4.374	0.000	植物色彩丰富度 X1	0.433	0.467	8.176	0.000
植物与硬质景观协调性 X2	0.280	0.202	1.320	0.197	植物多样性 X3	0.667	0.556	9.733	0.000
植物多样性 X3	0.293	0.244	2.246	0.032					
植物景观空间层次丰富度 X4	0.184	0.143	1.183	0.246					
对植物景观的喜爱度 X5	0.087	0.074	0.646	0.523					

3 讨论

美的校园环境可以为学生营造良好的学习、探索、成长空间，其植物景观美感体验有利于学生感受美、发现美、创造美，并在美的环境下潜移默化养成美的行为、美的语言、美的人格，研究和探索合适的校园植物配置模式有着重要的意义[2]。本文采用基于无人机航拍的 SBE 法对华南农业大学 36 处代表性植物景观进行研究，从航拍的立面布局角度探讨校园植物景观，使得评判者能对植物空间布局进行评判；从俯视的视角来看，植物群落复层结构清晰可见，空间布局层次丰富，植物景观质量整体水平良好，师生及市民对校园植物景观的美感体验良好。华南农业大学校园植物景观与校园文化、学科优势很好地结合，反映民众向往兼具自然和人文气息的环境。

校园的本底特色是以棕榈科植物为主的富有南亚热带风情的植物景观，为华南农业大学整个校园植物景观定下地域特色的基调，使得校园植物景观既有地域特色又有丰富的景观效果。通过线性回归分析，影响华南农业大学校园植物景观美景度的显著因素为植物色彩丰富度和植物多样性。可见，校园植物景观的质量差异主要体现在植物种类及其色彩丰富度上。植物种类的丰富度越高，植物种植层次越丰富，即乔灌草的合理配合种植营造出立体的复层结构植物景观，其美景度值也相对较高；植物色彩越是鲜活，越能给人以强烈的视觉冲击，植物景观的美景度值相对较高。然而，研究结果也反映出应用无人机航拍进行景观评价的局限性，即较侧重色彩表现和对比，对于一些开花较少，色彩对比不突出，或以闻香为主的植物景观的评价会有局限性，因此，应与样方调查相结合。

参考文献：

[1] 熊伟,陈科平. 高校校园园林植物配置设计中意境的营造[J]. 北方园艺, 2018(5): 103—106.

[2] 林锐,李叶芳,姜蕾,蔡薇,关文灵,陈贤. 云南农业大学校园植物景观评价[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017,32(1): 184—190.

[3] 郜春丽,翁殊斐,赵宝玉. 基于 AHP 法的滨水绿道植物景观评价体系构建[J]. 西北林学院学报, 2013,28(3): 206—209.

[4] 区有和. 广州六所高校校园景观效果及物种组成特点研究[D]. 广州: 华南农业大学硕士学位论文, 2016.

[5] 龚鹏,刘纯青,古新仁. 照片、动画媒介在城市植物视觉景观评估中的替代效应研究[J]. 中国园林, 2017,33(8): 97—102.

[6] 赵坤,潘江琼. 清华大学校园绿地木本植物结构及配置分析[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2018,2(1): 87—91.

[7] 赵中建. 基于航空模型和航拍技术的景观评价系统分析[J]. 郑州轻工业学院学报(社会科学版), 2014 (1): 94—99.

[8] 翁殊斐,朱锦心,苏志尧,袁喆,郜春丽. 岭南地区滨水绿地植物景观质量评价[J]. 林业科学, 2017,53(1): 20—27.

[9] 李雪,陈楚文,徐慧楠. 浙江农林大学东湖景观区景观美景度评价[J]. 山西建筑, 2016,42(33): 203—205.

[10] 翁殊斐,柯峰,黎彩敏. 用 AHP 法和 SBE 法研究广州公园植物景观单元[J]. 中国园林, 2009,25(4): 78—81.

[11] 宋力,何兴元,张洁. 沈阳城市公园植物景观美学质量测定方法研究——美景度评估法、平均值法和成对比较法的比较[J]. 沈阳农业大学学报, 2006,37(2): 200—203.

[12] Brown T C, Daniel T C. Predicting scenic beauty of timber stands[J]. Forest Science, 1986,32(2): 471—487.

[13] Buhyoff G J, Wellman J D. Landscape preference metrics, an international comparison[J]. Journal of Environmental Management, 1983(16): 181—190.

亚热带植物科学
YAREDAI ZHIWU KEXUE
（季刊　1972 年创刊）
第 48 卷　第 3 期　2019 年 9 月

Subtropical Plant Science
(Quarterly, Started in 1972)
Vol. 48　No. 3　September 2019

主　　管　厦门市科学技术局
主　　办　福建省亚热带植物研究所
主　　编　苏明华
编辑出版　《亚热带植物科学》编辑部
　　科学出版社
地　　址　厦门市嘉禾路 780 号(361006)
电　　话　0592-5654157
电子信箱　yrdzwkx@126.com
网　　址　www.yrdzwkx.com
印　　刷　厦门集大印刷厂
国内发行　科学出版社
订 购 处　全国非邮发报刊联订服务部
　　(天津市河西区大寺泉集北里别墅 17 号 300381)
国外发行　中国出版贸易对外总公司
　　(北京 782 信箱 100011)
数字发行　博看网 http://www.bookan.com.cn

Supervised by Xiamen Municipal Bureau of Science & Technology
Sponsored by Fujian Institute of Subtropical Botany
Editor-in-Chief SU Ming-hua
Edited & Published by Editorial Department of Subtropical Plant Science; Science Press
Add. 780 Jiahe Road, Xiamen 361006, Fujian China
Tel. 0592-5654157
E-mail yrdzwkx@126.com
Website www.yrdzwkx.com
Printed by Xiamen Jida Printing House
Domestic Distributed by Science Press
Overseas Distributed by China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)
Digital Distribution http://www.bookan.com.cn

ISSN 1009-7791

中国标准连续出版物号：ISSN 1009-7791
CN 35-1243/S

国内定价：15.00 元

3.以通讯作者发表本专业论文情况

3.1.9种园林植物幼苗光合特性及固碳释氧能力研究

林业与环境科学
Forestry and Environmental Science
2023年4月第39卷第2期

目　次

9种园林植物幼苗光合特性及固碳释氧能力研究*

古佳玮　冼丽铧　郑峰霖　陈红跃
(华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642)

摘要　为探究广州市常见园林植物夏季光合特性及其固碳释氧能力，以广州市园林9种典型园林树种幼苗为研究材料，采用Li-Cor6400便携式光合测定仪测定光合参数特征和光响应曲线，计算各苗木的日固碳释氧能力，分析光合速率影响因素，并以单位绿化面积固碳量作为衡量各树种苗木吸收CO_2能力的特征向量进行聚类分析。结果表明：9种的园林树种幼苗单位叶面积固碳量和释氧量分别为6.25~11.93、4.55~8.68 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$，单位绿化面积固碳量和释氧量分别为1.87~10.37、1.33~7.54 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$，9个园林树种苗木的光合净固碳量按高低排序可分为3类，单株植物单位绿化面积固碳量较高（9.44~10.37 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）的有铁冬青 *Ilex rotunda*、枫香 *Liquidambar formosana*、假苹婆 *Sterculia lanceolata*、糖胶树 *Alstonia scholaris*，中等（7.19~8.38 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）的有仪花 *Lysidice rhodostegia*、樟树 *Cinnamomum camphora*，较低（1.87~5.89 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$）的有杧果 *Mangifera indica*、木油桐 *Aleurites montana*、鱼尾葵 *Caryota ochlandra*。综合考虑植物的光合及固碳特性，在树种配置时，枫香、糖胶树、假苹婆和铁冬青为优选乔木树种。

关键词　园林树种；光合作用；固碳释氧；碳汇
中图分类号：S714　**文献标志码**：A　**文章编号**：2096-2053(2023)02-0046-08

Study on Photosynthetic Characteristics and Carbon Fixation and Oxygen Release Capacity of Nine Garden Plant Seedlings

GU Jiawei　XIAN Lihua　ZHENG Fenglin　CHAN Hongyue
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642,China)

Abstract　To explore the photosynthetic characteristics and carbon fixation and oxygen release capacity of common garden plants in Guangzhou in summer, seedlings of 9 typical garden tree species in Guangzhou were used as research materials. The characteristics of photosynthetic parameters were measured with a Li-Cor6400 portable photosynthetic analyzer, and the daily carbon fixation and oxygen release capacity of each seedling was calculated quantitatively. The light response parameters and the factors affecting the photosynthetic rate were analyzed. The carbon fixation per unit green area was used as the feature vector to measure the CO_2 absorption capacity of each species of seedlings for cluster analysis. The results showed that the carbon fixation and oxygen release per unit leaf area of seedlings of nine garden tree species were 6.25-11.93 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ and 4.55-8.68 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ respectively, and the carbon sequestration and oxygen release per unit land surface were 1.87-10.37 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ and 1.33-7.54 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$ respectively. The photosynthetic net carbon sequestration of the seedlings of nine garden tree species can be divided into three categories according to the order of high and low. The higher carbon(9.44-10.37

* 基金项目：广东省林业科技创新项目（2023KJCX001）、广东省林业科技创新项目（2017KJCX010）。
第一作者：古佳玮（1999—），女，在读硕士研究生，研究方向为森林培育，E-mail:clydev@stu.scau.edu.cn。
通信作者：冼丽铧（1987—），女，实验师，研究方向为城市园林植物绿化，E-mail:xianlihua@scau.edu.cn。

$g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) sequestration per unit green area of a single plant is *Ilex rotunda* , *Liquidambar formosana*, *Sterculia lanceolata*, *Alstonia scholaris*, the medium(7.19-8.38 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) is *Lysidice rhodostegia*, *Cinnamomum camphora*, and the lower(1.87-5.89 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$) is *Mangifera indica*, *Aleurites montana*, and *Caryota ochlandra* .In consideration of the photosynthetic and carbon fixation characteristics of plants, *Liquidambar formosana*, *Alstonia scholaris*, *Sterculia lanceolata*, and *Ilex rotunda* are the best tree species for tree species allocation.

Key words garden tree species；photosynthetic；carbon fixation and oxygen release；carbon sink

城市绿地具有增碳汇、减碳排的双重生态效益，被认为是推动城市实现“双碳”目标的重要自然途径[1]。在城市化进程加速的发展背景下，作为该过程中的唯一的自然碳汇，城市绿化的规划和建设日益受到重视。园林植物是建设城市绿地和美化城市面貌的重要组成部分。植物利用光合作用吸收二氧化碳释放氧气，实现城市环境中的碳氧平衡，并通过表面气孔的蒸腾作用实现降温增湿[2]，对缓解城市热岛效应[3]、改善区域小气候[4]都有着显著作用。因此，提高城市绿地的生态效益依赖于植被覆盖度的增加、植被类型的完善和植被空间布局的优化。近年来，城市园林绿化植物的光合特性受到了广泛的关注[5]，相关研究主要集中在植物光合作用能力、各胁迫响应下对环境的适应能力和固碳释氧能力等方面。如李娟霞等[6]、王卓敏等[7]对园林植物净光合速率和蒸腾速率等光合特性进行研究，并依据指标进行分类评价；ZHANG J.J 等[8]研究了木麻黄 *Casuarina equisetifolia* 在夏、秋、冬季两种光环境下的光合特性；许容榕等[9]、蔡金桓等[10]分别以淹水胁迫和盐胁迫探究园林植物的气孔导度、胞间 CO_2 浓度等光合特性；宋卓琴等[11]研究了太原市常见的34种园林植物的春季光合特性，并定量地研究了参试植物的固碳释氧和降温增湿能力。各研究结果表明，筛选出在其特定生态区下生长良好且具有高效的光合利用率及固碳释氧效益的树种更加具有指导意义。目前，广州地区对园林植物的研究主要集中在植物群落及配置方面，对当地植物的生态功能定量化的研究还很少。本文通过对广州市9种园林植物幼苗进行光合生理特征参数及其影响因子、日固碳释氧能力研究，定量化探究不同树种光合生理特性及固碳释氧能力的差异，旨在为城市园林绿化树种选择和植被群落的空间配置提供科学的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于广州市华南农业大学林学与风景园林学院9楼苗圃（23°08′ N，113°14′ E），属亚热带季风气候，夏季高温多雨，冬季温和少雨。年平均气温21.9~22.8 ℃，8—11月（试验期间）日照充足、降水丰富，是植物光合作用旺盛期。年降水量1 696.5 mm，平均相对湿度为77%。最热月为7—8月，平均气温28.0~28.7 ℃；最冷月1月，平均气温12.4~13.5 ℃。

1.2 试验材料

对广州市区绿化树种广泛深入调查的基础上，选择了园林绿化中常用的生长健壮、病害较少的樟树 *Cinnamomum camphora*、假苹婆 *Sterculia lanceolata*、杧果 *Mangifera indica*、鱼尾葵 *Caryota ochlandra*、糖胶树 *Alstonia scholaris*、铁冬青 *Ilex rotunda*、木油桐 *Aleurites montana* 枫香 *Liquidambar formosana*、仪花 *Lysidice rhodostegia* 共9种园林树木为研究对象。试验树种的苗木均来源于广东国森林业有限公司。容器选择直径14 cm、高16 cm的塑料盆，基质土量约1.5 kg，基质为70%黄心土＋30%腐殖质土，培养3个月后进行试验。试验材料均采用生长正常、环境和基质等条件一致的2年生的树苗。试验树种苗木基本情况与生长指标状况见表1。

1.3 试验方法

1.3.1 光合特征参数的测定 2021年8月，选择晴朗天气断续测定9 d的光合日变化，测定时间为6:00—18:00时，每隔1 h用Li-Cor6400光合仪测定1次光合指标，指标包括净光合速率（Pn）、蒸腾速率（Tr）、气孔导度（Gs）、空气相对湿度（RH）、光合有效辐射（PAR）、饱和蒸气压亏缺（VpdL）和气温（Ta）等。测定时每树种选择3株

表1 参试树种苗木概况

Table 1 The basic information of test plants

树种 Species	科 Family	类型 Plant type	苗高/cm Seedling height	冠幅/cm The crown	整株叶面积/cm^2 Leaf area
木油桐	大戟科	落叶乔木	53.97 ± 1.85	27.60 ± 0.59	461.75 ± 37.13
杧果	漆树科	常绿乔木	53.77 ± 1.07	31.10 ± 0.34	475.48 ± 63.07
樟树	樟科	常绿乔木	52.07 ± 0.62	25.00 ± 0.20	417.18 ± 78.49
鱼尾葵	棕榈科	常绿乔木	46.87 ± 0.36	45.83 ± 0.11	452.15 ± 75.72
铁冬青	冬青科	常绿乔木	47.83 ± 0.21	19.23 ± 0.07	258.77 ± 23.07
枫香	金缕梅科	落叶乔木	50.07 ± 0.04	22.07 ± 0.01	331.59 ± 18.34
糖胶树	夹竹桃科	常绿乔木	54.67 ± 0.02	25.50 ± 0.01	672.82 ± 51.06
仪花	苏木科	常绿乔木	42.57 ± 2.89	23.10 ± 0.70	403.37 ± 104.36
假苹婆	梧桐科	常绿乔木	46.43 ± 0.93	24.00 ± 2.65	500.85 ± 75.76

苗木，每株测3片叶并重复3次，取多次测定的平均值。

1.3.2 光合响曲线测定以及光合参数拟合 于2021年7—8月天气晴朗的上午9:00—11:30，每个树种幼苗选择3株健康幼苗，每株选择健康成熟的叶片3片，应用Li-Cor6400光合仪测定光合-光响应曲线（Pn-PAR），将人工光源光合有效辐射PAR梯度设定为1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、200、100、50、20、10、0 μmol · m^{-2} · s^{-1}。自动测定不同光强条件下叶片的净光合速率，测定的最小匹配时间为120 s，最大为200 s，3次重复取平均值。利用非直角双曲线模型拟合光合-光响应曲线参数，得出光饱和点（Lsp）、光补偿点（Lcp）、暗呼吸速率（Rd）和最大净光合速率（Pn）等参数。

1.3.3 叶面积指数估算 植物所覆盖的土地面积为植物树冠投影面积，为 S_2 (m^2):$S_2=1/4\pi D^2$，式中 D 为树冠直径。因此，植被单株叶面积指数的计算公式为：$I_{LA}=Y/S_2$，式中，Y 为整株叶面积。

1.3.4 固碳释氧测定 首先根据树种在某一季节的Pn日变化绘制曲线，采用简单积分法求出测定当日各树种幼苗的净同化量，计算公式为[12]：

$$T=\sum_{i=1}^{j}[3\ 600(P_{i+1}+P_i)(t_{i+1}+t_i)/1\ 000] \cdots\cdots(1)$$

式（1）中：T 为测定当日的净同化总量，mmol · m^2 · d^{-1}；P_i 和 P_{i+1} 分别为初测点和下一测定点的瞬时净光合速率，μmol · m^{-2} · s^{-1}；t_i 和 t_{i+1} 分别为初测点和下一测定点的瞬时时间；j 为测定次数，3 600表示3 600 s/h，1 000指1 mmol可换算为1 000 μmol。一般植物夜间的暗呼吸消耗按照白天同化量的20%计算[13]，并将其同化总量换算成当日单位面积叶片的净固碳量与净释氧量，计算公式为：

$$净固碳量=44(1\text{-}0.2)T/1\ 000 \cdots\cdots(2)$$

$$释氧量=32(1\text{-}0.2)T/1\ 000 \cdots\cdots(3)$$

式（2）中，44为 CO_2 的摩尔质量，g · mol^{-1}；式（3）中，32为 O_2 的摩尔质量，g · mol^{-1}。

则单株植物单位绿化面积上每天吸收 CO_2 和释放 O_2 量为：

$$Q_{CO_2}=I_{LA}\times W_{CO_2} \cdots\cdots(4)$$

$$Q_{O_2}=I_{LA}\times W_{O_2} \cdots\cdots(5)$$

式（4）中，Q_{CO_2} 为单株植物单位绿化面积上日固定 CO_2 的量 (g · m^{-2} · d^{-1})；式（5）中，Q_{O_2} 单株植物单位绿化面积上日固定 O_2 的量 (g · m^{-2} · d^{-1})；I_{LA} 为单株叶面积指数。

1.4 分析方法

所得数据使用Li-Cor6400光合仪自带软件Li-Cor6400/XT模拟软件处理，SPSS 26.0软件进行统计分析，并用Microsoft Excel 2016作图。采用SAS统计软件编程实现聚类分析的过程，并得到聚类分析的谱系图。

2 结果与分析

2.1 主要环境因子日变化

在观测期间，气温、光辐射强度和相对湿度的日变化如图 1 所示。试验地气温、光辐射强度和相对湿度日均值分别为 26.54 ℃，851.92 μmol · m^{-2} · s^{-1}，30.98%。气温和光辐射值都是先升后降，且均在 13:00 时到达最高值，分别是 29.96 ℃和 1 586.67 μmol · m^{-2} · s^{-1}；相对湿度则在达到最高值（41.51%）后，先降后升，在 16:00 时左右降到最低值，为 25.52%。气温和光辐射的变化趋势呈正相关，气温和相对湿度的变化趋势则呈相反趋势。

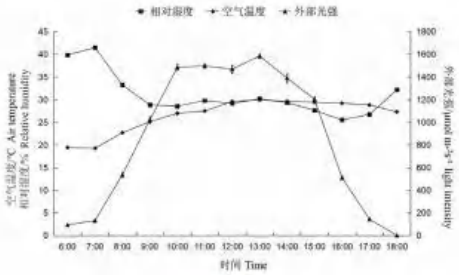


图 1 环境因子的日变化

Fig. 1 Daily variation of environmental factors

2.2 光合参数的动态变化特征

2.2.1 净光合速率的日变化 净光合速率（Pn）反映植物叶片固定二氧化碳能力的大小[14]。由图 2 可知，铁冬青、樟树、木油桐、枫香、鱼尾葵的 Pn 日变化都呈单峰曲线型，枫香、鱼尾葵峰值出现于 10:00 时，其余树种峰值均出现于 12:00 时。杧果、糖胶树、假苹婆、仪花的 Pn 日变化表现为明显的双峰曲线，均于 12:00 时出现第 1 个峰值，约 15:00 时达到第 2 个峰值。可以看出，枫香的峰值峰值出现较早，但在 16:00 时仍有较高的净光合速率，表明枫香更能充分利用光能。杧果、糖胶树、假苹婆、仪花的光合日进程都出现明显的光合“午休”现象，经过光合午休后，其光合作用均不能恢复到午休前最高水平。Pn 因种类不同存在差异，枫香、铁冬青具有较高的日均净光合速率，分别为 3.696 和 3.680 μmol · m^{-2} · s^{-1}。其次是樟树（2.944 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞仪花（2.835 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞假苹婆（2.827 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞杧果（2.748 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞糖胶树（2.133 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞鱼尾葵（2.519 μmol · m^{-2} · s^{-1}），最小的是木油桐，为 1.761 μmol · m^{-2} · s^{-1}。

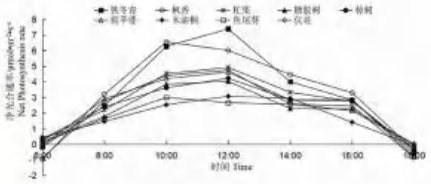


图 2 参试植物净光合速率 (Pn) 的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of net photosynthetic rate (Pn) of the test plants

2.2.2 蒸腾速率 假苹婆和铁冬青的蒸腾速率（Tr）日变化趋势表现为单峰曲线。二者最高峰均在 11:00 和 12:00 时。木油桐、杧果、枫香、糖胶树、仪花和樟树的 Tr 日变化趋势表现为双峰曲线。就蒸腾速率（Tr）日变化趋势而言，各树种幼苗在午间前后具有较高的蒸腾速率，早晚较低。植物通过蒸腾作用扩散水分、降低叶片温度以适应午间的高光强高温，减轻高温环境对叶片造成灼伤。不同树种的 Tr 日均值有一定的差异，铁冬青、枫香具有较高的日均蒸腾速率，分别为 2.121、1.962 μmol · m^{-2} · s^{-1}，较大，其次为杧果（1.193 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、仪花（1.063 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、糖胶树（1.061 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、假苹婆（1.042 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、而鱼尾葵（0.866 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、木油桐（0.964 mmol · m^{-2} · s^{-1}）、樟树（0.994 mmol · m^{-2} · s^{-1}）则相对较低。

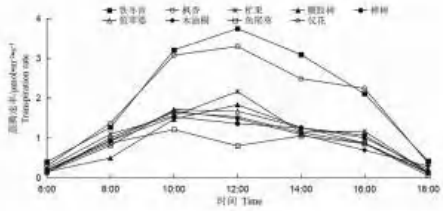


图 3 参试植物蒸腾速率 (Tr) 的动态变化

Fig. 3 Dynamic change of transpiration rate (Tr) of test plants

2.2.3 光合净固碳量和释氧量 从表2看出，不同园林植物的净固碳量和释氧量存在差异。9种园林树种苗木10月份的单位叶面积净固碳量在6.25~11.93 g · m^{-2} · d^{-1}之间，单位叶面积净释氧量在4.555~8.68 g · m^{-2} · d^{-1}之间，单位绿化面积固碳量在1.875~10.37 g · m^{-2} · d^{-1}之间。单位绿化面积释氧量在1.335~7.54 g · m^{-2} · d^{-1}之间。参试植物在10月份的单位叶面积固碳能力表现依次为：枫香＞铁冬青＞杧果＞假苹婆＞仪花＞樟树＞糖胶树＞鱼尾葵＞木油桐。单位绿化面积固碳能力依次表现为：铁冬青＞枫香＞假苹婆＞糖胶树＞仪花＞樟树＞杧果＞木油桐＞鱼尾葵。糖胶树和假苹婆的单位叶面积净固碳释氧量不算高，但其叶面积指数远大于其他树种且在广州地区具有较好的生长适应能力，使得这些植物单株固碳释氧能力得到较大的提升。以单位绿化面积固碳量作为衡量各树种苗木吸收CO_2能力的特征向量进行聚类分析，得出9个园林树种苗木的光合净固碳量可分为3类（图4所示），依次为：

第一类（单位绿化面积固碳量较高，9.44~10.37 g · m^{-2} · d^{-1}）：铁冬青、枫香、假苹婆、糖胶树。

第二类（单位绿化面积固碳量中等，7.19~8.38 g · m^{-2} · d^{-1}）：仪花、樟树。

第三类（单位绿化面积固碳量较低，1.87~5.89 g · m^{-2} · d^{-1}）：杧果、木油桐、鱼尾葵。

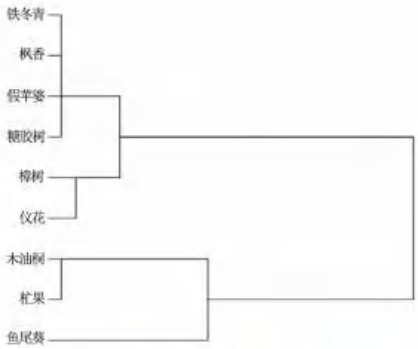


图4 参试植物单位绿化面积固碳释氧能力聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of carbon fixation and oxygen release capacity of the testplants

2.3 不同树种光合光响应曲线的比较

2.3.1 光响应进程 如图5参试植物的光合光响应曲线可知，PAR为0时，各树种的Pn值均为负，表明在此期间，植物只有呼吸作用，这时Pn值的倒数即为其的暗呼吸速率(Rday)。在光合作用初期，净光合速率随光合有效辐射强度的增大而增大，且迅速升高；在光合有效辐射达到某一水平后，净光合速率的增加速度逐渐减缓；到达光饱和点后，净光合速率变化较小，且都维持在较高水平。糖胶树、枫香、木油桐的光合能力较

表2 参试植物光合固碳量和释氧量 g · m^{-2} · d^{-1}
Table 2 Photosynthetic carbon fixation and oxygen release of the testplants

树种 Species	单位叶面积净固碳量 Carbon fixation per unit leaf area	单位叶面积净释氧量 Oxygen release per unit leaf area	单位绿化面积固碳量 Carbon fixation per unit green area	单位绿化面积释氧量 Oxygen release per unit green area
木油桐	6.25	4.55	4.83	3.51
杧果	9.41	6.84	5.89	4.29
樟树	8.46	6.15	7.19	5.23
鱼尾葵	6.80	4.95	1.87	1.36
铁冬青	11.63	8.46	10.37	7.54
枫香	11.93	8.68	10.35	7.53
糖胶树	7.15	5.20	9.44	6.86
仪花	8.70	6.33	8.38	6.09
假苹婆	9.15	6.65	10.13	7.37

强，杧果、铁冬青、樟树次之，假苹婆、鱼尾葵的光合能力最弱。

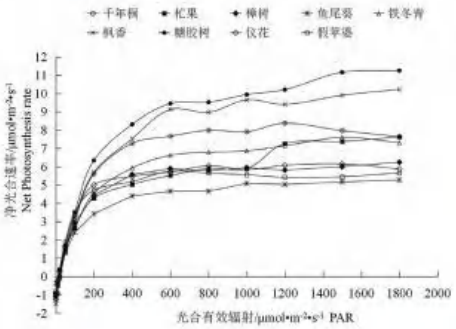


图 5 参试植物的光合光响应曲线光合有效辐射

Fig. 5 Photosynthetic light-response curves of test plants

2.3.2 光响应参数 表 3 为 9 种参试植物的光响应曲线特征参数。Lsp 反映了植物对弱光的适应能力[15]，参试植物中，鱼尾葵、樟树、假苹婆的 Lcp 较低，表明其对弱光的利用能力越强。Lsp 反映了植物对强光的利用能力[15]，木油桐、仪花、枫香和铁冬青的 Lsp 较大，分别为 635.86、626.04、622.50 和 615.00 μmol · m^{-2} · s^{-1}。AQE 较大有仪花、假苹婆、枫香和糖胶树等，分别为 0.072 6、0.070 0、0.065 4 和 0.059 4 μmol · $μmol^{-1}$，利用弱光的能力较强。最大净光合速率（P_{max}）反映了植物在单位面积叶片上所能将大气中的 CO_2 转化成有机物的最大潜力[16]，它在一定程度上反映了其生长速度及强光的利用能力，9 种树种 P_{max} 的大小范围为 5.43~11.95 μmol · m^{-2} · s^{-1}，P_{max} 较大的有糖胶树、枫香、铁冬青和木油桐，分别为 11.95、11.72、9.54 和 8.87 μmol · m^{-2} · s^{-1}；其次是杧果、樟树、仪花，较小的是假苹婆和鱼尾葵。9 种树种的暗呼吸速率（Rday）的大小顺序为鱼尾葵（-0.35 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞樟树（-0.64 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞铁冬青（-0.87 μmol · m^{-2} · s^{-1}），其次是木油桐、杧果、假苹婆，Rday 较小的树种有糖胶树（-1.28 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞仪花（-1.31 μmol · m^{-2} · s^{-1}）＞枫香（-1.33 μmol · m^{-2} · s^{-1}）。以上结果表明木油桐、仪花、枫香和铁冬青利用强光能力较强，仪花、假苹婆利用弱光能力较强，糖胶树、枫香、铁冬青的光合能力较强，鱼尾葵、樟树的暗呼吸较强。

3 讨论与结论

本研究 9 种园林植物幼苗的净光合速率日变化中，除樟树和铁冬青外，其他树种 Pn 日变化多表现为双峰曲线，存在明显的“光合午休”现象。目前，很多学者都对光合的午休现象进行了研究，表明引起植物光合午休的主要外部原因是高温、高光强和低湿[17]。由于测定时段的外部环

表 3 参试植物光响应曲线参数值

Tab. 3 Parameters of light-response curves of test plants

树种 Species	光响应曲线的特征参数 Characteristic parameters of light-response curves				
	光补偿点 / (μmol · m^{-2} · s^{-1}) Lcp	光饱和点 / (μmol · m^{-2} · s^{-1}) Lsp	表观量子效率 / (μmol · $μmol^{-1}$) AQE	暗呼吸速率 / (μmol · m^{-2} · s^{-1}) Rday	最大净光合速率 / (μmol · m^{-2} · s^{-1}) P_{max}
木油桐	21.53	635.86	0.044	-0.93	8.87
杧果	17.13	566.33	0.058	-0.98	8.70
樟树	12.08	572.00	0.051	-0.64	7.87
鱼尾葵	7.97	536.86	0.050	-0.35	5.43
铁冬青	18.00	615.00	0.049	-0.87	9.54
枫香	21.43	622.50	0.065	-1.33	11.72
糖胶树	22.03	533.50	0.059	-1.28	11.95
仪花	18.31	626.04	0.073	-1.31	7.55
假苹婆	14.13	510.62	0.070	-0.99	6.75

境因子的改变引起气孔部分关闭及植物叶片光合作用器官功能受到损害等。Pn午间下降幅度的差异表明不同植物受环境因素的影响和抑制程度不同，同时不同植物Pn的峰值时间不同也说明9个树种对自然环境的光合作用响应时效不同。不同树种净光合速率（Pn）和蒸腾速率（Tr）变化表现出不同的规律，但二者均以早晚低、午间前后高为特征。这是由于植物叶片Pn受太阳辐射的影响，分析太阳辐射与净光合速率相关性可知，Pn与光合有效辐射呈极显著的正相关关系。早晚太阳辐射较低，而午间前后Pn较高植物可利用太阳能充足，叶片光合器官具有较高的活性[18]。午间植物Tr较高是由于植物需要通过蒸腾作用扩散水分、降低叶片温度以适应午间的高光强高温。

不同的学者提出了直角双曲线模型、非直角双曲线模型、指数模型等模型来模拟气体交换参数对光的响应[19]。本研究采用常用的非直角双曲线模拟各响应参数，并以此为基础比较了9种树种光响应参数的差异，同时其对光响应参数的日变化进行了探索。光响应变化曲线均为先上升后逐渐平缓，供试苗木中木油桐、仪花、枫香和铁冬青利用强光能力较强，仪花、假苹婆利用弱光能力较强，糖胶树、枫香、铁冬青的光合能力较强，鱼尾葵、樟树的暗呼吸较强。研究结果表明，非直角双曲线模型确实存在估计的光饱和点过低和光合能力过高的问题[20]，并不能代表各植物的最佳拟合方式，各植物最适光响应模型还有待进一步研究，另外，不同季节和气候对植物的光响应曲线也有一定的影响，还有待深一步的研究。本研究通过对9种园林植物幼苗的光合、固碳特性的综合分析，结果显示：高温、强光照会减弱参试植物的光合作用，9种园林植物幼苗光能利用特性不同，表现出不同的耐荫性，在园林景观配置中处于不同的位置。

鱼尾葵和假苹婆具有低光补偿点（<15 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$），同时具有低饱和点，能够充分利用弱光，也可以在一定程度上忍受光线照射，能够适应较宽的光照范围，具有较强的耐荫性，耐荫性树种在园林景观配置中应处于群落的下层，适宜做庭院绿化树种；樟树对阴性环境也具有一定的耐受力，亦属于阴性植物。杧果、铁冬青对林下荫蔽环境适应性不强，对光照环境有一定的适应性，但也不能适应光线较强的环境，属于中性偏阴植物，适宜作行道树、庭院绿化树或绿篱；糖胶树、木油桐、枫香和仪花光补偿点高（> 18 $\mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$），同时光饱和点也较高，均能够适应较强的光照环境，属于阳性植物，在园林景观配置中应处于群落的上层，可作庭院风景树和行道树。

植物固碳释氧能力受到多种因素的影响，而植物自身和外界环境则是最受关注的影响因素。本研究中广州地区9种树种幼苗的单位叶面积固碳量和释氧量分别为6.25~11.93、4.55~8.68 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$。各树种幼苗的单位叶面积固碳释氧量存在较大差异且结果偏低，这可能与供试苗木较小、试验中综合考虑了叶幕阴阳两面的叶片以及植物的生长环境等因素有关。各树种幼苗的单位绿化面积固碳量和释氧量分别为1.87~10.37、1.33~7.54 $g \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$，以单位绿化面积固碳量作为衡量各树种苗木吸收$CO_2$能力的特征向量进行聚类分析，得出单位绿化面积固碳量较高的有铁冬青、枫香、假苹婆、糖胶树，中等的为仪花、樟树，较低的有杧果、木油桐、鱼尾葵。研究表明，叶面积指数是决定单位绿化面积植物固碳释氧量的重要因素[21]，糖胶树、假苹婆的单位绿化面积日固碳释氧量较其他树种都要高，因为其叶片面积远大于其他供试苗木。园林绿化树种选择时应综合考虑植物的光合特性、固碳释氧效益及景观效益，枫香、糖胶树、假苹婆和铁冬青具有较强的资源利用能力，可能适应的生境较广，可作为广州地区树种配置的优选乔木树种。杧果、仪花、木油桐等具有季相等特殊观赏性的植物可作为观赏树种在时空上进行搭配。通过植物的形态、质感以及色彩呈现出既统一又富于变化的景观效果，在满足生态学功能的同时体现艺术美[22]。

参考文献

[1] 王敏,宋昊洋.影响碳中和的城市绿地空间特征与精细化管控实施框架[J].风景园林,2022,29(5):17-23.

[2] 苏泳娴,黄光庆,陈修治,等.广州市城区公园对周边环境的降温效应[J].生态学报,2010,30(18):4905-4918.

[3] LOVELL S T, JOHNSTON D M. Creating Multifunctional Landscapes: How can the field of ecology inform the design of the landscape?[J]. Frontiers in ecology and the environment, 2009,7(4):175-228.

[4] SHARIFI E, LARBI M, OMRANY H, et al. Climate change adaptation and carbon emissions in green urban spaces: Case study of Adelaide[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254(C) : 120035.

[5] SHILONG P, JINGYUN F, PHILIPPE C, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. Nature, 2009,458(7241).

[6] 李娟霞,田青.兰州市6种园林植物叶片形态和光合生理特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2022,50(1):72-80.

[7] 王卓敏,左焕焕,薛立,等. 七种园林植物光合生理特性研究[J]. 湖南林业科技,2016,43(6):26-29.

[8] ZHANG J J, ZHU L, ZHANG X, et al. Photosynthetic performance and growth responses of *Liriope muscari* (Decne.) L.H. Bailey (Asparagaceae) to different levels of irradiance in three seasons[J]. Flora, 2021, 278(prepublish) .

[9] 许容榕,王卓敏,薛立. 淹水胁迫对3种园林植物幼苗光合特性的影响[J]. 亚热带植物科学,2017,46(1):15-19.

[10] 蔡金桓,都成林,薛立,等. 盐胁迫对4种园林植物光合特性的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2017,37(2):30-34.

[11] 宋卓琴,康红梅,牛艳,等. 太原市主要园林植物春季固碳释氧和降温增湿效应[J]. 山西农业科学,2018,46(10):1685-1690;1729.

[12] 莫亚鹰,余金良,黎念林,等. 九种木兰科常绿树种的光合与固碳特性研究[J]. 北方园艺,2016(17):82-86.

[13] 叶子飘,胡文海,闫小红,等. 基于光响应机理模型的不同植物光合特性[J]. 生态学杂志,2016,35(9):2544-2552.

[14] LIU Q, XIE L, DONG L, et al. Dynamic simulation of the multilayer crown net photosynthetic rate and determination of the functional crown for larch (*Larix olgensis*) trees[J]. New Forests, 2021, 52(6) : 1-25.

[15] 陈雪梅,廖怡,张育恺,等.遮阴处理对金蒲桃生长量及光合参数的影响[J].林业与环境科学,2017,33(2):77-80.

[16] 赵洪贤,张洋军,徐铭泽,等. 油蒿叶片氮分配对其最大净光合速率季节变异的影响[J]. 生态学报,2022,42(17):7156-7166.

[17] 刘文艳,刘春方,滕瑞敏,等. 茶树生物钟基因CsCCA1的鉴定及对光合特性的影响[J]. 植物生理学报,2022,58(3):554-564.

[18] 黄伟燕,冯志坚.光照强度对赤桐生长及光合特性的影响[J].林业与环境科学,2020,36(4):96-101.

[19] 王海珍,韩路,徐雅丽,等. 干旱胁迫下胡杨光合光响应过程模拟与模型比较[J]. 生态学报,2017,37(7):2315-2324.

[20] BENNETT D I G, FLEMING G R, AMARNATH K. A multiscale model of Photosynthesis[J]. Biophysical Journal, 2018, 114(3) .

[21] 李琬婷,杨艺宁,程小毛,等. 昆明市16种道路绿化树种秋季固碳释氧能力研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学),2018,38(4):76-82.

[22] 徐承凤. 植物景观在城市景观设计中的美学功能[J]. 植物学报,2022,57(3):405-406.

林业与环境科学
FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
（双月刊，1985 年创刊）
第 39 卷 第 2 期 2023 年 4 月 20 日
主管单位　广东省林业局
主办单位　广东省林学会
　　广东省林业科学研究院
协办单位　广东省林业调查规划院
　　广东生态工程职业学院
编辑出版　林业与环境科学编辑部
　　地址：广州市天河区广汕一路 233 号
　　邮编：510520
　　电话：020-87028081
　　邮箱：gdly@sinogaf.cn
　　http://sci.sinogaf.cn/gfst/ch/index.aspx
印　　刷　广州永祥印务有限公司
发行订购　林业与环境科学编辑部
发行范围　公开发行
广告发布登记通知书编号　440000100120

FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
(Bimonthly, Started in 1985)
Vol.39 No.2 Apr. 20, 2023
Administered by Forestry Department of Guangdong Province
Sponsored by Forestry Society of Guangdong Province
　　Guangdong Academy of Forestry
Edited &Published by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
　Add: No.233 Guangshan 1st Rd., Tianhe District,
　　Guangzhou510520, China
　Tel: 020-87028081
　E-mail: gdly@sinogaf.cn
　http://sci.sinogaf.cn/gfst/ch/index.aspx
Printed by Guangzhou Yongxiang Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
Distributed Limits: Openly Published and Distributed

国内定价：20.00 元 / 册，120.00 元 / 年
ISSN 2096-2053

ISSN 2096－2053
CN　44－1723/S

3.2.广东云开山国家级自然保护区人为干扰对环境土壤理化性质的影响

林业与环境科学
Forestry and Environmental Science
2023年4月第39卷第2期

目　次

广东云开山国家级自然保护区人为干扰对环境土壤理化性质的影响*

区卓贤　汪子雨　冼丽铧　朱铧楠　陈红跃
（华南农业大学 林学与风景园林学院，广东 广州 510642）

摘要　人为干扰已经成为影响自然保护区自然生态系统的最主要的干扰因素之一。在广东云开山国家级自然保护区选取数量多、影响范围广的受种植、道路、风电以及坟墓等 4 个干扰类型的土壤为研究对象，研究人为干扰下土壤环境的变化，测定其土壤理化性质特征。结果表明：土壤毛管持水量和毛管持水率呈正相关性，坟墓干扰下样地的毛管持水性最好；土壤总孔隙度变动与土壤容重变动呈现反比例关系。坟墓干扰下的环境土壤稀松、结构性较好，风电干扰下的环境土壤结构性较差，土壤持水性表现较差。全氮和碱解氮这两个指标呈现出一致的趋势，两者总体表现为对照点＞干扰点，其中坟墓干扰＞种植干扰＞风电干扰＞道路干扰。有效磷与全磷指标表现出正相关规律，但规律不显著，其中对照点＞干扰点。

关键词　自然保护区；人为干扰；土壤理化性质；生态退化
中图分类号：X53　**文献标志码**：A　**文章编号**：2096-2053(2023)02-0037-09

Effects of Human Disturbance on Soil Physiochemical Properties in Yunkaishan National Nature Reserve, Guangdong Province

OU Zhuoxian　WANG Ziyu　XIAN Lihua
ZHU Huanan　CHEN Hongyue
(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China)

Abstract　Human disturbance has become one of the most important factors affecting the natural ecosystem of nature reserves. In this study, a large number of soils disturbed by planting, road, wind power, and tomb interference were selected in Guangdong Yunkaishan National Nature Reserve as the research objects. In order to study the changes of soil environment under human disturbance, the soil physiochemical properties were determined. The results showed that: there was a significant positive correlation between soil capillary water holding capacity and capillary water holding rate, and the capillary water holding capacity of the sample plot of tomb disturbance was the best. The change in soil total porosity was inversely proportional to the change in soil bulk density. The environmental soil under the interference of tombs was loose and structurally good, while the environmental soil under the interference of wind power was structurally poor and the soil water holding capacity was poor. The two indicators of total nitrogen and alkali-hydrolyzable nitrogen showed a consistent trend. The overall performance of the two was control point > interference point, in which grave interference > planting interference > wind power interference > road interference. Available phosphorus and total phosphorus index

* **基金项目**：广东省林业局项目 (4400-F220050、4400-F21095)。
第一作者：区卓贤（1995—），男，主要从事林业调查和规划设计研究，E-mail：986486867@qq.com。
通信作者：冼丽铧（1987—），女，实验师，主要从事园林植物与生态研究，E-mail：xianlihua@scau.edu.cn。

showed a certain degree of positive correlation, but the variation was not obvious, the control point > interference point.

Key words Nature Reserve；human interference；soil physiochemical properties；ecological degradation

人类活动是自然生态系统环境发展的重要推动力[1-2]，而随着人类发展进程的加快，生态系统环境退化和生态危机已是常势[3]。近年来，由于人类经济社会的发展，人口的急极速增长以及人类活动范围的不断扩大，给生态系统造成了许多负面的干扰，人为干扰也已经成为影响自然生态系统的主要因素之一。人类活动及其对生态系统的干扰影响，是地理学、生态学和自然资源学等多领域的重点探讨课题[4]。不同方式或不同强度的人类活动所引起的区域生态系统演变不同，其影响程度也有较大的差别。根据HDI评价体系评估来看，2005年以来，全国各级自然保护区的人为干扰强度都呈增加趋势，国家自然保护区增幅最大，达到较低人为干扰强度（HDI_i=21~30），省级自然保护区一直为较低人为干扰强度（HDI_i=21~30），县级自然保护区已处于中度人为干扰强度（HDI_i=31~40）[5]。土壤物理特性对森林植被的生长发育起着十分关键的作用，土壤的密度和孔隙度的大小影响着土壤的持水和溶解矿质元素性能，也直接影响着植物的扎根情况和根系的吸水能力，进而直接影响土壤肥力状况和植物的生长。

广东云开山国家级自然保护区地处中国广东西南部，保护区粤西第一高峰大田顶的所在地，是粤西乃至华南地区的重要生态屏障，对维系区域生态系统平衡和生物多样性稳定、促进地区社会经济稳定发展具有重要的战略意义。人类不合理的开发利用都会对自然保护区的生态系统产生胁迫，从而加速生态环境的恶化[6-7]。因此，了解不同人为干扰类型对环境的影响对于提高保护区对环境的保护成效具有重要意义。本研究在对保护区环境的考察基础上，研究森林土壤理化性质，探讨人为干扰对自然保护区土壤退化影响，旨在为广东云开山国家级自然保护区的生态建设提供有针对性的保护工作策略。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

根据《广东云开山国家级自然保护区总体规划》可知，广东云开山国家级自然保护区位于云开山脉腹地，范围包括了信宜市的甘州区大成学校、钱排、合水，和高州市的深镇、马贵、古丁共6个镇，地理坐标范围为东经111°08'17"~111°23'32"、北纬22°14'4"~22°21'21"之间，总面积为12 538.48 hm^2。保护区地形以山区地形为主，地形一般是中间高，四周较低，山地一般陡峭，坡度多在30°~45°左右，境内有粤西的第一山峰大田顶，海拔为1 704 m。

1.2 样点建立

根据卫星影像图片，在人类活动范围内，对遭受人为干扰严重的生态环境进行详细调研，发现退化严重的生态环境大多分布于交通道路、种植园、坟墓以及风力发电机周边，结合保护区管理处提供的资料，本研究选择了道路干扰、种植干扰、坟墓干扰以及风电干扰这4个人为干扰类型下的生态环境作为研究对象。

样点的设置从干扰类型以及环境退化程度两个角度出发，在4个人为干扰类型下的生态环境中初步筛选出30个保护区内覆盖试验区、缓冲区以及核心区的干扰点，根据初步确定的30个干扰点，基于干扰范围广、干扰强度强以及环境退化程度高的生态环境，每个干扰类型下筛选出3个干扰点，总共选择了12个干扰点，在每个干扰点内选择人为干扰情况最为严重的区域设置样地。

为了能够更直白对比出人为干扰对生态环境的退化影响，为对应的干扰点设置对照点。为确保对照点与干扰点的海拔、坡度、坡向等不受人为干扰影响的环境因素处于一个不会对研究指标影响的范围内，确保对照点的植物群落、土壤环境等易受人为干扰影响的环境因素与干扰点原始的环境因素一致，结合保护区提供的环境历史资料以及前期调研结果，在干扰点周边未受人为干扰的生态环境中选择对应合适的对照点，在对照点内设置样地并在对照点内调研采集相应的研究指标数据，最大程度保证干扰点与对照点的环境差异的影响因素来自人为干扰。

干扰点以及相应的对照点共24个，样点的布设如表1。

表 1 样点布设情况

Table 1 Sample Point Layout

序号 Number	干扰点名称 Interference Point Name	海拔 / m Elevation	经纬度 Longitude and Latitude	退化程度 Degree of Degradation	坡度 / ° Gradient	坡向 Slope Aspect	坡位 Slope Position
1	道路干扰—干扰点 1	700	E111°18'21"，N22°18'36" ~E11°18'01"，N22°17'56"	高	—	—	—
2	道路干扰—干扰点 2	950	E111°16'51"，N22°17'34" ~E111°16'23"，22°17'20"	高	—	—	—
3	道路干扰—干扰点 3	978	E111°16'16"，N22°17'19" ~E111°15'23"，22°16'43"	高	—	—	—
4	道路干扰—对照点 1	694	E111°17'53"，N22°18'05"	无	—	—	—
5	道路干扰—对照点 2	962	E111°16'39"，N22°17'26"	无	—	—	—
6	道路干扰—对照点 3	983	E111°15'46"，N22°17'03"	无	—	—	—
7	坟墓干扰—干扰点 1	1 489	E111°14'40"，N22°20'01"	高	15	南	中
8	坟墓干扰—干扰点 2	1 490	E111°14'35"，N22°20'04"	高	33	西南	中
9	坟墓干扰—干扰点 3	1 123	E111°16'08"，N22°18'22"	高	6	南	中
10	坟墓干扰—对照点 1	1 485	E111°14'35"，N22°19'59"	无	15	南	中
11	坟墓干扰—对照点 2	1 486	E111°14'31"，N22°20'03"	无	30	西南	中
12	坟墓干扰—对照点 3	1 132	E111°16'04"，N22°18'19"	无	5	南	中
13	风电干扰—干扰点 1	1 376	E111°15'26"，N22°19'26"	高	13	西南	上
14	风电干扰—干扰点 2	1 567	E111°14'51"，N22°19'40"	高	7	东南	上
15	风电干扰—干扰点 3	1 584	E111°14'45"，N22°19'51"	高	7	西南	上
16	风电干扰—对照点 1	1 358	E111°15'17"，N22°19'27"	无	15	西南	上
17	风电干扰—对照点 2	1 560	E111°14'48"，N22°19'37"	无	7	东南	上
18	风电干扰—对照点 3	1 530	E111°14'46"，N22°19'55"	无	6	西南	上
19	种植干扰—干扰点 1	930	E111°17'01"，N22°17'57"	高	35	东南	下
20	种植干扰—干扰点 2	796	E111°17'08"，N22°17'47"	高	32	南	中
21	种植干扰—干扰点 3	1 042	E111°15'06"，N22°16'28"	高	15	东南	下
22	种植干扰—对照点 1	957	E111°16'53"，N22°17'58"	无	20	南	下
23	种植干扰—对照点 2	800	E111°17'14"，N22°17'54"	无	28	南	中
24	种植干扰—对照点 3	1 040	E111°15'09"，N22°16'23"	无	18	东南	下

注：表中横线表示无数据。

Note: Horizontal lines in the table indicate no data.

1.3 土壤理化性质测定

在样地范围内取表面 0~20 cm 土层深度的容重，每个样地各取 3 次重复，从 0~20 cm 层厚的土样中收集，并将其混合成 1kg 的样品，用清洁的密封容器装好，贴上标签，带回实验室测定。使用烘干法测定土壤自然含水量；用环刀法测定土壤容重、土壤毛管孔隙度、非毛管孔隙度、总孔隙度等指标[8]。pH 值测定采用 1:2.5 土水比浸提酸度计法；有机质测定采用重铬酸钾外加热容量法；全氮使用凯氏定氮法进行测定；全磷采用 NaOH 熔融 - 钼锑抗比色法；碱解氮使用碱解蒸馏法进行测定；有效磷采用 Olsen 法进行测定；速效钾则是使用乙酸铵浸提 - 火焰光度计法进行测定[9]。

1.4 数据统计方法

运用软件 Microsoft Excel 2010 对数据进行统计处理。用 SPSS 24 软件进单因素方差分析以及 Duncan 多重比较法分析，比较不同样地间同一测定指标的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤物理性质比较

2.1.1 土壤自然含水量、土壤容重 土壤自然含水量的大小与土壤的蓄水能力存在紧密的关系。由图 1 可以看出，道路干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤自然含水量有差异但是并不显著，坟墓干扰与风电干扰下的干扰点与对照点的土壤自然含水量存在显著差异。道路干扰、坟墓

干扰与风电干扰之间存在显著差异；坟墓干扰与种植干扰之间存在差异但并不显著；风电干扰与种植干扰之间存在差异但并不显著。道路干扰分别与风电干扰和种植干扰之间存在显著差异；坟墓干扰分别与风电干扰和种植之间存在显著差异；道路干扰与坟墓干扰之间存在差异但并不显著；风电干扰与种植干扰之间存在差异但并不显著。

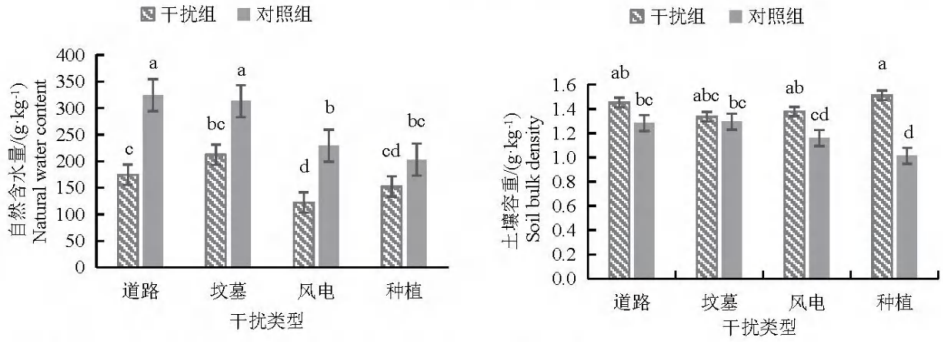
土壤容重的高低体现的是土壤的质地、结构和有机质含量等综合物理状况的好坏。由图1可以看出，道路干扰与坟墓干扰下的干扰点与对照点的土壤容重之间存在差异但并不显著，风电干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤容重之间存在显著差异。种植干扰分别与道路干扰和坟墓干扰之间存在显著差异；道路干扰、坟墓干扰与风电干扰之间存在差异但并不显著。道路干扰与种植干扰下的干扰点在土壤自然含水量指标上表现最差，在土壤容重指标上表现最好；不同人为干扰类型的对照点之间，种植干扰与风电干扰的对照点在土壤自然含水量指标上表现最好，在土壤容重指标上表现最差。

2.1.2 土壤毛管持水量、土壤毛管持水率 由图2可以看出，道路干扰、风电干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管持水量之间存在显著差异，坟墓干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管持水量之间存在差异但并不显著。不同干扰点的土壤毛管持水量之间存在差异但并不显著。

由图2可以看出，坟墓干扰、风电干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管持水率之间存在显著差异，道路干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管持水率之间存在差异但并不显著。道路干扰与其他人为干扰下的土壤毛管持水率之间存在显著差异；坟墓干扰、风电干扰与种植干扰下的干扰点的土壤毛管持水率之间存在差异但并不显著。土壤毛管持水率指标的变化与土壤毛管持水量基本一致，说明土壤毛管持水量与毛管持水率结果具有一致性。

2.1.3 土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度、土壤非毛管孔隙度 土壤总孔隙度是土壤的孔隙容积占土体容积的百分比，而土壤毛管孔隙的大小、总量和分布状况，影响到土壤的通气性能、透水性能，也是直接决定了土壤的保持水分能力的主要原因。由图3可以看出，风电干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤总孔隙度之间存在显著差异，道路干扰与坟墓干扰下的干扰点与对照点的土壤总孔隙度之间存在差异但并不显著。种植干扰分别与道路干扰和坟墓干扰存在显著差异；道路干扰、坟墓干扰与风电干扰之间存在差异并不显著；种植干扰与风电干扰之间存在差异但并不显著。

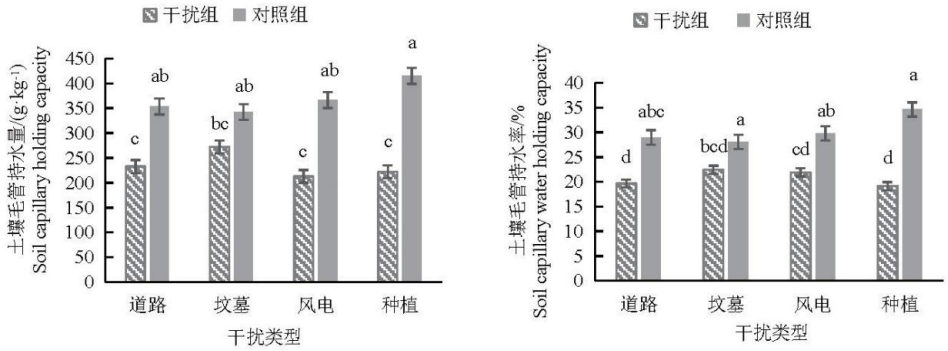
由图3可以看出，道路干扰、风电干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管孔隙度之间存在显著差异；坟墓干扰下的干扰点与对照点的土壤毛管孔隙度之间存在差异但并不显著。不同人为干扰类型下的对照点的土壤毛管孔隙度之



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图1 不同人为干扰下土壤自然含水量与土壤容重比较

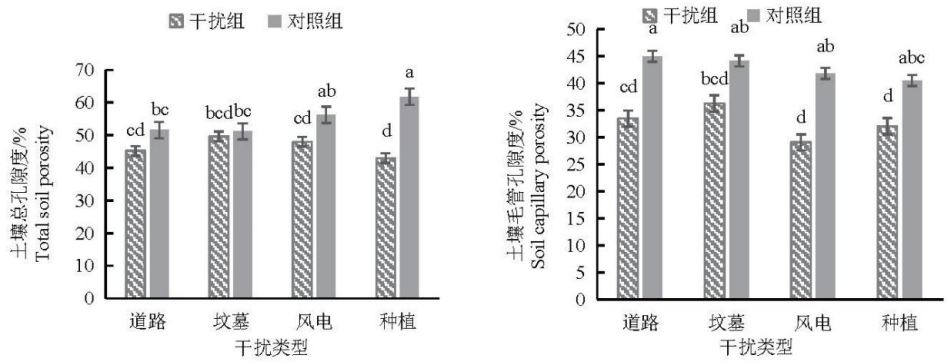
Fig. 1 Comparison of natural soil water content and soil bulk density under different human disturbances



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图 2 不同人为干扰下土壤毛管持水量与土壤毛管持水率比较

Fig. 2 Comparison of soil capillary water holding capacity and soil capillary water holding rate under different human interference disturbance



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图 3 不同人为干扰下土壤总孔隙度与土壤毛管孔隙度比较

Fig. 3 Comparison of soil total porosity and soil capillary porosity under different human disturbances

间存在差异但并不显著。由图 4 可以看出，种植干扰下的干扰点与对照点的土壤非毛管孔隙度之间存在显著差异；道路干扰、坟墓干扰与风电干扰下的干扰点与对照点的土壤非毛管孔隙度之间存在差异但并不显著。种植干扰与风电干扰下的干扰点的土壤非毛管孔隙度之间存在显著差异。不同人为干扰下的对照点的土壤非毛管孔隙度之间，种植干扰、道路干扰与坟墓干扰下的对照点的土壤非毛管孔隙度之间存在显著差异。

2.1.4 土壤通气孔隙度　土壤通气孔隙度是指在一定水势或含水量的条件下，单位土壤总容积中空气所占的孔隙容积。由图 4 可以看出，坟墓干扰与种植干扰下的干扰点与对照点的土壤通气孔隙度之间存在显著差异，道路干扰与风电干扰下的干扰点与对照点的土壤通气孔隙度之间存在差异但并不显著。不同人为干扰下的干扰点的土壤通

气孔隙度之间，风电干扰与道路干扰下的干扰点的土壤通气孔隙度之间存在显著差异；种植干扰下的干扰点的土壤通气孔隙度分别与道路干扰以及坟墓干扰下的干扰点的土壤通气孔隙度之间存在显著差异。不同人为干扰下的对照点的土壤通气孔隙度之间，风电干扰下的对照点的土壤通气孔隙度分别与道路干扰、坟墓干扰下的对照点的土壤通气孔隙度存在显著差异。

2.2 土壤化学性质比较

2.2.1 土壤pH值 由图5可以看出，不同干扰下的干扰点与对照点的土壤pH值之间存在差异但并不显著；不同干扰下的干扰点的土壤pH值之间存在差异但并不显著；不同干扰下的对照点的土壤酸碱度之间存在差异但并不显著。

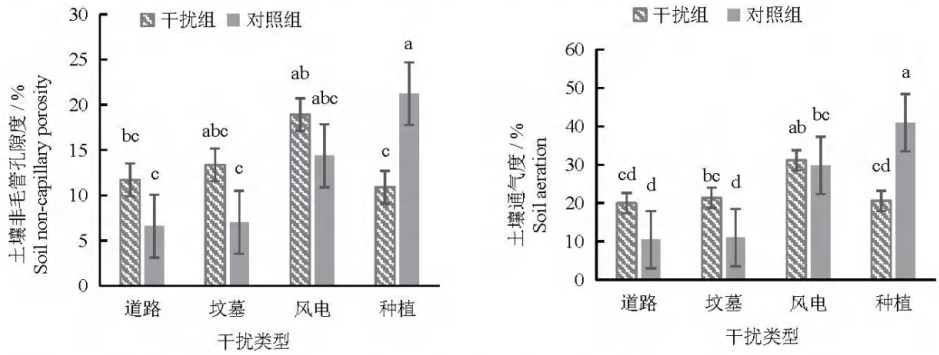
2.2.2 土壤有机质 土壤有机质包括了土壤中的各种动、植物残体，微生物及其分解和合成的各种有机物质在内的以各种形式存在于土壤中的所有碳质有机物。由图5可以看出，不同人为干扰下的干扰点与对照点的土壤有机质含量之间存在显著差异。不同人为干扰下的对照点的土壤有机质含量之间，风电干扰与其他类型人为干扰下的对照点存在显著差异。

2.2.3 全氮、碱解氮 土壤全氮含量处于动态变化之中，土壤中氮的积累和消耗程度决定了全氮的含量，尤其是取决于土壤有机质的生物积累和水解作用。由图6可以看出，道路干扰与风电干扰下的干扰点与对照点的土壤全氮含量之间存在显著差异。不同人为干扰下的对照点的土壤全氮含量之间，风电干扰下的对照点的土壤全氮含量与其他类型的人为干扰下的对照点之间存在显著差异。

由图6可以看出，道路干扰、坟墓干扰与风电干扰下的干扰点与对照点的土壤碱解氮含量之间存在显著差异，种植干扰下的干扰点与对照点的土壤碱解氮含量之间存在差异但并不显著。不同人为干扰下的对照点的土壤碱解氮含量之间，风电干扰下的对照点的土壤碱解氮含量分别与种植干扰以及道路干扰下的对照点的土壤碱解氮含量之间存在显著差异。碱解氮指标与全氮指标的表现趋势一致。

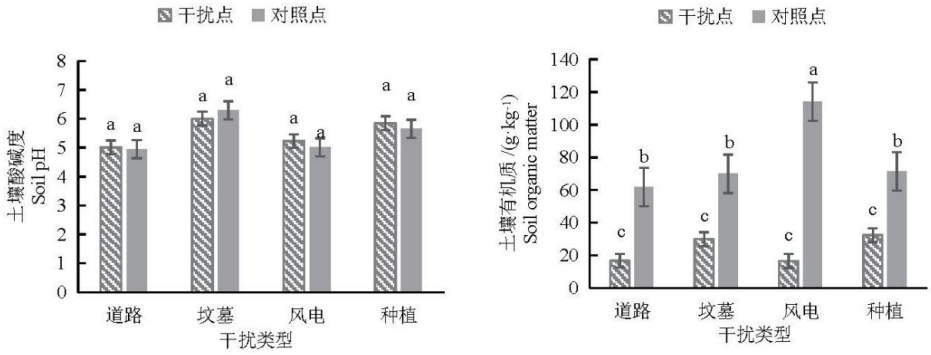
2.2.4 土壤全磷、有效磷 土壤中的磷素大部分是以迟效性状态存在，土壤全磷含量并不能作为土壤磷素供应的指标。由图7可以看出，不同人为干扰下的干扰点与对照点的土壤全磷含量之间存在差异但并不显著；各个干扰点的土壤全磷含量之间存在差异但并不显著；各个对照点的土壤全磷含量之间存在差异但并不显著。

有效磷是土壤中可被植物吸收利用的磷的总称，它包括全部水溶性磷、部分吸附态磷和微溶性的无机磷和易矿化的有机磷等，是土壤磷素供应的重要指标之一。由图7可以看出，不同人为干扰下的干扰点与对照点的土壤有效磷含量之间存在显著差异。不同人为干扰下的干扰点的土壤有效磷含量之间，种植干扰下的干扰点的土壤有



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表之间的差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

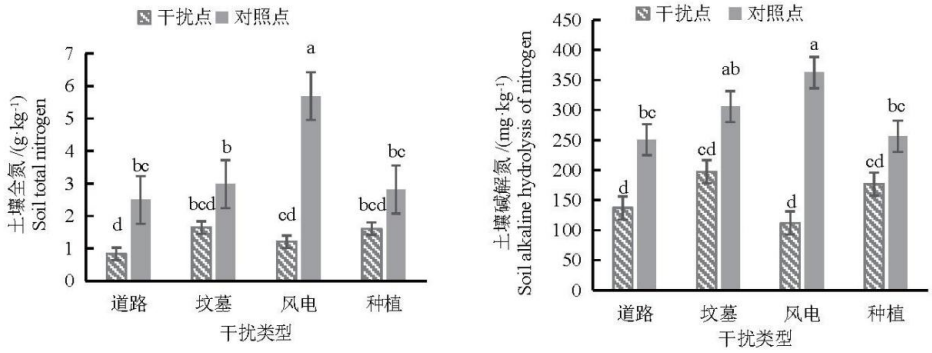
图4 不同人为干扰下土壤非毛管孔隙度与土壤通气孔隙度比较
Fig. 4 Comparison of soil non-capillary porosity and soil aeration porosity under different anthropogenic interference



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图 5 不同人为干扰下土壤酸碱度与土壤有机质比较

Fig. 5 Comparison of soil pH and soil organic matter under different human disturbances



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

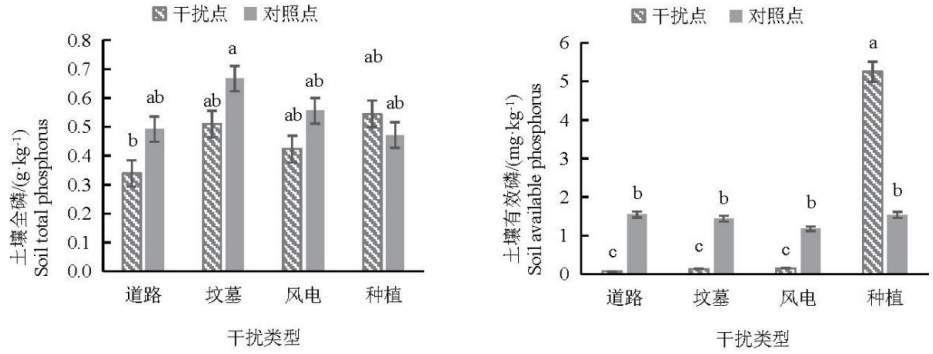
图 6 不同人为干扰下土壤全氮与土壤碱解氮比较

Fig. 6 Comparison of soil total nitrogen and soil alkaline hydrolyzable nitrogen under different human interference

效磷含量与其他人为干扰下的干扰点的土壤有效磷含量之间存在显著差异。有效磷与全磷指标表现出一定程度的正相关规律。

2.2.5 土壤全钾、速效钾 土壤全钾是土壤中含有的全部钾，包括交换性钾、非交换性钾、水溶性钾和结构态钾等，全钾仅反映了土壤钾素的总储量，其中 90%~98% 在相当长时间内是无效的，因此需要结合速效钾指标分析。由图 8 可以看出，风电干扰下的干扰点与对照点的土壤全钾含量之间存在显著差异，其余人为干扰类型下的干扰点与对照点之间存在差异但并不显著。不同人为干扰类型下的干扰点的土壤全钾含量之间，风电干扰与道路干扰下的干扰点的土壤全钾含量之间存在显著差异。

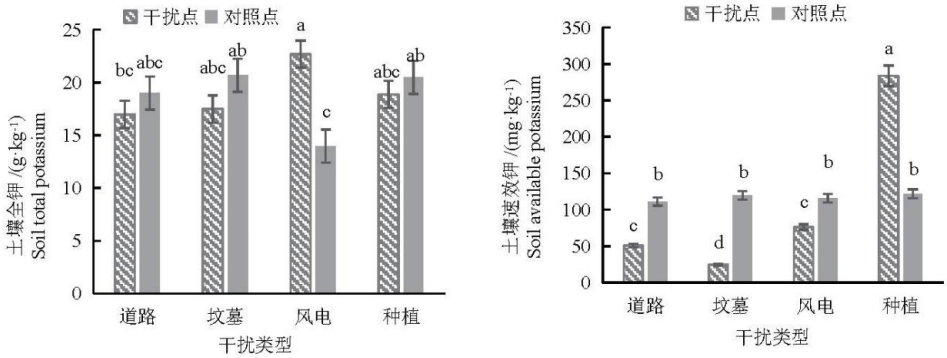
速效钾是土壤中易被作物吸收利用的钾素，是表征土壤钾素供应状况的重要指标之一，它包括土壤溶液钾及土壤交换性钾。由图 8 可以看出，不同人为干扰类型下的干扰点与对照点的土壤速效钾含量指标存在显著差异。不同人为干扰类型下的干扰点的土壤速效钾含量之间，道路干扰与风电干扰下的干扰点的土壤速效钾含量之间存在差异但并不显著，坟墓干扰、种植干扰与其余人



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图 7 不同人为干扰下土壤全磷与土壤有效磷比较

Fig. 7 Comparison of soil total phosphorus and soil available phosphorus under different human interference



注：图为均值 ± 标准误差；图中各系列内的不同字母代表之间的差异显著（$P<0.05$）。
Note: The datas are mean ± standard error; the different letters in each sevies represent significant differences($P<0.05$).

图 8 不同人为干扰下土壤全钾与土壤速效钾比较

Fig. 8 Comparison of soil total potassium and soil available potassium under different human interference

为干扰类型下的干扰点的土壤速效钾含量之间存在显著差异。

3 结论与讨论

在土壤物理性质方面，土壤毛管持水量和毛管持水率呈现明显的正相关性，毛管持水量高的样地，毛管持水量也表现好；总体表现来说，对照点＞干扰点；从干扰点的角度来看，坟墓干扰下的样地的毛管持水性最好，其余人为干扰类型下的样地的毛管持水性表现最差。土壤总孔隙度变动与土壤容重变动呈现不显著的反比例关系。总孔隙度变动与土壤容重之间的变化规律符合郭业先[10]等研究中容重越大通气性越小的规律。总体来说，对照点的样地在土壤物理性质上的表现最好，干扰点的样地表现较差。坟墓干扰的样地土壤总孔隙度、土壤毛管孔隙度最高、土壤通气孔隙度也较高、土壤非毛管孔隙度较小，土壤容重较小，说明土壤稀松、结构性较好；风电干扰下的干扰点的样地土壤总孔隙度和土壤通气孔隙度虽然偏高，但土壤非毛管孔隙度高，毛管孔隙度小，说明土壤结构性较差，土壤持水性表现较差，符合谢嘉炜[11]等研究中风电场周边土壤容重

显著升高、持水量显著降低、孔隙度显著减小的研究结果。土壤孔隙与土壤通气、持水性之间的变化规律符合 Badalucco 等[12]研究中土壤的孔隙状况（大小、数量和分布）与土壤通气、透水性之间的变化规律。土壤物理性质数据对比结果没有显示出张庆费等[13]研究的浙江天童森林公园植物群落演替对土壤物理性质的影响结果表明土壤含水量、土壤最大持水量、毛管持水量和最小持水量在群落演替中有显著的增长趋势。李民义[14]，张晓霞[15]等在晋西黄土区所探讨的对不同土地利用方式以及不同时间尺度的变化导致的土壤物理性质的变化；Lan 等[16]对天津滨海区域的不同城市绿地研究中的土壤物理性质变化规律，可能的原因是并没有对样地土壤理化性质进行长时间的追踪监测。但是土壤物理性质数据对比总体表现符合 Jing 等[17]研究中良好的土壤结构应具有适当的孔隙分布，从而协调土壤中的水、肥、气、热，为作物生长创造良好的环境条件的研究成果。

在土壤化学性质方面，全氮和碱解氮两个指标呈现出一致的趋势，两个指标总体表现为对照点＞干扰点；干扰点中的总体表现为，坟墓干扰＞种植干扰＞风电干扰＞道路干扰。有效磷与全磷指标表现出一定程度的正相关规律，但规律不明显。在两个指标的总体表现上，对照点＞干扰点。样地中土壤物理性质和化学性质之间的关系缺乏显著规律性，没有表现出杨晓娟[18]研究的土壤含水量与土壤全氮、全磷、有效磷等指标呈显著负相关，与土壤有机质、全钾含量成显著正相关的规律，可能的原因是不同干扰类型对土壤养分的影响程度差异很大。种植干扰的干扰点样地的有效磷含量远高于其他样地是种植园工人定期施肥导致。在成向荣[19]，刘乐等[20]的研究中不同林分对土壤物理性质的影响也不尽相同；而不同的抚育方式和强度也间接影响着土壤的物理性质，因此对照点的差异表现需要后续加入考虑不同林分的影响继续研究。

参考文献

[1] VITOUSEK P M, MOONEY H A, LUBCHENCO J, et al. Human domination of earth's ecosystems[J].Science, 1997,277(5325):494-499.

[2] BARNOSKY A D, HADLY E A, BASCOMPTE J, et al. Approaching a state shift in earth's biosphere[J]. Nature, 2012,486(7401):52-58.

[3] FOLEY J A, RARMANKUTTY N, BRAUMAN K A, et al. Solutions for a cultivated planet[J].Nature,2011, 478(7369):337-342.

[4] 孙永光,赵冬至,高阳,等.海岸带人类活动强度遥感定量评估方法研究:以广西北海为例[J].海洋环境科学,2014,33(3):407-411.

[5] 周建国,李新旺,胡金明,等.怒江流域云南段生物多样性保护地人为干扰分析[J].热带地理,2018,38(4):465-474.

[6] 陈美球,蔡海生,黄觀.鄱阳湖区生态环境自然脆弱性综合评价[J].中国生态农业学报,2005(4):181-183.

[7] 柯周荣.东莞市银瓶山森林公园蝴蝶谷的生态化营建[J].林业勘查设计,2019,48(4):53-56.

[8] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海：上海科学技术出版社,1978.

[9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社，2000.

[10] 郭业先,柳军,杨绍伟,等.广宁红花油茶林土壤理化性质、植物养分初步研究[J].林业与环境科学,2020,36(6):52-57.

[11] 谢嘉炜,魏龙,肖石红,等.连州风电场对周边土壤物理性质的影响[J].林业与环境科学,2021,37(4):40-45.

[12] BADALUCCO L, DE CESARE F, GREGO S, et al. Do physical properties of soil affect chloroform efficiency in lysing microbial biomass?[J].Soil Biologyand Biochemistry,1997,29(7):1135-1142.

[13] 张庆费,由文辉,宋永昌.浙江天童植物群落演替对土壤化学性质的影响[J].应用生态学报,1999(1):21-24.

[14] 李民义,张建军,王春香,等.晋西黄土区不同土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2013,27(3):125-130.

[15] 张晓霞,杨宗儒,查同刚,等.晋西黄土区退耕还林22年后林地土壤物理性质的变化[J].生态学报,2017,37(2):416-424.

[16] LAN T, GUO S, HAN J, et al. Evaluation of physical properties of typical urban green space soils in Binhai Area, Tianjin, China[J].Urban Forestry & Urban Greening,2019,44:126430.

[17] JING Z, WANG J, WANG R, et al. Using multi-fractal analysis to characterize the variability of soil physical properties in subsided land in coal-mined area[J].Geoderma,2020,361:114054.

[18] 杨晓娟.东北长白山系低山丘陵区不同林分土壤肥力质量研究[D].北京:北京林业大学,2013.

[19] 成向荣,冯利,虞木奎,等.间伐对生态公益林冠层结构及土壤养分的影响[J].生态环境学报,2010,19(2):355-359.

[20] 刘乐,王新杰,王廷蓉,等.皆伐与不同迹地清理方式对杉木林土壤物理性质的影响[J].中南林业科技大学学报,2016,36(7):55-59.

林业与环境科学
FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
（双月刊，1985 年创刊）
第 39 卷 第 2 期 2023 年 4 月 20 日
主管单位　广东省林业局
主办单位　广东省林学会
　　广东省林业科学研究院
协办单位　广东省林业调查规划院
　　广东生态工程职业学院
编辑出版　林业与环境科学编辑部
　　地址：广州市天河区广汕一路 233 号
　　邮编：510520
　　电话：020-87028081
　　邮箱：gdly@sinogaf.cn
　　http://sci.sinogaf.cn/gfst/ch/index.aspx
印　　刷　广州永祥印务有限公司
发行订购　林业与环境科学编辑部
发行范围　公开发行
广告发布登记通知书编号　440000100120

FORESTRY AND ENVIRONMENTAL SCIENCE
(Bimonthly, Started in 1985)
Vol.39 No.2 Apr. 20, 2023
Administered by Forestry Department of Guangdong Province
Sponsored by Forestry Society of Guangdong Province
　　Guangdong Academy of Forestry
Edited &Published by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
　Add: No.233 Guangshan 1st Rd., Tianhe District,
　　Guangzhou510520, China
　Tel: 020-87028081
　E-mail: gdly@sinogaf.cn
　http://sci.sinogaf.cn/gfst/ch/index.aspx
Printed by Guangzhou Yongxiang Printing Co., Ltd.
Distributed by Editorial Office of Forestry and Environmental Science
Distributed Limits: Openly Published and Distributed

国内定价：20.00 元 / 册，120.00 元 / 年
ISSN 2096-2053

ISSN 2096－2053
CN　44－1723/S

3.3.北京与广州城市公园花境植物应用调查研究

廣東園林
Guangdong Landscape Architecture
Vol.41/192（双月刊） 2019 年 第 5 期

本刊声明

1. 来稿应适合本刊特点，内容真实，不侵犯他人著作权，篇幅一般不超过 5000 字。请勿一稿多投。
2. 本刊所发文章仅反映作者观点，不代表编委会及编辑部立场，欢迎对本刊所载文章开展学术争鸣。
3. 本刊编辑部在收稿后 4 个月后未通知者，作者可自行处理。编辑部对来稿有合理修改与删节权，作者如不同意，务须说明。所有来稿一律不退，请作者自留底稿。
4. 本刊已全文收录于《中国学术期刊（光盘版）》、中文科技期刊数据库（维普网）全文收录期刊 CSTJ、《中国核心期刊（遴选）数据库》、超星期刊域出版平台、龙源期刊网、博看期刊数据库等，作者如不同意，请在投稿时注明，否则视为同意。本刊所付稿酬均包含以上系统发行后的报酬。
5. 投稿邮箱：1146724404@qq.com

广告索引

主管单位：广东省科学技术协会
主办单位：广东园林学会
常务协办单位：广州市林业和园林局

编辑出版：《广东园林》编辑部
地 址：广州市陵园西路1号之四308室
邮政编码：510055
电话（传真）：020-36377332
电子邮箱：1146724404@qq.com
广东园林学会网址：http://www.gdylxh1962.com

编辑部办公室主任：黄晓虹
编 务：朱柳芳 陈 瑜
排 版：广州百彤文化传播有限公司

国内统一连续出版物号：CN44—1219/S
国际标准连续出版物号：ISSN 1671—2641
广告发布登记通知书：440100190032
国内发行：广东省报刊发行局
国内邮发代号：46-331
订 阅：全国各地邮局
国外发行：中国出版对外贸易总公司
国外邮发代号：BM7470
发行范围：国内外发行

制版印刷：广州市人杰彩印厂
出版日期：2019 年 10 月
定 价：25.00 元

刊名题字：秦咢生

JOURNAL OF GUANGDONG LANDSCAPE ARCHITECTURE
CN44—1219/S, ISSN 1671—2641

Sponsor :
GUANGDONG SOCIETY OF LANDSCAPE ARCHITECTURE

Edited by : EDITORIAL DEPARTMENT OF THE CANTONESE LANDSCAPE INSTITUTE'S JOURNAL

Domestic Distributor :
Guangdong Newspaper & Subscription and Distribution Bureau(Mail Code 46-331)

Overseas Distributor :
CHINA NATIONAL PUBLISHING INDUSTRY TRADING CORPORATION

Office Address :
No.1 Lingyuan-xi Road, Guangzhou, 510055, Guangdong, China

Tel & Fax : 0086-20-36377332
E-mail : 1146724404@qq.com
Price : 25 RMB

目次

2019 年第 5 期
Vol.41 总第 192 期

封面 滨湖公园 | 何如洲摄
封底 霞湖公园 | 张月明摄
插一～插十 魅力湛江——宜居宜业宜游生态海湾绿城 图 / 文 湛江市城市管理和综合执法局

CONTENTS

北京与广州城市公园花境植物应用调查研究

Application of Flower Border Plants in City Parks in Beijing and Guangzhou

陈思婕　翁殊斐　冼丽铧*
CHEN Si-jie, WENG Shu-fei, XIAN Li-hua*

摘要：植物材料是花境景观效果的基础，花境植物种类多样、色彩丰富、配置灵活，南北城市的花境植物不同，直接影响了其在城市园林植物配置与景观效果。以北京、广州两地各5个效果良好的花境为实例，对比与分析两地花境营造的植物选择、配置与造景效果等，结果表明：调研的北京公园花境植物应用了63种，隶属36科59属，其中常用的有49种；广州公园花境植物应用了71种，隶属40科62属，常用53种；两地共有种16种，隶属14科16属；北京公园花境素雅而富有野趣，广州公园花境精致而色彩斑斓。

关键词：花境；城市公园；植物造景；北京；广州
中图分类号：TU986；S688
文献标志码：A
文章编号：1671-2641(2019)05-0081-05
收稿日期：2019-04-15
修回日期：2019-07-30

Abstract: Plant materials are the basis of the flower border landscape. Flower border plants are diverse, colorful and flexible. Different flower border plants in northern and southern cities directly affect their plant allocation and landscape effect in urban gardens. 5 city parks with nice flower border of Beijing and Guangzhou are selected respectively, so as to compare the flower border of the two cities from three aspects: plant selection, configuration mode and landscape effect. The results show that there are 63 species of floral plants in Beijing parks, belonging to 36 families and 59 genera, of which 49 species are commonly used. And there are 71 species in Guangzhou parks, belonging to 40 families and 62 genera, of which 49 species are commonly used. Among them, 16 species belonging to 14 families and 16 genera are used in Beijing and Guangzhou. Based on the investigation, it is proposed that flower border of Beijing is more inclined to show the wild flavor of rough beauty, simulating natural flower growth, while that of Guangzhou prefers focusing on the color collocation.

Key words: Flower border; City parks; Plant disposition; Beijing; Guangzhou

花境（Flower border）起源于英国，是一种主要由多年生花卉组成，结合花灌木[1]，以观赏为主的种植形式，重在模拟自然界中各种野生花卉交错生长的状态[2]。花境中植物种类多样，配置手法灵活，能够模拟自然生长状态下的植物之美，符合植物景观设计中提倡的生态性原则[3]。花境这一植物景观形式在我国城市绿地中被越来越多地采用，并取得了很好的效果。

然而，花境营造在全国范围内却仍处于发展阶段[4]，虽发展迅速，但整体上还未形成独立成熟的设计语言，缺乏地方特色和个性[5]。华东、华北地区花境的起步较早，重视花境在城市绿地中的推广和对其配置方法与应用的探索[6-7]；近年来，华南地区的园林植物研究者探索了适合当地环境，且能体现岭南地域性特色的花境配置模式[8]。故本文在前人的研究基础上，结合北京（华北地区）和广州（华南地区）两地的花境营造实例，探讨公园花境的植物选择、配置与造景效果，挖掘两地在花境营造上的特色。

1 研究地概况与调查方法

本研究调研时间为2017年9月—2018年1月，基于对北京与广州多处城市公园花境现状的调查，分别选取了5个代表性的城市公园绿地花境进行调研。北京市花境选择了花境效果较好的罗红摄影艺术馆小游园，汇集各地园林精华的北京园博园，富有自然野趣的香山公园，广袤深邃的奥林匹克森林公园，以植物景观为主的北京植物园。广州市的花境选择了造景效果良好的花城广场，空间开阔、现代感较强的海心沙亚运公园，以园林植物造景为主的珠江公园，植物景观质量较高的传祺公园，以湿地景观闻名的海珠湖公园。对两地花境分别

进行植物种类调查与记录，测绘花境植物配置平面图，总结两地花境差异，进而对两地花境的植物选择、配置与造景效果等方面进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 北京与广州公园花境植物种类

2.1.1 两地公园花境植物种类分析

调查结果显示，北京5个具有代表性的公园绿地花境植物共63种，隶属36科59属，从植物应用数量来看，以菊科Compositae、玄参科Scrophulariaceae、禾本科Gramineae、唇形科Labiatae为主。其中，一二年生花卉10种，占总种数的16%，主要有凤仙花*Impatiens balsamina*、三色堇*Viola tricolor*、一串红*Salvia splendens*、白晶菊*Mauranthemum paludosum*、夏堇*Torenia fournieri*等；宿根花卉25种，占40%，主要有马鞭草*Verbena officinalis*、八宝景天（八宝）*Hylotelephium erythrostictum*、细叶美女樱*Glandularia tenera*等；球根花卉2种，占3%，有大丽花*Dahlia pinnata*、萱草*Hemerocallis fulva*等；灌木20种，占32%，仅次于宿根花卉，主要有月季*Rosa chinensis*、桂花*Osmanthus fragrans*、杜鹃*Rhododendron simsii*等。调查中常见种类为49种，应用的宿根花卉较多。

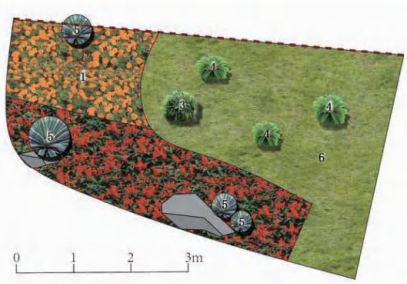
广州公园花境应用的植物共71种，隶属40科62属，从植物应用数量来看，以菊科、千屈菜科Lythraceae、百合科Liliaceae为主。其中，一二年生花卉10种，占14%，主要有鸡冠花*Celosia cristata*、新几内亚凤仙*Impatiens hawkeri*、一串红*Salvia splendens*、千日红*Gomphrena globosa*等；宿根花卉24种，占34%，主要有长春花*Catharanthus roseus*、四季秋海棠*Begonia cucullata*、薰衣草*Lavandula angustifolia*、石竹*Dianthus chinensis*等；球根花卉6种，占8%，主要有朱顶红*Hippeastrum rutilum*、水鬼蕉*Hymenocallis littoralis*等；灌木29种，占41%，主要有簕杜鹃*Bougainvillea glabra*、龙船花*Ixora chinensis*、红背桂*Excoecaria cochinchinensis*等。调查中常见种类为53种，应用的花灌木较多，宿根花卉的占比不如北京高，而一二年生花卉应用的面积较大。

2.1.2 两地公园花境植物色彩分析

花境大多凭借其艳丽的色彩成为人们游园时的视线焦点，花境中观赏植物种类繁多，色彩缤纷，其色彩表现不仅限于植物花朵颜色，叶色、果色等也是花境色彩的来源，特别是一些彩叶植物的巧妙运用，比花朵更能持久地保持花境的色彩美。在色彩搭配时遵循不同的美学原理，则带来迥异的花境风格，满足两地人们的不同欣赏侧重[9]。

从花境植物调查结果可知，北京公园花境的观赏期主要由4月持续至10月。其中春季、夏季开花的有26种，主要有细叶美女樱、金鱼草*Antirrhinum majus*、大丽花、翠雀*Delphinium grandiflorum*、月季等；夏季、秋季开花的有21种，主要有梳黄菊*Euryops pectinatus*、夏堇、八宝、火把莲*Kniphofia uvaria*、醉蝶花*Tarenaya hassleriana*等。花境中颜色运用广泛，红色系占比较大，蓝紫色系花卉次之，除白色系、黄色系花卉外还有丰富的多色花卉。北京公园花境色彩朴素天然，多以深浅不同的绿色为底色，用紫色、橙色、红色、黄色的零星色块点缀（图1~2），使花境不呆板，而呈现出粗犷、利落的色彩风格特点。

为达到最佳的观赏效果，花境的营造体现了一定的色彩配置手法，在突出主体色彩和多色彩混合的基础上，用重复的手法，以加强视觉效果和韵律感，同时又避免杂乱的视觉效果。如北京植物园（图3~4）在选定了黄色孔雀草*Tagetes patula*、粉色八宝和紫色马鞭草的搭配后，将这一色彩搭配在长条形的林缘、路缘重复使用。此外，利用深色调的植被来强化景深，让人感受到强烈的空间感，带来较好的视觉效果[10]。北京公园花境的色彩较少浓艳热烈，更多呈现出天然、素净的美感。



1 孔雀草　3 棕竹　5 丝兰
2 一串红　4 苏铁　6 狗牙根

图1　北京园博园路缘花境平面图

图2　北京园博园路缘花境实景图

图 3 北京植物园路缘花境平面图

图 4 北京植物园路缘花境实景图

图 5 海珠湖公园路缘花境实景

图 6 海珠湖公园路缘花境平面图

图 7 传祺公园入口花境实景

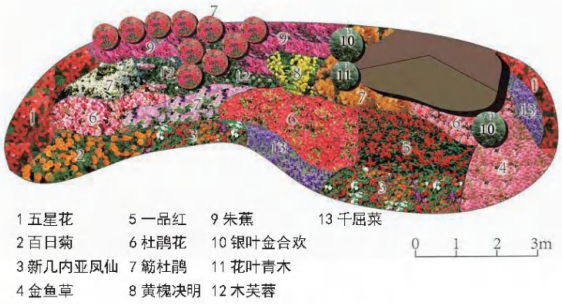


图 8 传祺公园入口花境平面图

调研的 5 个广州公园花境的观赏期主要由 2 月持续至 11 月，其中春、夏季开花的花境植物有 27 种，有龙船花、凤仙花、翠芦莉 *Ruellia brittoniana*、石竹、朱顶红等；夏、秋季开花的有 24 种，有朱槿 *Hibiscus rosa-sinensis*、夏堇、簕杜鹃、软枝黄蝉 *Allamanda cathartica*、赪桐 *Clerodendrum japonicum* 等。广州公园花境色彩明艳活泼，红色系花卉应用十分突出，明快的黄色系花卉的应用频率次之，偏冷色的蓝紫色系花卉、白色系花卉则相对较少。

广州公园花境虽缤纷而不杂乱，景观效果良好，如海珠湖公园路缘花境（图 5~6）与传祺公园入口花境（图 7~8）均利用和谐的色彩搭配，将橙、红、玫红、紫、粉等色块协调于同一个花境之中，向人们展示了大自然的缤纷色彩。广州公园花境营造表现出结合环境场所来搭配适合颜色的植物的意识，如在公园入口，以红色系、黄色系、粉色系植物为主，营造一种热烈、活泼的气氛，表现“迎宾”之意；在公园安静休息区的花境多采用寓意冷静的紫色、绿色、蓝色系植物，为游客创设一种安宁沉静的氛围。这些反映出广州公园花境对植物色彩的应用手法比较多样。

2.2 北京与广州公园花境植物配置与造景

2.2.1 两地公园花境平面效果分析

花境的尺度取决于场地、所处

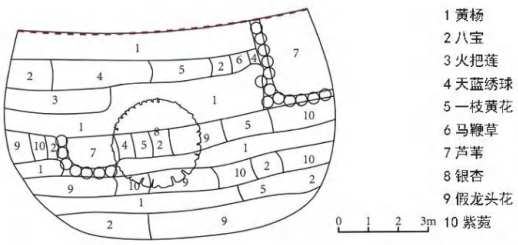


图 9　北京植物园中心花境平面图

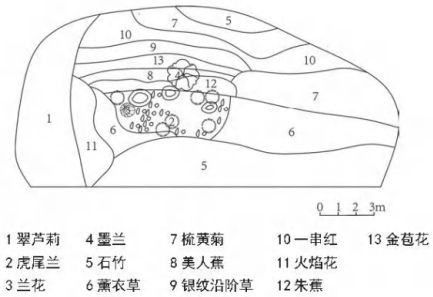


图 10　海珠湖公园中心花境

公园的尺度。北京公园的尺度基本都很大，比如北京园博园占地 267 hm^2。从实际案例来看，同类型北京花境的占地面积大多大于广州。北京植物园中心花境（图 9）是北京公园绿地花境的典型代表，平面构图为较规则的斑块交织。广州海珠湖公园中心花境（图 10）平面效果突出，以不规则的斑块交织，且面积相对北京植物园中心花境来说不大。

2.2.2 两地公园花境立面效果分析

花境立面效果与平面布局存在一定关系，若要突出表现竖向线条，植物的竖向高度应是宽度的 2 倍以上；而要表现水平线条，植物的高宽应比较接近；若要表现群体效果，群体水平方向上种植长度则应大于植株单株高度的 2 倍[11]。根据花境配置宽高比原则，较大面积的平面构图具有较高的立面。北京公园花境竖向变化较大，其采用的植物株高有几个集中高度段，最底层植物高度集中在 30~40 cm，常表现出较高的平面，且以几个更高的斑块打破平面，一般采用高于基底平面 40~50 cm 的植物斑块，如一些尖塔形植物像翠雀、金鱼草、毛地黄 *Digitalis purpurea* 等，甚至是高大的乔木如银杏 *Ginkgo biloba*、油松 *Pinus tabuliformis* 等，根据花境的平面尺度来合理搭配，竖向变化丰富，呈现出花境浓郁而自然的立面效果。

广州公园花境竖向变化较小，所采用植物的株高一般较相近，在同一花境中，植物高度集中在 20~30 cm 或是 30~40 cm。在花境效果呈一较低平面的同时，为免枯燥乏味，又以几株或几丛高于平面 20~30 cm 的植物如虎尾兰 *Dracaena trifasciata*、龙舌兰 *Agave americana*、朱蕉 *Cordyline fruticosa* 等来点缀，增加竖向变化，使花境更加生动活泼。但总的来说，广州花境在植物高度较平均的情况下更多侧重于表现水平线条，体现花色、质感之美。

2.2.3 两地公园花境造景风格分析

花境的尺度是风格表现的基础，同类型的北京公园花境常较广州公园花境面积大，容易给人一种开阔、自然的景观效果。平面是花境植物配置的依据，直接影响到花境的立面效果，而立面是花境最重要的观赏面，是花境风格表现的骨骼。北京公园花境竖向起伏较大，立面观赏性较强，粗犷野趣；广州公园花境更为注重平面色块的表现，精致鲜艳。两地各异的色彩特征使各自的平立面效果更加突出，北京公园花境配色素雅、天然，放大了花境立面上所呈现出的野生趣味；广州公园花境配色浓烈奔放，突出了色块交织，呈现精致可人的质感。

3 讨论

3.1 植物材料与配置

植物材料是花境景观效果的基础，对花境景观效果影响最大的宿根花卉较难适应广州的湿热气候，对广州花境的营造造成了一定的局限性；然而“花城”广州另辟蹊径，灵活地利用本土花卉、观叶观果植物加以驯化培育，打破了人们对花境效果的固有印象，竟有“南风北渐”之势，特别表现在近年华东花境中出现了簕杜鹃的身影。中国丰富的气候带孕育出的植物材料足以支持花境风格之百花齐放，在进行花境植物配置时，应结合立地条件重点考虑到花境的季相变化[12]，合理安排花期，对花境的立面轮廓进行重点设计。要想花境可持续地保持较高观赏水平，在花境配置过程中就应遵循一定的生态学原则，符合花卉本身的生态习性，不能盲目栽植[13]。

3.2 色彩搭配

在进行花境的色彩搭配时，应依据当地的文化背景以及环境氛围等因素确定主色调，然后搭配其它色彩[14]。色彩上，北京公园花境素雅有余，稍显活力不足，可考虑多彩的观花植物、彩叶植物，使花境整体更为饱满。广州花境可从环境心理学、色彩美学的角度找出更佳的色彩搭配方案，如可根据季节来设定花境的色彩基调[15]，或是结合花境位置巧用冷暖色调植物等。

3.3 平立面效果

立面是花境的最重要观赏面，北京花境立面层次丰富，景观效果

良好，如能增加一些尖塔形、箭形植物的应用，增加大花灌木甚至是观赏性强的小乔木，将较低矮的植物种植于花境前方，较高植物种植于花境后方，或是两侧种较低矮植物，中间种植较高植物[16]，从而营造出景深，将取得更为丰富的竖向变化效果。

3.4 本土特色营造

我国自古便有“花径”一词，近似于西方的“花境”，更有“山花夹径幽，古甃生苔涩”的诗句体现出花径的意境[17]。国内园林绿化工作者在学习国外花境营造的先进设计理念与配置手法的同时，应重点探索发展具有我国特色的花境艺术，例如与置石、假山、盆景等传统园林元素相结合[18]，或采用蕴含传统文化意味的植物如兰 *Cymbidium* spp.、竹 Bambusoideae、杜鹃 *Rhododendron* spp. 等，进行设计与实践，来营造出更加能体现我国本土文化特色的花境。

4 结论

在注重生态发展、绿色生活的今天，花境这一兼顾生态、景观要求的园林应用形式仍有很大潜力。据《广州市林业和园林“十三五”发展规划》，十三五期间广州将建设成为具有岭南特色风貌的花园城市，对各辖区提出了结合城市更新挖掘绿化潜力的要求，并积极促进珠江沿线、主要道路沿线景观升级，不断增加花景、精品绿道和立体绿化，持续推进各类公园的建设，城市公园中的花境建设正响应了时代的号召。值得注意的是，通过实地调查发现，广州的气候虽一定程度上限制了宿根花卉的良好表现，但也能根据自身的优势结合乡土花卉营造出效果良好的花境。研究北京、广州两地花境的不同植物选择、不同造景风格等，为今后花境营造提供了新的启迪，如扩大植物材料的选择面，尤其是挖掘、应用乡土植物，以生态学原则、美学原则为指导进行花境设计，关注季相景观，保证最佳观赏期，从而营造富有地域特色的花境植物景观。

注：本文图片均为作者自绘自摄。

参考文献：

[1] 吴涤新．花卉应用与设计 [M]. 北京：中国林业出版社，1994：60-65.

[2] 王美仙，刘燕．花境及其在国外的研究应用 [J]. 北方园艺，2006（4）：135-136.

[3] 胡静敏．华南地区花境的营造方法研究 [D]. 广州：华南农业大学，2016.

[4] HAN Y. Creating Colorful Flower Border for Building Beautiful Eco-city[J]. Journal of Landscape Research, 2013(6): 8-9.

[5] 舒婷婷，陈夕雨，胡永红．辰山花环，四季乐章——上海辰山植物园大尺度花境的探索 [J]. 中国园林，2015，31（7）：52-58.

[6] 夏宜平，顾颖振，丁一．杭州园林花境应用与配置调查 [J]. 中国园林，2007，23（1）：89-94.

[7] 张启翔．中国观赏园艺研究进展2016[M]. 北京：中国林业出版社，2016：698-705.

[8] 欧阳舒怡，冼丽铧，翁殊斐，等．广州公园花境植物种类和配置模式 [J]. 林业与环境科学，2017，33（3）：80-85.

[9] 吴越．北方花境植物材料选择与配置的研究 [D]. 哈尔滨：东北农业大学，2010.

[10] 周文祥．花境素材的色彩搭配分析 [J]. 花卉，2017（4）：17-18.

[11] 刘丹丹．中外园林花境营造比较与发展趋势研究 [D]. 杭州：浙江大学，2016.

[12] 秦艳．园林植物的色彩搭配及应用 [J]. 现代园艺，2014（14）：133.

[13] 邵君霞，肖永新．花卉在花境中的应用及养护管理 [J]. 现代园艺，2017(2)：144-145.

[14] 朱雅丽，杨道鑫．园林景观设计技术浅析 [J]. 现代园艺，2014（10）：107.

[15] 陈建君．深圳地区园林花境植物应用 [J]. 房地产导刊，2017（17）：148+162.

[16] 杨财福．园林花境的设计要点与植物材料的选择分析 [J]. 江西建材，2017（23）：190.

[17] 罗培．论园林花境的设计要点与植物材料的选择 [J]. 科技与创新，2017(7)：100+102.

[18] 吴悠．花坛、花境在园林植物应用中的对比分析 [J]. 现代园艺，2017（5）：107-108.

作者简介：

陈思婕 /1996 年生 / 女 / 浙江金华人 / 硕士 / 浙江大学农业与生物技术学院园林研究所（杭州 310029）/ 专业方向为风景园林规划与设计

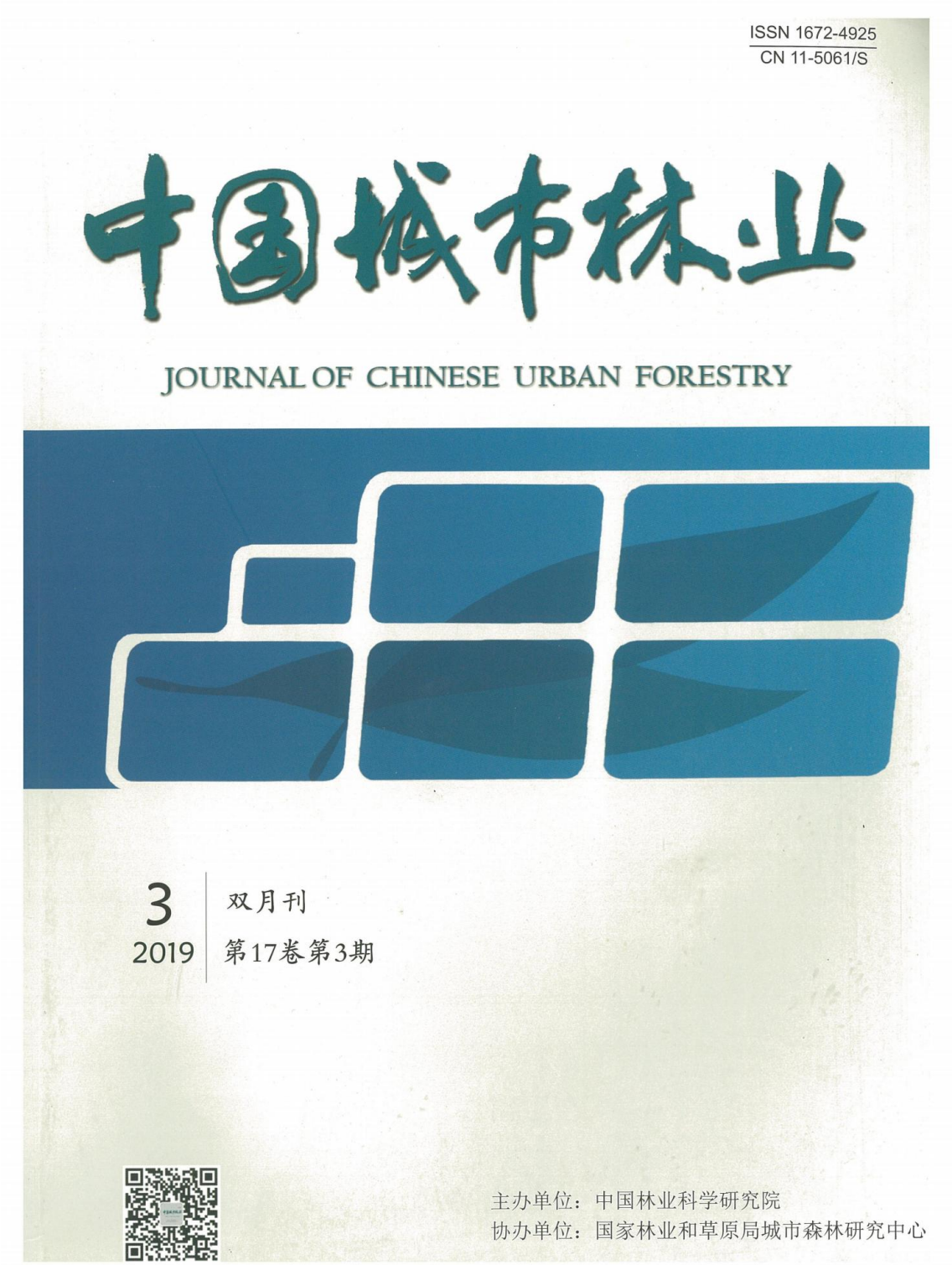
翁殊斐 /1969 年生 / 女 / 广东潮州人 / 博士 / 华南农业大学林学与风景园林学院（广州 510642）/ 副教授 / 研究方向为园林植物与城市绿化

***通信作者：**

冼丽铧 /1987 年生 / 女 / 华南农业大学林学与风景园林学院（广州 510642）/ 实验师 / 专业为风景园林植物应用 /E-mail: xianlihua@scau.edu.cn


ISSN 1671-2641
9 771671 264190 10
ISSN 1671-2641 国内邮发代码 46-331

3.4. 保健植物在广州市居住区的应用研究



中国城市林业
Zhongguo Chengshi Linye
2019年6月　第17卷　第3期（总第96期）

目　次

JOURNAL OF CHINESE URBAN FORESTRY

Zhongguo Chengshi Linye

Vol. 17 **No.** 3 **Jun.** 2019

CONTENTS

保健植物在广州市居住区的应用研究*

孙 妮 冼丽铧 翁殊斐 冯志坚

华南农业大学林学与风景园林学院 广州 510642

摘要：文章通过对广州市不同年代建设的 9 个居住区进行调查研究，对常见保健植物的种类和功能进行分析与归纳，结果表明，广州居住区保健植物的树种虽然较多，共记录有 55 科 80 种，但能广泛应用的树种较少，常用的只有 33 科 50 种。在保健功能应用上，树种多以观赏型、芳香型、环保型植物为主，而听觉型、触觉型和抑菌释氧类的保健植物应用较少，建议加强科普宣传，增加这些保健植物在居住区绿地中的应用，为保健植物在城市居住区的应用提供思路和理论依据。

关键词：保健植物，保健作用，居住环境，景观设计

DOI：10.3969/j.issn.1672-4925.2019.00.021

Application of Health-care Plantsto Residential Areas in Guangzhou City

Sun Ni Xian Lihua Weng Shufei Feng Zhijian

(College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, 510642, China)

Abstract: The paper analyzes and summarizes the species and functions of common health-care plants in Guangzhou City after the investigation of 9 residential areas built in different years. The result shows that though there are a varieties of health-care species found in the residential areas, recorded as 80 species belonging to 55 families, less species have been commonly applied, only 50 species belonging to 33 families. In terms of the functions, most species fall in ornamental, aromatic and environmentally-friendly categories, while the health-care plants with auditory, kinesthetic and bacteriostatic & oxygen release functions are rarely used. It is suggested to strengthen the scientific popularization and outreach, and increase the application of the health-care plants to the green spaces in residential areas, so as to provide ideas and theoretic basis for the application of health-care plants to the urban residential areas.

Key words: health-care plants, health benefits, living environment, landscape design

随着社会经济的快速发展，人们对居住环境的健康问题越来越关注。我国对保健相关的课题研究起步较晚，20 世纪末，程绪珂在《建设有中国特色生态园林的探索》中提出了一种“保健型的人工植物群落”的分类[1]。康宁等[2]通过对园林绿地景观要素的分析，发现植物群落景观对人体的身心放松状态有积极的促进作用。杨依婷等[3]从保健植物的功能出发，按照不同分类标准对园林保健植物进行分类和应用分析。林少妆等[4]从“保健”的定义出发，认为园林设计能够利用自然因素创造对人的健康和康复有益的良好人居环境。张彦婷等[5]主要探讨了阴阳五行理念与保健植物在居住区的植物营造的可行性和意义。叶鑫[6]从视觉、听觉、嗅觉和触觉等方面对居住区的绿植设计提出了设计意见。丁钰[7]通过对国外流行的感官公园、康复花园、记忆花园等多种园艺疗法进行分析，提出了当代景观设计应更深入挖掘使用者各类感官功能在环境中的体验感。经过对文献的梳理，发现针对居住区保健植物景观的研究较少，而居住区环境是影响人民群众健

收稿日期：2018-07-26

* 基金项目：广州市哲学社科规划 2019 年度课题（2019GZGJ53）

第一作者：孙妮（1995-），女，本科，研究方向是园林植物应用。E-mail：779640847@qq.com

通信作者：冼丽铧（1987-），女，硕士，实验师，研究方向为风景园林植物应用。Email：xianlihua@scau.edu.cn

康的主要因素之一，本研究针对保健植物在居住区的树种选择、应用现状及配置方法，开展对广州市居住区保健植物应用的研究，为进一步科普保健植物知识及今后居住区的绿化设计研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 保健植物概述

保健植物是指对人们身心健康的保持、保护有着明显功效的植物[8]，包括叶、花、果和枝、干、表皮等地上部分含有对人体有用的药用成分、营养成分、抗菌成分等活性挥发性物质的植物。一方面，保健植物会挥发所含有的抗菌素和抗病毒作用的化学成分，经由人的呼吸系统或从皮肤毛孔进入人的体内，对人体产生保健、医治、缓解疾病症状的作用，一些保健植物通过其观赏价值刺激人类的视觉、听觉等感官来舒缓人的不良情绪；另一方面，保健植物能够滞尘减噪、杀菌抑菌。因此，保健植物既具有观赏价值、生态效益，又具有保健功效，如帮助病人或亚健康人群抗抑郁和缓解疲劳，减轻高血压病症和缓解呼吸道疾病等[9]，对城市居民健康生活具有重要的保健作用。

1.2 研究地概况及调研方法

广州市位于广东省中南部，濒临中国南海，亚热带季风气候，雨热同期，年平均气温较高，温差较小，年降水量较大，宜人的气候适合大多数华南植物的生长，为广州丰富的植物资源创造了良好的生活环境。

本文根据居住区建设年代不同，在广州城区选取9个具有代表性的居住区样点进行实地调查，对小区中不同绿地类型保健植物的配置方式、植物生长情况、保健作用、景观效果等进行研究。

表1 广州市居住区保健植物景观应用调研样点

居住区名称	地理位置	建设时间/年
华南理工大学东住宅小区	天河区辽河路	1990年前
育蕾小区	天河区体育西路	1990-1999
棠德花苑	天河区棠德南路	1990-1999
海景花园	天河区黄埔大道中	2000-2009
富力半岛花园	白云区增槎路	2000-2009
锦城花园	越秀区东风东路与梅花路交界处	2000-2009
雅居乐富春山居	黄埔区广汕公路	2010-2019
雅居乐鸿禧华庭	番禺市桥北区中心腹地	2010-2019
金山谷花园	番禺区市广路和新光快速路之间	2010-2019

2 结果与分析

2.1 保健植物的种类组成

本研究通过对广州市9个居住区样地的调研，结合对常用保健植物文献记载的归纳总结[10]，结果显示，共记录保健植物55科80种，常用33科50种，以桑科、木兰科、樟科、桃金娘科、棕榈科、天南星科等植物为主，松柏类植物应用较少。灌木树种的种类比较丰富，观花观叶植物及具有芳香气味的植物应用频繁。棕榈科植物在广州居住区应用频率也非常高，它们除了具有较高地域特色的观赏价值之外，同时具有较强大的保健功能。

2.2 保健植物的保健功能

2.2.1 感官型保健功能

感官型的保健功能主要以视觉类和嗅觉类保健为主。研究表明，不同花色、叶色的植物能给人带来不同的保健效果（表2），蓝紫色能缓解人的精神紧张状态，调节体温；红色热情洋溢，让人精神奋发向上；绿色能缓解视觉疲劳，同时促进思维；黄色能增强食欲；白色能镇静安眠[11]。

保健植物发挥视觉类保健功能作用主要是依靠其花色、叶色的观赏价值，以观花型、观叶型植物为主。在灌木树种中，彩叶植物种类丰富，应用频繁，少量的如美人蕉（*Canna indica*）、金苞花（*Pachystachys lutea*）等植物也有应用。

表2　常见的视觉型保健植物

花色	植物名称
蓝紫色	紫藤（*Wisteria sinensis*）、鸳鸯茉莉（*Brunfelsia latifolia*）、翠芦莉（*Aphelandra Ruellia*）、紫茉莉（*Mirabilis jalapa*）、藿香蓟（*Ageratum conyzoides*）、五爪金龙（*Ipomoea cairica*）、巴西鸢尾（*Neomarica gracilis*）
红色	凤凰木（*Delonix regia*）、木棉（*Bombax ceiba*）、山茶（*Camellia japonica*）、樱花（*Cerasus sp.*）、红花羊蹄甲（*Bauhinia blakeana*）、木芙蓉（*Hibiscus mutabilis*）、红千层（*Callistemon rigidus*）、扶桑（*Hibiscus rosa－sinensis*）、炮仗花（*Pyrostegia venusta*）、美丽异木棉（*Ceiba speciosa*）、簕杜鹃（*Bougainvillea spectabilis*）、红车（*Syzyglum hancei*）
黄色	黄花风铃木（*Handroanthus chrysanthus*）、黄槐、金苞花、金银花（*Lonicera japonica*）、金盏菊（*Calendula officinalis*）、黄蝉（*Allemanda neriifolia*）、桂花（*Osmanthus fragrans*）、黄花夹竹桃（*Thevetia peruviana*）
白色	玉兰（*Magnolia denudata*）、白兰（*Michelia alba*）、狗牙花（*Ervatamia divaricata*）、栀子（*Gardenia jasminoides*）、荷花玉兰（*Magnolia grandiflora*）

具有嗅觉保健功能的植物常常能散发出芳香气息或者含有有益物质的气体，对人的呼吸系统和神经系统起到保健作用（表3）。有些植物的气味具有很强的驱虫功效，有些气味具有抗菌灭菌作用，有些气味可以改善人的食欲、调节情绪[12]。

表3　常见的嗅觉型保健植物

学名	科属	保健作用
桂花	木犀科木犀属	消除疲劳、散寒舒胃、止咳化痰
白兰	木兰科白兰属	对呼吸系统、心血管系统有保健作用，消除疲劳、促进安眠
含笑 *Michelia figo*	木兰科含笑属	安神，行气化浊
九里香 *Murraya exotica*	芸香科九里香属	含抗菌活性成分，镇定镇痛，缓和紧张情绪
红千层	桃金娘科红千层属	对心血管系统有保健作用，止咳化痰
柠檬桉 *Eucalyptus citriodora*	桃金娘科桉属	驱除蚊蝇、抑菌
罗汉松 *Podocarpus macrophyllus*	罗汉松科罗汉松属	安神凉血、舒筋活络、温中行气，对神经系统有保健作用
竹柏 *Nageia nagi*	罗汉松科竹柏属	安神凉血、舒筋活络、驱蚊
海桐 *Pittosporaceae tobira*	海桐花科海桐花属	对呼吸系统有保健作用，止咳化痰
香樟 *Cinnamomum camphora*	樟科樟属	芳香型挥发油可避臭驱蚊、祛风行气止痛、杀菌
紫茉莉	紫茉莉科紫茉莉属	清香宜人，杀菌
四季米仔兰 *Aglaia duperreana*	楝科米仔兰属	驱除蚊蝇，防止疟疾传播
金银花	忍冬科忍冬属	降血压，促进心血管系统循环

2.2.2 医疗型保健功能

医疗型的保健功能主要利用植物能杀菌抑菌、活性释氧、防尘减噪、净化空气等功能，对人们身心疾病起到一定的疗效，通过杀灭细菌防止病菌的传播，进而达到康体保健的功能[13]。广州市居住区常用的棕榈（*Trachycarpus fortunei*）、棕竹（*Rhapis excelsa*）、榕树、紫薇（*Lagerstroemia indica*）、苏铁（*Cycas revoluta*）、斑叶鹅掌柴（*Schefflera arboricola* 'Variegata'）、一叶兰（*Aspidistra elatior*）等植物，能够有效吸收碳氧化物、硫化物等有害物质，起到净化空气的作用。应用较多的香樟、红千层、海桐、柠檬桉等芳香植物有抗菌活性成分，对心血管系统和呼吸系统等具有预防治疗的作用；而竹柏、罗汉松、构树（*Broussonetia papyrifera*）等植物能有效利用其挥发的气体，起到舒筋活络、安神凉血、祛风清热等作用。

2.3 不同绿地类型保健植物应用情况

保健植物在不同绿地类型，如道路绿地、中心活动绿地和宅旁绿地中的应用随着不同年代而有所不同（表4）。

2.3.1 保健植物在道路绿地的应用

居住区道路绿化的要求是遮荫和美观，同时又要有吸附污尘、净化空气的作用，所以大量具有抑菌释氧、滞尘减噪功能的保健乔木常被用于居住区的道路绿地之中。20世纪90年代及以前的广州市居住区基本是以规整的道路分隔楼栋，这个时期的保健植物如白兰、高山榕（*Ficus altissima*）、细叶榕（*Ficus microcarpa*）、红花羊蹄甲

表4 调研样地不同绿地类型保健植物应用情况

绿地类型	保健植物应用情况		
	1990—1999年	2000—2009年	2010—2019年
道路绿地	以规整的道路分隔楼栋，保健植物基本用于道路绿化，常进行乔-灌结构或者乔-草结构搭配	以叶色常绿、树形优美的乔木为主，引入棕榈科植物，进行乔灌草结构搭配	以草坪弱化道路边界，以常绿植物搭配观花乔木增加视觉保健功效；用花灌木增加植物层次，进行乔灌木复层结构搭配
中心活动绿地	无明确的中心活动绿地，多以草坪围合为主，供观赏使用	以乡土植物为主，以常绿植物为主基调，搭配观叶观花植物、彩叶植物进行颜色的搭配和调和，形成丰富的视觉体验	以常绿乔木或观花乔木作为骨干树种，运用多个种类的彩叶植物或花灌木进行围合
宅旁绿地	无明确的宅旁绿地规划，居民自发地在居民楼前绿地种植生活所需或者观赏用的小型保健植物	注重抑菌滞尘、驱赶蚊蝇、能吸附有害气体的植物，同时搭配有视觉体验和嗅觉体验的花灌木	与道路绿地景观相融合，注意架空层的通风透光问题，以疏朗、低矮的观花观叶和芳香植物为主，进行乔灌草复层结构种植

等都作为行道树种植，再以桂花、九里香等有香气的植物作为中下层灌木或地被。21世纪以后，居住区道路绿化开始采用规则式种植和自然式种植，以常绿乔木为基调树种，搭配棕榈科植物或观花乔木，用常绿植物或者花灌木作为下层植物，充分运用植物的色相、季相及香气达到视觉保健功能和嗅觉保健功能，营造良好的居住区道路景观。

2.3.2 保健植物在中心活动绿地的应用

居住区中心活动绿地是居民日常交往、休闲和游憩的主要场地，所以容易造成空气不流通，滋生细菌。因此，在满足观赏、遮荫、围合等功能的前提下，应选择抑菌、杀菌功能为主的保健植物，适当增加栽植密度，以减少病菌的传播[8]。中心活动绿地的保健植物多以乡土植物为主，选用常绿乔木或观花乔木作为骨干树种，同时运用多个种类的彩叶植物或花灌木进行围合，既营造了中心绿地的整体感和秩序感，又做到了景观疏密有致，保证空气的流通，让不同层次植物在季相、色相等方面进行互补，同时让医疗型、嗅觉型保健植物发挥其间接的保健功能，丰富植物景观，提高生态效益。

2.3.3 保健植物在宅旁绿地的应用

居住区的宅旁绿地同样也是居民日常交往、休闲和游憩的主要场地，与居民关系密切，宅旁绿地的植物设计更加注重人性化，保健植物的作用更加明显。保健植物在宅旁绿地的作用更多的是医疗保健功能，多应用能够抑菌滞尘、强身健体、驱赶蚊蝇的保健植物，也应用具备视觉保健效果的植物。考虑到架空层的光线、通风等问题，在植物选择上多以疏朗的低矮乔木、灌木和地被植物为主。在20世纪90年代及以前的居住区，居民多是自发地在自家居民楼前绿地种植生活所需或者观赏用的小型保健植物，现在，能吸附有害气体和抑菌滞尘的植物应用得比较多，同时搭配能丰富视觉效果和嗅觉体验的桂花、四季米仔兰、九里香、斑叶鹅掌柴、合果芋（*Syngonium podophyllum*）、一叶兰等，营造有益居民活动的宅旁绿地景观。

3 结论与讨论

3.1 保健植物在广州市居住区的应用特点

在广州市居住区，保健植物的种类比较丰富。通常情况下，保健植物是作为景观植物应用的，利用它们与其他园林植物以复层结构的植物配置方式形成层次多样的植物景观，同时结合不同绿地类型的实用性，营造不同的空间氛围，从而发挥保健功效。居住区的保健植物多以观赏型、芳香型、环保型保健植物为主。保健植物的保健功能主要体现在视觉保健、嗅觉保健、防尘减噪、净化空气、增加空气负离子浓度等方面，能直接发挥保健功效的保健植物应用较广泛，而像杀菌抑菌、活性释氧、防治人的身体疾病等功效的保健植物则应用较少。

3.2 保健植物应用的建议

保健植物功能的发挥能激活居住区的活力，

为人和自然之间形成良好的生态系统创造有利条件，有利于人们身心健康的提高[14]。具体有以下建议。

1）对保健植物的应用应充分挖掘当地乡土植物中的保健树种，既能体现当地景观特色，又能让其发挥最佳的生态保健功能。2）根据居民的行为需求以及对环境的需求，对保健植物进行更好的设计应用，让保健植物充分发挥功效，营造更宜居且健康的生活环境。3）在植物的搭配设计上，应注意多种保健植物的有机组合，结合不同绿地类型、不同活动空间让不同保健植物的功能充分发挥。应针对不同年龄人群进行设计，才能做到“以景养心，以境养人”，最大程度地发挥其保健功能。4）为了让保健植物更贴近人们的生活，应该加强对保健植物的科普宣传，加深人们对保健植物的了解，让更多保健植物为居民有效利用。

参考文献

[1] 程绪珂.具有中国特点的生态园林初探[J].上海建设科技，1990(4):7-9.

[2] 康宁，李树华，李法红.园林景观对人体心理影响的研究[J].中国园林，2008，24(7):69-72.

[3] 杨依婷，刘席宇，李科慧.简析园林保健植物的分类及其应用[J].现代园艺，2017(14):137.

[4] 林少妆，杨培新，王长龙.保健型园林在居住区景观设计中的运用[J].中国园艺文摘，2012，28(7):77-78.

[5] 张彦婷，张建华.阴阳五行学说与居住区保健型植物的应用探析[J].上海商业，2012(9):30-33.

[6] 叶鑫.适老化居住区景观环境设计研究[D].山东:青岛理工大学，2016.

[7] 丁钰.园艺疗法在老年社区景观设计中的应用[J].现代园艺，2017(7):122-123.

[8] 殷利华，陈春贵，姚忠勇.居住区绿化保健植物的合理运用[J].江苏林业科技，2005，32(4):50-53.

[9] 郭祎妮，王健，郝江珊.保健功能植物在私家庭院设计中的应用[J].热带生物学报，2016，7(2):190-198.

[10] 邢彩霞.医疗园林之保健植物景观营造研究[D].福州:福建农林大学，2016.

[11] 刘红凡，邵安瓴，王璇，等.洛阳城市绿化彩叶树种应用调查[J].中国城市林业，2013，11(1):59-60.

[12] 杨金凤，刘念.珠三角地区常见嗅觉类保健型园林植物种类介绍[J].南方园艺，2011，22(1):42-45.

[13] 王寒冰，邵培芳.保健植物在居住区的应用分析[J].科技成果纵横，2010(6):58-62.

[14] 贾平，王广生，黄泽飞，等.观赏型保健植物在园林设计中的应用[J].中国农学通报，2009，25(12):177-180.

中国城市林业

Zhongguo Chengshi Linye

（双月刊　2003年创刊）
2019年 第17卷 第3期（总第96期）

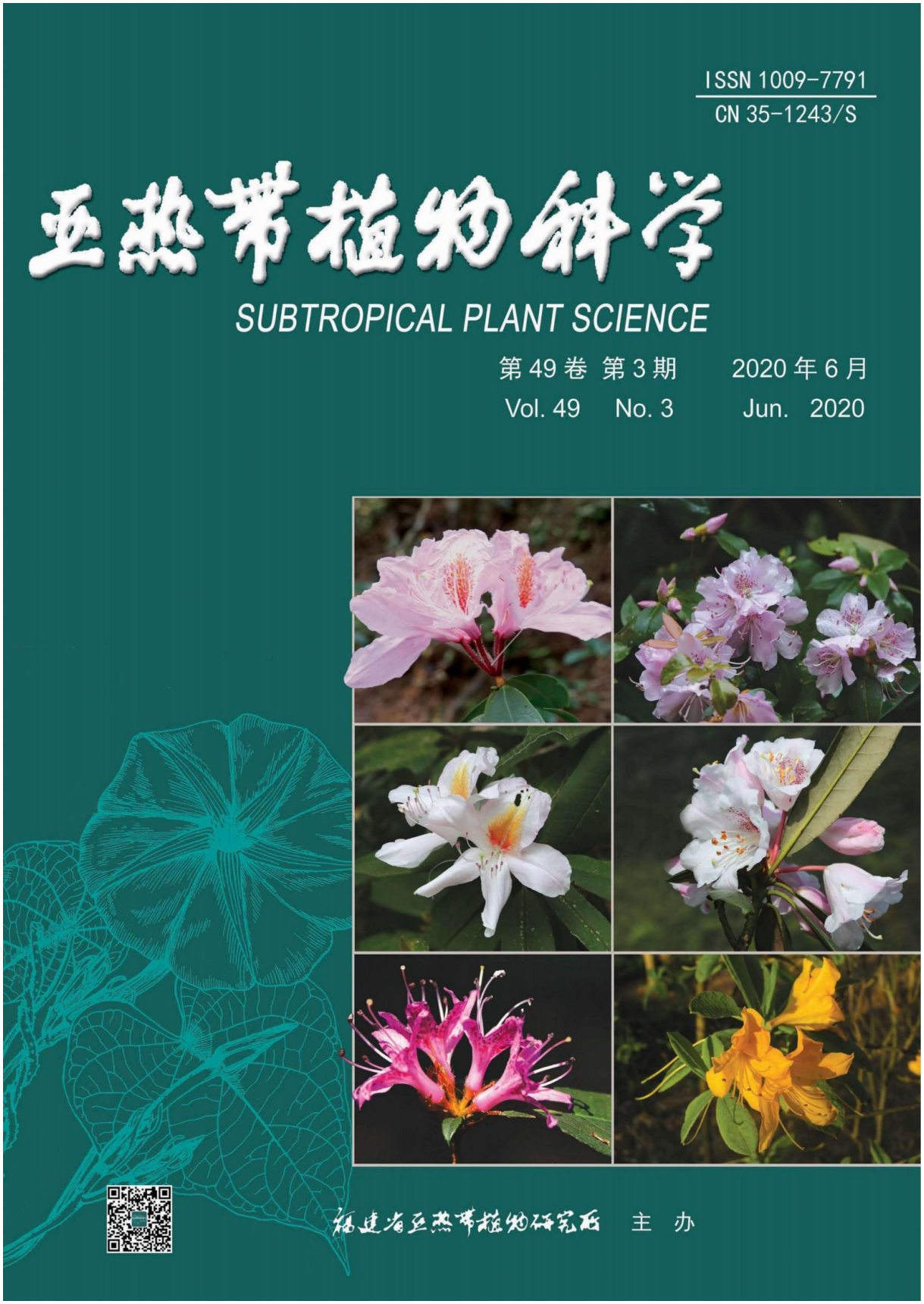
主管单位：国家林业和草原局
主办单位：中国林业科学研究院
协办单位：国家林业和草原局城市森林研究中心
主　　编：王　成
编辑出版：《中国城市林业》编辑部

编辑部主任：谭艳萍
编　　辑：刘畅 谭艳萍
英文审译：陈洁
编辑部电话（传真）：010-62889704
地　　址：北京颐和园后中国林科院科信所
邮　　编：100091
电子信箱：zgcsly9704@163.com
投稿网址：http://csly.cbpt.cnki.net
开户银行：中国农业银行北京海淀支行营业部
开 户 名：中国林业科学研究院林业科技信息研究所
银行账号：11050101040034436

国内发行：北京市报刊发行局
订　　阅：全国各地邮局
邮发代号：80-287
国内统一刊号：CN 11-5061/S
国际标准刊号：ISSN 1672-4925
国外总发行：中国国际图书贸易集团有限公司
国外发行代号：BM2737
广告经营许可证：京海工商广字第0080号
印　　刷：北京诚信嘉华印刷有限公司
出版日期：2019年6月28日
定　　价：15元

ISSN 1672-4925
9 771672 492196 06>

3.5.广州市可食用植物色彩特点及造景应用



亚热带植物科学

目　录

2020 年 第 49 卷 第 3 期
（总第 148 期）

期刊基本参数：CN 35-1243/S*1972*b*A4*84*zh*P*￥15.00*1000*16*2020-06

封面图片：杜鹃属(*Rhododendron*)植物为常绿或落叶灌木，少数为乔木，花大而艳丽，花色丰富，花型多样，花期长，观赏价值高，是世界性著名花卉。福建大仙峰自然保护区内杜鹃属植物种类丰富，有较大的开发前景，其中几种杜鹃花：1.穹蒴杜鹃(*R. henryi*)；2.马银花(*R. ovatum*)；3.刺毛杜鹃(*R. championiae*)；4.猴头杜鹃(*R. simiarum*)；5.溪畔杜鹃(*R. rivulare*)；6.羊踯躅(*R. molle*)。详见正文第 191 ~ 195 页。

1	2
3	4
5	6

SUBTROPICAL PLANT SCIENCE
Vol. 49 No. 3 June 2020

CONTENTS

《亚热带植物科学》编辑委员会

亚热带植物科学 2020,49(3): 208～214.
Subtropical Plant Science

广州市可食用植物色彩特点及造景应用

吴昊书[1]，余文想[2]，张梓原[1]，李之琰[1]，吴晓彤[1]，李自若[1*]，冼丽铧[1*]

(1.华南农业大学林学与风景园林学院，广东 广州 510642；2.艾奕康设计与咨询(深圳)有限公司广州分公司，广东 广州 510630)

摘　要：以广州地区常见的200种(含变种、变型和品种)可食用植物为材料，对植物不同部位呈现的颜色以及不同季节色彩分布情况进行统计分析，总结可食用植物在色彩方面的特点及局限。其中，可食用植物叶、茎色以绿色为主，花、果色丰富。以色彩理论为基础，对可食用植物进行种植搭配实验，归纳相应的植物色彩搭配策略。策略包括三个方面，针对可食用植物叶色特点，提出绿色调可食用植物搭配策略；针对可食用植物色彩丰富度的差异，提出多部位色彩组合策略；针对植物时间维度的色彩分布差异及衔接空缺，提出持续的色彩植物搭配建议。

关键词：可食用植物；色彩特征；景观；植物造景

Doi: 10.3969/j.issn.1009-7791.2020.03.011
中图分类号：S688　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1009-7791(2020)03-0208-07

Color Characteristic and Plant Design of Edible Plants in Guangzhou

WU Hao-shu[1], YU Wen-xiang[2], ZHANG Zi-yuan[1], LI Zhi-yan[1], WU Xiao-tong[1], LI Zi-ruo[1*], XIAN Li-hua[1*]

(1.College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong China; 2.AECOM Guangzhou , Guangzhou 510630, Guangdong China)

Abstract: This research analyzed the color of 200 species (including varieties, forms or cultivars) edible plants and its color distribution in different seasons, so as to get the characteristics and limitations of edible plants in color. The results showed that the leaf and stem color of edible plants were mainly green, and the flower and fruit were colorful. According to the color characteristic, species were tested for planting collocation. Based on the test, there were 3 strategies for plant design of edible plants. First was the green edible plant collocation strategy for the characteristics of leaf color. Second was the multi-part color combination strategy for the color characteristics of different parts of edible plants. Third was the season strategy for the different color distribution and gaps in the temporal dimension of plants.

Key words: edible plant; color characteristics; landscape; plant design

二十世纪八十年代，园林设计师、环保主义者Kourik[1]提出了可食用景观的概念。可食用景观是指在园林设计中，运用可食用植物代替观赏性园林植物，达到一定的景观效果，增添景观效益。在城市化发展进程中，由于人们对健康生活和食品安全、城市生态环境等问题的关注，可食用景观日渐兴盛。相较于其他观赏性植物，可食用植物的园林应用具有食物生产、教育功能、生态价值等特点[2–3]。一方面，可食用景观兼备食用和观赏功能，是都市农业推广和促进城市景观更新的有效路径[4–5]。园林中应用可食用植物可促进人的交流互动，促进社会联结，是当前食农教育、环境教育的有效载体[6]。另一方面，可食用植物作为城市生态系统中食物链的一部分，可为鸟类、昆虫等提供食物供给，促进城市生物多样性[6]，是城市绿色基础设施发挥生态服务效益的重要部分[7]。然而，当前在城市公共空间栽植

接收日期：2019-08-19　　接受日期：2019-10-21
基金项目：国家大学生创新创业训练项目(201810564032)；国家自然科学基金项目(31600575)
*通信作者。E-mail: ziruolee@hotmail.com; xianlihua@scau.edu.cn

可食用植物，常面临美观性不足、不整洁或影响城市形象的质疑，有关“居民在小区内违规种菜、毁坏绿化带”的新闻也频频出现。这些现象的背后，除了需要探讨城市公共空间的使用方式和景观审美等问题，也要面对可食用植物造景的特点及挑战：过往多以食用功能进行利用，可食用植物的观赏性及其景观营造的方式还有待进一步挖掘。

色彩是植物造景的重要要素，在景观主题烘托、环境氛围营造、激发人的情感和联想等方面起着关键作用。一般来说，色彩依附于具体的形象作用于人的感官，相应的色彩信息较容易且直接地被人们所接收[8]，并进一步触动各种各样的个人联想[9]。因此，本研究着重针对可食用植物的色彩特征进行分析，针对可食用植物在色彩搭配方面的挑战提出相应策略，以期为都市可食地景的应用推广提供建议。

1　材料与方法

1.1 广州市常见的可食用植物素材

广州市属南亚热带海洋季风型气候，年平均温度为 20.0～22.0 ℃，年温差为 15.0～17.0 ℃，1 月(最冷月)均温 11.0～13.4 ℃，7 月(最热月)均温 27.7～28.7 ℃[10]。夏季雨热同期，光照充足，植物生长旺盛；冬季霜期短，降雨少。整体而言，在雨热充足的气候条件下，广州可食用植物种质资源丰富，且四季皆可种植、收获。

本研究以广州地区常见的可食用植物为对象进行色彩特征的整理与分析。一方面通过文献调研将园林、园艺、农学等方面总结的广州地区可食用植物进行整理[11]，一方面结合社区调研(包括菜市场)和当地花卉市场调研对常见的可食用植物进行梳理。比对文献、市场与社区种植中可食用植物出现的频次，整理了常见可食用植物 200 种(含变种、变型和品种，下同)，并对其进行色彩分析(附表)[12]。

1.2 方法

针对可食用植物的色彩特点，运用 Microsoft Excel 表格工具，对广州地区 200 种常见可食用植物色彩进行统计、分类与比较。由于大部分蔬菜类的可食用植物具有明显的季节性，因此按照生长季节，将可食用植物素材划分为春夏季、秋冬季、四季(多年生植物)等三大类别。总结可食用植物不同部位的色彩分布以及可食用植物在不同季节的色彩分布情况。其中，结合既有的植物形态研究中常见的色彩分类以及可食用植物特点，将色彩分为 8 个色系：红、橙、黄、绿、蓝、紫、粉、白。统计中，一些可食用植物的部位较小或与其他部位无法分离色彩特征，故不进行色彩记录，归为“无观赏性”，如大部分叶菜类植物果的色彩信息等。

与一般园林观赏植物类似，可食用植物造景的类型可包括行道树、绿篱镶边类地被、花坛、花境、立体绿化、盆栽以及大面积的田地等[13]。本研究针对可食用植物的搭配，主要就小尺度(1～2 m^2)花坛或花境类型开展 3 个以上品种的色彩搭配测试，结合不同部位的色彩特点、不同季节的色彩特点进行植物造景搭配分析。

2　结果与分析

2.1 可食用植物不同观赏部位的色彩特点

可食用植物常见的观赏部位包括叶、花、果、茎等。从可食用植物色彩在整体的观赏部位分布来看，叶色和茎色比较单一，大部分为绿色系，只有少数植物的茎色为红色和紫色；花色和果色相对较丰富(图 1)。但是从植物的生长过程来看，大部分种类的花期、果期是较短暂的。长时间段里，植物色彩的呈现来自于叶色，色系以绿色调、红紫色调为主。可观赏性果实类植物比一般的观赏性植物更具吸引力，色彩主要以暖色调为主，分布在绿色、黄色、红色、紫色、橙色等 5 个色系(图 1)。可食用植物花色丰富，但多数花朵较小，只作点缀之用。而且，菜叶类植物花色丰富的阶段，可食用功能降低。

2.2 可食用植物色彩的季节分布特点

从可食用植物生长季节来看，任一时节都可以有花，并由花带来景观色彩的丰富。春夏季和秋冬季(广州地处北半球，一般春夏季 3 月至 8 月，广州时而炎热的天气会延续至 9 月；秋冬季 9 月至翌年 2 月)的花色以黄色和白色系为主，同时有紫色、红色、橙色系。四季(多年生)的植物花色以白色为主，也有黄色、红色、紫色，可构成的景观以暖色调为主。多年生植物的花，可在一年生植物换季时期填

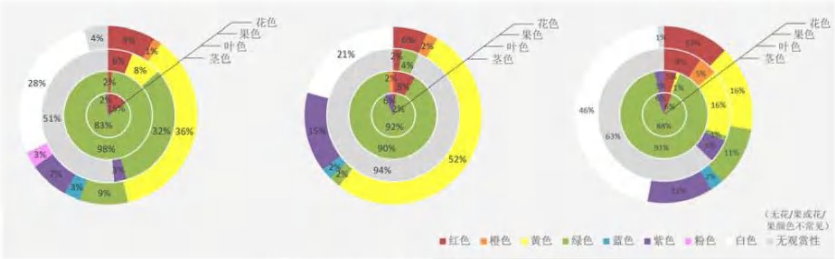


图 1 可食用植物花、果、叶、茎色

Fig. 1 Colors of flowers, fruits, leaves and stems of edible plants

注：从左到右分别为春夏季、秋冬季、四季(多年生)可食用植物。

补一定的花色空白，保持景观色彩的丰富度。

春夏季主要种植豆类、瓜果类、茄类等食果植物。这类蔬菜都是喜温耐热植物，前期多为绿色，种植 2～3 个月后进入开花结果阶段，色彩逐渐丰富。秋冬季以叶菜类、香料类植物为主，由于两类植物栽培品种多样，秋冬季、四季可食用植物的叶色比春夏季丰富，植物的花也提供丰富的色彩效果。茎亦可作为一个较特殊的观赏点，但观赏的颜色有限，较特殊的颜色有紫色、红色与黄色，主要集中在植物生长后期，如夏末或冬末期。

2.3 基于色彩特点的可食用植物造景

广州地区可食用植物的色彩整体以绿色为主。花、果是相对丰富的色彩来源部位，但持续时间存在局限性。在可食用植物造景中，一方面结合既有的色彩搭配原则，另一方面结合可食用植物素材的色彩特点进行搭配组合。而可食用植物的种植关键，一是保证可食用植物素材的食用性；二是尽可能的结合生长与养护管理特点进行搭配。

因此，针对可食用植物生长特性、食用需求、管养特点、色彩来源与丰富度变化特点，对多种可食用植物素材的种植搭配进行测试，提出搭配的三个策略：针对可食用植物叶色特点的叶色组合搭配策略；针对不同部位色彩丰富差异性的多部位色彩组合策略；针对植物时间维度的色彩分布差异及衔接空缺的持续性色彩植物搭配建议。

2.3.1 针对叶色特点配置具有层次的叶色组合

大多数可食用植物色彩组合以叶色为主。其色彩主要分布在绿色及红紫色系。为避免景观色彩的单调，需要更细致地进行植物色彩纯度、色温等情况的分析、组合搭配，形成丰富的色彩层次[14]。

一方面，在植物组合过程中，根据叶色间的差异，按照前浅后深、前亮后暗的原则，加强整体的对比，形成同一色调的丰富层次[8]，如茴香(*Foeniculum vulgare*)+番茄(*Lycopersicon esculentum*)+向日葵(*Helianthus annuus*)+分葱(*Allium fistulosum* var. caespitosum)+芸香(*Ruta graveolens*)+芙蓉菊(*Crossostephium chinensis*)+金叶番薯(*Ipomoea batatas* 'Golden Finger')(图 2)。前景金叶番薯亮度高，使整个植物景观面积感增大[15]；中景为浅绿色调的芸香和分葱，以及茴香；后景以深绿色叶的番茄、蓝花鼠尾草(*Salvia farinacea*)、向日葵为背景，银绿色的芙蓉菊形成点缀。

图 2 不同深浅的绿色调搭配平面图和效果图

Fig. 2 The plan and perspective of different shades of green

A.向日葵'黑天鹅绒女王'(*Helianthus* 'Velvet Queen'), B.向日葵'意大利白'(*Helianthus* 'Italian White'), C.番茄(*Lycopersicon esculentum*), D.紫梦狼尾草(*Pennisetum setaceum* 'Rubrum'), E.百日草(*Zinnia elegans*), F.罗勒(*Ocimum gratissimum*), G.茴香(*Foeniculum vulgare*), H.芸香(*Ruta graveolens*), I.蓝花鼠尾草(*Salvia farinacea*), J.芙蓉菊(*Crossostephium chinense*), K.月季(*Rosa chinensis*), L.金叶番薯(*Ipomoea batatas* 'Golden Finger'), M.金鸡菊(*Coreopsis drummondii*)(每个方格=20 cm × 20 cm，下同)

另一方面，利用彩色叶、叶形差异较大的植物点缀，形成对比强烈、醒目、丰富的叶色组合[16]。如紫芥菜(*Brassica juncea*)+琉璃苣(*Borago officinalis*)+紫菜苔(*Brassica campestris* var. *purpuraria*)+白羽衣甘蓝(*Brassica oleracea* var. *acephala*)+角堇(*Viola cornuta*)(图 3)，紫芥菜奠定景观的蓝紫色基调，形成沉稳、静谧的氛围。以白色叶的羽衣甘蓝配入，使纯度降低但明度增加[17]，起到点睛之用，打破深色叶的沉闷，整体组合清新明亮[8]。香茅(*Cymbopogon citrates*)+旱金莲(*Tropaeolum majus*)+苦荬菜(*Ixeris polycephala*)，三种植物色调基本相近，但在叶形上香茅线状披针形叶与旱金莲盾状叶形成鲜明的对比，苦荬菜圆状披针形叶夹于其间，形成了绿色的不同质感(图 4)。在香茅+彩叶芋(*Caladium bicolor*)+姜花(*Hedychium coronarium*)+夏堇(*Torenia fournieri*)组合中，将深浅不一的绿叶和彩叶芋白色半透明进行搭配，利用姜花的长圆状披针形叶、彩叶芋的盾形叶与香茅的流线型叶，强化植物造景层次(图 5)。

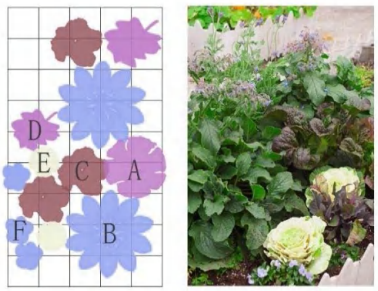


图 3　蓝紫色补充白色调搭配平面图和效果图

Fig. 3　The plan and perspective of bluish violet complementing with white

A.薰衣草(*Lavandula angustifolia*); B.琉璃苣(*Borago officinalis*); C.紫芥菜(*Brassica juncea*); D.紫菜苔(*Brassica campestris* var. *purpuraria*); E.白羽衣甘蓝(*Brassica oleracea* var. *acephala*); F.角堇(*Viola cornuta*)

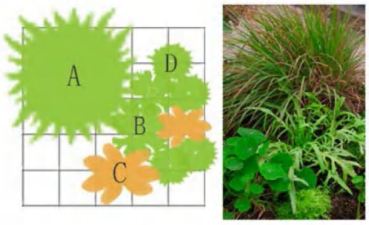


图 4　不同叶形组合搭配的平面图和效果图

Fig. 4　The plan and perspective of different leaf shapes

A.香茅(*Cymbopogon citrates*); B.苦荬菜(*Ixeris polycephala*); C.旱金莲(*Tropaeolum majus*); D.苦苣(*Sonchus oleraceus*)

2.3.2 善用可食用植物不同部位的色彩形成丰富的色彩变化

可食用植物的叶色虽然单调，但可搭配花、果部分的色彩形成丰富的色彩变化。由于花果期不太长，搭配过程以叶色为基础进行组合搭配。种植时尽量采取集中种植的方式，将色彩集中起来，以强化植物色彩丰富度[18]。

其一，以单色调叶色为基础，配合色温、明度，搭配点缀可食用花卉或对部分叶菜进行观花留种。如土豆(*Solanum tuberosum*)+胡萝卜(*Daucus carota* var. *sativa*)+芹菜(*Apium hybrida*)+茼蒿(*Glebionis coronaria*)+罗勒(*Ocimum basilicum*)+金盏菊(*Calendula officinalis*)的搭配中，金盏菊零星的橘黄色花朵，起到点缀绿色系组景的氛围，打破了全绿色的沉闷(图 6)。紫芥菜+琉璃苣+羽衣甘蓝+蓝紫色角堇，以紫色调叶色为主，配合蕨叶薰衣草与蓝紫色角堇绽放的花朵使搭配组合感官上更为丰富。

图 5　彩色叶植物组合调搭配平面图和效果图

Fig. 5　The plan and perspective of colorful leave plant

A.姜花(*Hedychium coronarium*); B.香茅(*Cymbopogon citrates*); C.彩叶芋(*Caladium bicolor*); D.夏堇(*Torenia fournieri*)

图 6　紫色、黄色调搭配平面图和效果图

Fig. 6　The plan and perspective of arrangement with purple and orange

A.胡萝卜(*Daucus carota* var. *sativa*)、白萝卜(*Raphanus sativus*);B.金盏菊(*Calendula officinalis*); C.香菜(*Coriandrum sativum*); D.阔叶薰衣草(*Lavandula angustifolia*); E.芹菜(*Otnanthe ljavanica*)

其二，利用互补色搭配原则，对花、果、叶、茎的色彩多色系组合。如丁香罗勒(*Ocimum gratissimum*)+紫菜苔+月季(*Rosa* cv.)+旱金莲+金叶番薯，叶色由前至后，形成金色到绿色到蓝紫色的渐变(图 7)。丁香罗勒和紫菜苔的茎，则形成中景与背景的整体紫色基调。其间，白色的月季花、橘黄色的旱金莲花、明黄色的菜苔花形成点缀。不同部位的色彩在种植组合中，进行不同方位、高度的组合变化，从而形成丰富的造景色彩层次。

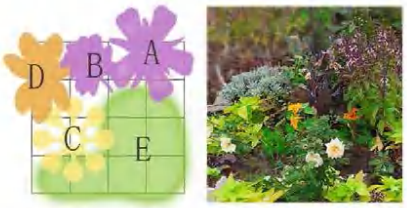


图 7 橙黄、紫红色调搭配平面图和效果图
Fig. 7 The plan and perspective of arrangement with orange and fuchsia
A.旱金莲(*Tropaeolum majus*); B.丁香罗勒(*Ocimum gratissimum*); C.月季(*Rosa* cv.); D.紫菜苔(*Brassica campestris* var. *purpuraria*); E.金叶番薯(*Ipomoea batatas* 'Golden Finger')(每个方格=20 cm × 20 cm)

2.3.3 综合植物生长与管护特点配置丰富且持续的造景

可食用植物组合还可配合不同生长周期的植物及更精细化的种植管理工作，保障植物组合的丰富度及持续性。

一二年生可食用植物可与多年生可食用植物或适当比例的“时令花卉”进行组合。多年生植物色彩变化幅度较小，可以保证整体色调的稳定，如芋(*Colocasia esculenta*)、栀子(*Gardenia jasminoides*)等。而一些“时令花卉”不仅具有观赏价值，还具有生态价值，包括吸引授粉昆虫，起到互利共生的作用，如向日葵、百日菊(*Zinnia elegans*)、夏堇、金盏菊、旱金莲等。

结合植物生长特点，选择播种、扦插、自播繁衍速度不同的种类进行组合，调控可食用植物时间维度上的色彩变化。其中，蕉芋(*Manihot esculenta*)、紫苏(*Perilla frutescens*)、罗勒、香茅、番薯(*Ipomoea batatas*)都是存活率高、生长繁衍速度较快、色彩丰富的植物种类，较常用来调控可食用植物组合。

适当采收植物可丰富或延长植物色彩观赏期，如韭(*Allium tuberosum*)、紫芥菜、羽衣甘蓝、罗勒、油麦菜、薄荷(*Mentha canadensis*)等。紫芥菜+琉璃苣+紫菜苔+羽衣甘蓝+角堇的组合中，紫芥菜、羽衣甘蓝可割后再长，保证景观的可持续性，而琉璃苣可留种并反复采收(图 3)。一些植物新叶与老叶形成色彩差异，亦可丰富组景层次，如红果仔(*Eugenia uniflora*)、月季等。

结合瓜豆类植物生长需求，利用种植辅助设施的高度及色彩变化，丰富可食用植物造景。其中，藤本支架及牵引线是必要的种植辅助设施，一般利用自然材料竹木藤作为牵引可为造景增添浅黄色或褐色。通过自然材料的涂色，或利用塑料、金属材料作为牵引支架，则可在组景中赋予更丰富的色彩。

3 讨论

本研究针对广州地区常见可食用植物色彩的特点、植物色彩搭配的策略进行分析。可食用植物素材在园林造景应用中存在着色彩的局限性。叶色是可食用植物造景中主要的色彩来源，但丰富度有限。花、果是植物色彩较为丰富的部位，但花果期持续时间有限。与此同时，可食用植物易受到天气与虫害影响，出现大面积的植物死亡或缺失问题。因而，可食用植物造景的色彩搭配，在原则上是与一般的园林植物造景相通的。但由于植物素材特殊的食用需求及采收周期限制，色彩搭配应结合生长周期与管养进行细致策划与调整。其中，由于可食用植物食用性及常见植物类型形态的特点，叶色的组合搭配、多部位的色彩组合以及时间维度上的持续度值得重点关注。而可食用植物搭配还可结合植物素材叶形、质感、气味、高度、冠幅的差异深入讨论。

参考文献

[1] Kourik R. Designing and Maintaining Your Edible Landscape Naturally[M]. East Meon, Hampshire, UK: Permanent Publications, 1986.

[2] 任栩辉,刘青林. 可食景观的功能与发展[J]. 农业科技与信息(现代园林), 2015(10): 737-746.

[3] 王远石,周建华. 可食用景观在居住区中的应用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2017,42(01): 109-114.

[4] 高统政,丛沛桐. 城市建成区发展屋顶农业的必要性及可行性[J]. 安徽农业科学, 2017,45(26): 55-57.

[5] 蒋爱萍,刘连海. 可食地景在园林景观中的应用[J]. 林业与环境科学, 2016,32(3): 98-103.

[6] 侯宇. 社区尺度下的城市微农业景观规划设计研究[D]. 郑州: 郑州大学硕士学位论文, 2016.

[7] 栾博,王鑫,黄思涵,邵文威,陈鉴熹. 中国城市可食用景观的设计探索[J]. 风景园林, 2017(9): 36-42.

[8] 代维. 园林植物色彩应用研究[D]. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2007.

[9] 倪黎. 城市园林植物景观设计的色彩应用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学硕士学位论文, 2007.

[10] 徐小东,王建国,陈鑫. 基于生物气候条件的城市设计生态策略研究——以干热地区城市设计为例[J]. 建筑学报, 2011(3): 79-83.

[11] 徐晔春,孙光闻. 食用花卉与瓜果[M]. 汕头: 汕头大学出版社, 2009.

[12] 余文想,李自若. 广州市屋顶栽植可食用植物的适应性评价[J]. 广东园林, 2019(4): 28-33.

[13] 杨艳,余世媛. 可食地景在园林植物景观中的应用[J]. 四川建筑, 2018,38(2): 39-40.

[14] 费中方. 园林植物色彩构成及配置研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2010.

[15] 李勇,汪学明,李世光. 园林植物色彩的搭配[J]. 现代园艺, 2011(17): 60-61.

[16] 李志强. 浅谈园林植物设计中的色彩应用与人的情感心理[J]. 四川林业科技, 2006(3): 76-78.

[17] 张芬,周厚高. 花境色彩设计及植物种类的选择[J]. 广东农业科学, 2012,39(23): 32-36.

[18] 王梦洁,胡希军,金晓玲. 居住区可食用景观营造刍议[J]. 林业实用技术, 2009(1): 48-50.

附表　本研究选取的 200 种(含变种、变型和品种)可食用植物

Appendix　Edible plants selected in the study (200 species, including varieties, forms or cultivars)

植物名	季节	叶色	花色	果色	茎色	植物名	季节	叶色	花色	果色	茎色
百合(*Lilium brownii* var. *viridulum*)	春夏	绿	白	无	无	京水菜(*Brassica pekinensis*)	秋冬	绿	黄	无	无
甘露子(*Stachy sieboldii*)	春夏	绿	红	无	无	紫甘蓝(*Brassica oleracea* var. *capitata*)	秋冬	紫	黄	无	紫
豆薯(*Pachyrhizus erosus*)	春夏	绿	蓝	无	无	菘蓝(*Isatis indigotica*)	秋冬	绿	黄	无	无
桔梗(*Platycodon grandiflorus*)	春夏	绿	紫	无	无	马郁兰(*Origanum majorana*)	秋冬	绿	白	无	无
牛蒡(*Arctium lappa*)	春夏	绿	红	无	无	百里香(*Thymus mongolicus*)	秋冬	绿	红	无	无
菊芋(*Helianthus tuberosus*)	春夏	绿	黄	无	无	蕨叶薰衣草(*Lavandula angustifolia*)	秋冬	绿	紫	无	无
荸荠(*Eleocharis dulcis*)	春夏	绿	绿	无	无	鼠尾草(*Salvia japonica*)	秋冬	绿	紫	无	无
薯蓣(*Dioscorea oppositifolia*)	春夏	绿	白	无	无	芳香万寿菊(*Tagetes lemmonii*)	秋冬	绿	黄	无	无
莲(*Nelumbo nucifera*)	春夏	绿	红	无	无	茼蒿(*Glebionis coronaria*)	秋冬	绿	黄	无	无
慈姑(*Sagittaria trifolia* var. *sinensis*)	春夏	绿	白	无	无	芹菜(*Otnanthe javanica*)	秋冬	绿	白	无	无
蚕豆(*Vicia faba*)	春夏	绿	白	绿	无	芫荽(*Coriandrum sativum*)	秋冬	绿	白	无	无
大豆(*Glycine max*)	春夏	绿	白	绿	无	欧芹(*Petroselinum crispum*)	秋冬	绿	白	无	无
扁豆(*Lablab purpureus*)	春夏	绿	白	绿	无	卷叶欧芹(*Petroselinum crispum*)	秋冬	绿	白	无	无
红花菜豆(*Phaseolus coccineus*)	春夏	绿	红	绿	无	茴香(*Foeniculum vulgare*)	秋冬	绿	黄	绿	无
绿豆(*Vigna radiata*)	春夏	绿	黄	绿	无	莳萝(*Anethum graveolens*)	秋冬	绿	黄	无	无
赤豆(*Vigna umbellata*)	春夏	绿	黄	绿	无	洋葱(*Allium cepa*)	全年	绿	白	无	无
豇豆(*Vigna unguiculata*)	春夏	绿	紫	绿	无	藠头(*Allium chinense*)	全年	绿	紫	无	无
水稻(*Oryza sativa*)	春夏	绿	绿	黄	无	大葱(*Allium fistulosum*)	全年	绿	白	无	无
燕麦(*Avena sativa*)	春夏	绿	绿	黄	无	马齿苋(*Portulaca oleracea*)	全年	绿	黄	无	无
薏米(*Coix chinensis*)	春夏	绿	绿	黄	无	菜蕨(*Diplazium esculentum*)	全年	绿		无	无
玉米(*Zea mays*)	春夏	绿	绿	绿	无	细香葱(*Allii Schoenoprasi*)	全年	绿	红	无	无
蛇瓜(*Trichosanthes anguina*)	春夏	绿	白	绿	无	香荚兰(*Vanilla fragrans*)	全年	绿	白	无	无
黄瓜(*Cucumis sativus*)	春夏	绿	黄	绿	无	越南香菜(*Persicaria odorata*)	全年	绿	绿	无	无
苦瓜(*Momordica charantia*)	春夏	绿	黄	绿	无	香兰叶(*Pandanus amaryllifolius*)	全年	绿	绿	无	无
南瓜(*Cucurbita moschata*)	春夏	绿	黄	绿	无	积雪草(*Centella asiatica*)	全年	绿	绿	无	无
西瓜(*Citrullus lanatus*)	春夏	绿	黄	绿	无	香桃木(*Myrtus communis*)	全年	绿	白	紫	无
西葫芦(*Cucurbita pepo*)	春夏	绿	黄	绿	无	月桂(*Laurus nobilis*)	全年	绿	白	无	无
丝瓜(*Luffa cylindrica*)	春夏	绿	黄	绿	无	木薯(*Manihot esculenta*)	全年	绿	绿	无	无
冬瓜(*Benincasa hispida* var. *chieh-qua*)	春夏	绿	黄	绿	无	蕉芋(*Canna edulis*)	全年	红	红	无	红
砍瓜(*Cucurbita moschata*)	春夏	绿	黄	绿	无	芋(*Colocasia esculenta*)	全年	绿	绿	无	紫
拇指黄瓜(*Cucumis sativus*)	春夏	绿	黄	无	无	金叶番薯(*Ipomoea batatas* 'Marguerite')	全年	黄	紫	无	无
玫瑰茄(*Hibiscus sabdariffa*)	春夏	绿	黄	红	红	芭蕉(*Musa basjoo*)	全年	绿	红	黄	无
红秋葵(*Hibiscus coccineus*)	春夏	绿	黄	红	红	香蕉(*Musa nana*)	全年	绿	紫	黄	无
黄秋葵(*Abelmoschus esculentus*)	春夏	绿	黄	绿	无	酸角(*Tamarindus indica*)	全年	绿	白	黄	无
向日葵'黑天鹅绒女王'(*Helianthus annuus*)	春夏	绿	橙	无	无	番木瓜(*Carica papaya*)	全年	绿	白	黄	无
						凤梨(*Ananas comosus*)	全年	绿	绿	黄	无
向日葵'小夏'(矮生)(*Helianthus annuus*)	春夏	绿	黄	无	无	杧果(*Mangifera indica*)	全年	绿	黄	黄	无
向日葵'冲击力'(*Helianthus annuus*)	春夏	绿	黄	无	无	枇杷(*Eriobotrya japonica*)	全年	绿	白	黄	无
向日葵'模仿画'(*Helianthus annuus*)	春夏	绿	黄	无	无	树番茄(*Cyphomandra betacea*)	全年	绿	白	红	无
向日葵'意大利白'(*Helianthus annuus*)	春夏	绿	黄	无	无	香瓜茄(*Solanum muricatum*)	全年	绿	紫	黄	无
荞麦(*Fagopyrum esculentum*)	春夏	绿	白	黄	红	波罗蜜(*Artocarpus heterophyllus*)	全年	绿	绿	绿	无
菱(*Trapa bispinosa*)	春夏	绿	白	无	无	无花果(*Ficus carica*)	全年	绿	绿	紫	无

(续附表)

植物名	季节	叶色	花色	果色	茎色
辣椒(*Capsicum annuum*)	春夏	绿	白	红	无
番茄(*Lycopersicon esculentum*)	春夏	绿	黄	红	无
挂金灯 (*Physalis alkekengi* var. *franchetii*)	春夏	绿	黄	黄	无
茄子(*Solanum melongena*)	春夏	绿	紫	紫	无
黄花菜(*Hemerocallis citrina*)	春夏	绿	黄	无	无
姜花(*Hedychium coronarium*)	春夏	绿	白	无	无
茗荷(*Zingiber striolatum*)	春夏	绿	黄	无	红
罐木罗勒'亚里士多德' (*Ocimum gratissimum*)	春夏	绿	白	无	无
茭白(*Zizania latifolia*)	春夏	绿	绿	无	无
苦荬菜(*Ixeris polycephala*)	春夏	绿	黄	无	无
菠菜(*Spinacia oleracea*)	春夏	绿	红	无	无
木耳菜(*Basella alba*)	春夏	绿	粉	无	无
红苋菜(*Amaranthus tricolor*)	春夏	红	红	无	红
空心菜(*Ipomoea aquatica*)	春夏	绿	白	无	无
肾茶(*Clerodendranthus spicatus*)	春夏	绿	白	无	无
深蓝鼠尾草(*Salvia guaranitica*)	春夏	绿	蓝	无	紫
蓝花鼠尾草(*Salvia farinacea*)	春夏	绿	蓝	无	无
藿香(*Agastache rugosa*)	春夏	绿	紫	无	无
葫芦巴(*Trigonella foenum-graecum*)	春夏	绿	白	无	无
豆蔻(*Eletteria cardamomum*)	春夏	绿	白	绿	红
良姜(*Alpinia officinarum*)	春夏	绿	白	无	红
山柰(*Kaempferia galanga*)	春夏	绿	白	无	红
姜黄(*Curcuma longa*)	春夏	绿	粉	无	红
野草果(*Amomum koenigii*)	春夏	绿	黄	紫	红
刺芹(*Bryngium foetidum*)	春夏	绿	白	无	无
土豆(*Solanum tuberosum*)	秋冬	绿	紫	无	无
胡萝卜(*Daucus carota* var. *sativa*)	秋冬	绿	白	无	无
白萝卜(*Raphanus sativus*)	秋冬	绿	紫	无	无
樱桃萝卜 (*Raphanus sativus* var. *radculus pers*)	秋冬	绿	紫	无	无
豌豆(*Pisum sativum*)	秋冬	绿	红	绿	无
紫扁豆(*Lablab purpureus*)	秋冬	绿	紫	无	紫
草莓(*Fragaria × ananassa*)	秋冬	绿	白	红	无
旱金莲(*Tropaeolum majus*)	秋冬	绿	橙	无	无
杭白菊(*Chrysanthemum morifolium*)	秋冬	绿	白	无	无
金盏菊(*Calendula officinalis*)	秋冬	绿	黄	无	无
花椰菜(*Brassica oleraceavar*)	秋冬	绿	白	无	无
西蓝花(*Brassica oleracea* var. *italic*)	秋冬	绿	绿	无	无
二月兰(*Orychophragmus violaceus*)	秋冬	绿	紫	无	无
琉璃苣(*Borago officinalis*)	秋冬	绿	蓝	无	无
蒺藜(*Malva verticillata*)	秋冬	绿	白	无	无
红油麦菜 (*Lactuca sativa* var. *longifolia* f.)	秋冬	红	黄	无	无
生菜'罗莎'(红皱叶) (*Lactuca sativa* var. *ramosa*)	秋冬	红	黄	无	无
红莴苣(*Lactuca sativa*)	秋冬	红	黄	无	无
苦苣(*Sonchus oleraceus*)	秋冬	绿	黄	无	无
红脉酸模(*Rumex sanguineus*)	秋冬	绿	红	无	红
球茎茴香 (*Foeniculum vulgare* var. *dulce*)	秋冬	绿	黄	无	无
紫芥菜(*Brassica juncea*)	秋冬	红	黄	无	无
紫菜苔 (*Brassica campestris* var. *purpuraria*)	秋冬	绿	黄	无	紫
青菜(*Brassica chinensis*)	秋冬	绿	黄	无	无
羽衣甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *acephala*)	秋冬	绿	黄	无	无
芥蓝(*Brassica alboglabra*)	秋冬	绿	黄	无	无
大白菜(*Brassica pekinensis*)	秋冬	绿	黄	无	无
抱子甘蓝 (*Brassica oleracea* var. *gemmifera*)	秋冬	绿	黄	无	无
榨菜(*Brassica juncea* var. *tumida*)	秋冬	绿	黄	无	无
芜菁(*Brassica rapa*)	秋冬	绿	黄	无	无
擎蓝(*Brassica caulorapa*)	秋冬	绿	黄	无	无
油菜(*Brassica napus*)	秋冬	绿	黄	无	无
雪里蕻(*Brassica juncea*)	秋冬	绿	黄	无	无
桑(*Morus alba*)	全年	绿	绿	紫	无
人心果(*Manilkara zapota*)	全年	绿	白	黄	无
石榴(*Punica granatum*)	全年	绿	红	红	无
红果仔(*Eugenia uniflora*)	全年	红	白	红	无
洋蒲桃(*Syzygium samarangense*)	全年	绿	白	红	无
蒲桃(*Syzygium jambos*)	全年	绿	白	黄	无
嘉宝果(*Plinia cauliflora*)	全年	绿	白	紫	无
荔枝(*Litchi chinensis*)	全年	绿	黄	红	无
红毛丹(*Nephelium lappaceum*)	全年	绿	黄	红	无
龙眼(*Dimocarpus longan*)	全年	绿	黄	黄	无
假苹婆(*Sterculia lanceolata*)	全年	绿	红	红	无
百香果(*Passiflora edulis*)	全年	绿	紫	紫	无
火龙果(*Hylocereus undatus* 'Fon-Lon')	全年	绿	白	红	无
柑(*Citrus reticulata*)	全年	绿	白	橙	无
橙(*Citrus sinensis*)	全年	绿	白	橙	无
柚(*Citrus maxima*)	全年	绿	白	橙	无
金桔(*Fortunella margarita*)	全年	绿	白	橙	无
柠檬(*Citrus limon*)	全年	绿	白	黄	无
椰子(*Cocos nucifera*)	全年	绿	黄	黄	无
阳桃(*Averrhoa carambola*)	全年	绿	红	黄	无
紫藤(*Wisteria sinensis*)	全年	绿	紫	无	无
鸡蛋花 *Plumeria rubra* cv. *acutifolia*)	全年	绿	白	无	无
木棉(*Bombax malabaricum*)	全年	绿	红	无	无
白兰(*Michelia alba*)	全年	绿	白	无	无
桂花(*Osmanthus fragrans*)	全年	绿	白	无	无
金银花(*Lonicera japonica*)	全年	绿	黄	无	无
冰叶日中花 (*Mesembryanthemum crystallinum*)	全年	绿	白	无	无
生菜'自助餐'(酒红橡叶) (*Lactuca sativa* var. *ramosa*)	全年	红	黄	无	无
生菜'小珍珠'(绿皱叶) (*Lactuca sativa* var. *ramosa*)	全年	绿	黄	无	无
菊苣(*Cichorium intybus*)	全年	绿	蓝	无	无
甜红叶菜 (*Beta vulgaris* var. *cicla* 'Vulkan')	全年	红	红	无	红
橙梗甜菜(*Beta vulgaris* var. *cicla* 'Bright Yellow')	全年	绿	红	无	红
西洋菜(*Nasturtium officinale*)	全年	绿	白	无	无
芝麻菜(*Eruca sativa*)	全年	绿	白	无	无
苋菜(*Amaranthus tricolor*)	全年	绿	绿	无	无
三裂叶薯(*Ipomoea triloba*)	全年	绿	紫	无	红
紫叶番薯(*Ipomoea batatas* 'Black Heart')	全年	紫	紫	无	紫
芦笋(*Asparagus officinalis*)	全年	绿	白	无	无
分葱(*Allium fistulosum* var.*caespitosum*)	全年	绿	白	无	无
留兰香(*Mentha spicata*)	全年	绿	白	无	红
薄荷(*Mentha canadensis*)	全年	绿	白	无	无
柠檬香蜂草(*Melissa officinalis*)	全年	绿	白	无	无
甜牛至(*Origanum vulgare*)	全年	绿	白	无	无
热那亚甜罗勒(*Basil genovese*)	全年	绿	白	无	无
九层塔(*Ocimum basilicum*)	全年	绿	白	无	无
迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)	全年	绿	蓝	无	无
丁香罗勒(*Ocimum gratissimum*)	全年	绿	紫	无	紫
碰碰香 (*Plectranthus hadiensis* var. *tomentosus*)	全年	绿	紫	无	无
紫苏(*Perilla frutescens*)	全年	紫	红	无	紫
紫罗勒 (*Ocimum basilicum* 'Purple Ruffles')	全年	紫	紫	无	紫
香茅(*Cymbopogon citratus*)	全年	绿	无	无	无
姜(*Zingiber officinale*)	全年	绿	白	无	无
艾草(*Artemisia argyi*)	全年	绿	黄	无	无
甜万寿菊(*Tagetes lucida*)	全年	绿	黄	无	无
茉莉(*Jasminum sambac*)	全年	绿	白	无	无
鱼腥草(*Houttuynia cordata*)	全年	绿	白	无	无
韭(*Allium tuberosum*)	全年	绿	白	无	无
大蒜(*Allium sativum*)	全年	绿	白	无	无
芸香(*Ruta graveolens*)	全年	绿	黄	无	无

注："无"代表无观赏性。

亚热带植物科学 被国内数据库收录：

中国期刊全文数据库(CJFD)
中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)
中国生物学文摘(CBA)
中国台湾华艺中文电子期刊服务资料库(CEPS)
中国核心期刊(遴选)数据库(http://www.ccjad.net)
中国生命科学文献数据库(http://www.cba.ac.cn)
国家科技期刊开放平台 (http://doaj.istic.ac.cn)
中国期刊引证报告(扩刊版)(http://csci.istic.ac.cn/)
中国知网(http://www.cnki.net)
中文科技期刊数据库(http://qikan.cqvip.com)
中国学术期刊数据库(http://c.wanfangdata.com.cn/periodical)
超星域出版期刊(http://qikan.chaoxing.com)
博看网(http://new.bookan.com.cn)
中教数据库(http://www.zjdata.net)

亚热带植物科学
YAREDAI ZHIWU KEXUE
（双月刊　1972 年创刊）
第 49 卷　第 3 期　2020 年 6 月

Subtropical Plant Science
（Bimonthly, Started in 1972）
Vol. 49　No. 3　June 2020

主　管　厦门市科学技术局
主　办　福建省亚热带植物研究所
主　编　邱晓晖
编辑出版　《亚热带植物科学》编辑部
科学出版社
地　址　厦门市嘉禾路 780 号(361006)
电　话　0592-5654157
电子信箱　yrdzwkx@126.com
网　址　www.yrdzwkx.com
印　刷　厦门集大印刷厂
国内发行　科学出版社
订 购 处　全国非邮发报刊联订服务部
(天津市河西区大寺泉集北里别墅 17 号 300381)
国外发行　中国出版贸易对外总公司
（北京 782 信箱 100011）
数字发行　博看网 http://www.bookan.com.cn

Supervised by Xiamen Municipal Bureau of Science & Technology
Sponsored by Fujian Institute of Subtropical Botany
Editor-in-Chief QIU Xiao-hui
Edited & Published by Editorial Department of Subtropical Plant Science; Science Press
Add. 780 Jiahe Road, Xiamen 361006, Fujian China
Tel. 0592-5654157
E-mail yrdzwkx@126.com
Website www.yrdzwkx.com
Printed by Xiamen Jida Printing House
Domestic Distributed by Science Press
Overseas Distributed by China National Publishing Industry Trading Corporation
(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)
Digital Distribution http://www.bookan.com.cn

ISSN 1009-7791

中国标准连续出版物号：ISSN 1009-7791
CN 35-1243/S

国内定价：15.00 元

3.6. 园林植物科普微视频设计制作探索

主　管：中国科学技术协会
主　办：中国科技新闻学会
出　版：《新媒体研究》杂志社

New Media Research
新媒体研究
XINMEITI YANJIU

本刊声明

凡投稿本刊的稿件，作者文责自负，确保稿件不涉及保密事项，署名无争议。对于以任何形式侵犯他人著作权行为，作者应独立承担法律责任，本刊概不承担任何连带责任。作者来稿不代表本刊观点。

本刊文章收录于中国知网、万方数据等。来稿凡经使用，如本刊未收到作者发来的数字版等方面的特殊声明，即视为全体著作权人同意将稿件的复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权转让给本刊的出版单位《新媒体研究》杂志社。本社可以将上述权利转授给第三方使用。

投稿方式

稿件请以word格式文件附件方式，直接发到投稿邮箱：nmrmagz@126.com。

编辑部电话：(010)64462956　64462811
发行部电话：(010)64465797
投稿邮箱：nmrmagz@126.com
微信公众号：新媒体研究杂志

中国标准连续出版物号：ISSN 2096-0360 / CN 10-1330/G2

创刊年份：2015
刊　　期：半月刊
出版日期：每月10日和25日
发行范围：公开发行
国内发行：北京市报刊发行局
邮发代号：80-773
印　刷　厂：廊坊市瀚源印刷有限公司
编辑部地址：北京市朝阳区东土城路8号
　　林达大厦A座23层A室
邮　　编：100013
定　　价：18.00元

目　次　CONTENTS

《新媒体研究》半月刊　2022年第14期 第8卷 7月（下）总第178期

园林植物科普微视频设计制作探索

张　铭，丰　颖，冼丽铧，翁殊斐，冯志坚

摘　要　通过调查和分析网络上具有代表性的科普微视频，总结目前网络上科普微视频的制作方法、呈现形式和设计内容，对园林植物类植物科普微视频展开制作应用的探索。结合问卷调查，设计并制作出园林植物科普方面的微视频。通过对制作视频的效果分析，探讨符合大众需求的微视频形式，提出制作园林科普微视频要注重植物文化和内在价值、挑选科学的准确知识和运用艺术的视频风格、提炼内容且尽量精简等的建议，为园林植物微视频的制作与应用提供一定的理论参考。

关键词　植物科普；园林植物；微视频；视频制作

中图分类号　G2　　**文献标识码**　A　　**文章编号**　2096-0360（2022）14-0034-06

DOI:10.16604/j.cnki.issn2096-0360.2022.14.025

植物学科普是现代科普事业的一个不可或缺的重要分支[1]。随着信息时代的突飞猛进，尤其在“互联网+”背景下，传统的植物学科普教育模式已无法跟上时代的脚步，也无法满足学习者对快速掌握即时信息的强烈诉求[2]。科普微视频将枯燥的植物知识可视化，加入新颖的元素，利用通俗幽默的语言，使其更富有艺术感染力，开阔大众的视野，从而激发大众对获取和探索自然的热情。然而，目前关于园林植物方面的科普微视频教学应用及研究较少。

在城市绿地规划建设进程中，园林植物已经遍布城市的每一个角落，人与植物开始产生更多的联系。科普园林植物使公众认识到保护植物的迫切需求并不断增强公众的环保意识[3]。在景观营造中，植物能带来独特的意境，让外在美与意象美结合，带来更好的园林观赏价值。如果对自然的认识仍然停留在以往狭隘的层面上，只会让我们将自然模式化，将景观符号化[4]。因此，园林植物的科普不应局限于对植物自身的介绍，而要对植物的内涵及其观赏价值进行科普，让大众更好地感受植物景观的魅力。在园林植物知识普及的过程中，微视频具有播放时间短、传播速度快等特征，能让受众在短时间内了解园林植物知识。基于科普微视频的发展现状，本文研究科普微视频的呈现方式和应用现状，并对园林植物科普微频展开制作应用的探索，为微视频在园林植物科普和教学中的应用提供参考。

1　材料与方法

由于现存网络科普微视频较多，内容参差不齐，本次选择的视频案例要具有一定的代表性。为了保证数据的丰富性，需选择不同国家、机构、创作单位的视频[5]。因此，综合考虑内容的可靠性、播放量的准确性、数据的丰富性、类型的多样性这四方面的因素，分别从国内国外各大网络视频平台挑选出以下科普微视频节目作为本次分析的对象：杨晓洋的水果世界、博物杂志、飞碟说、TED-Ed、AsapSCIENCE（表1）。

对这些案例的画面呈现、内容设计等方面进行分析和总结，提炼出可以适用于园林植物科普视频设计的部分。对学生和群众进行关于园林植物科普微视频看法的问卷调查，设计并制作出一个园林植

基金项目：2021年度广东省高等教育教学改革项目（JG21009）；华南农业大学大学生创新创业训练计划项目（X202110564013X）。

作者简介：张　铭，华南农业大学林学与风景园林学院，硕士研究生在读，研究方向为风景园林植物应用。
丰　颖，华南农业大学林学与风景园林学院，本科在读，研究方向为风景园林植物应用。
冼丽铧（通讯作者），华南农业大学林学与风景园林学院，实验师，研究方向为风景园林植物应用。
翁殊斐，华南农业大学林学与风景园林学院，副教授，研究方向为风景园林植物应用。
冯志坚，华南农业大学林学与风景园林学院，副教授，研究方向为植物资源评价与利用。

表 1　本次研究科普微视频节目概况

节目名称	来源	播放平台	总播放量（亿）	订阅量/粉丝数（万）	呈现方式（主要）
杨晓洋的水果世界	国内	哔哩哔哩、腾讯视频	0.21	34.1	博主出镜
博物杂志	国内	哔哩哔哩	0.17	32.6	Vlog
飞碟说	国内	优酷、腾讯视频、爱奇艺、哔哩哔哩、微博、微信、抖音	1.9	137.3	动画
TED-Ed	国外	TED、YouTube	23.1	1 340	动画
AsapSCIENCE	国外	YouTube	14.8	958	手绘定格动画

注：国内案例共有播放平台为哔哩哔哩，总播放量和订阅量 / 粉丝数由哔哩哔哩统计；国外案例的总播放量和订阅量 / 粉丝数由 YouTube 统计；播放量和订阅量 / 粉丝数截至 2021-03-09。

物科普方面的微视频。利用访谈法对制作视频进行效果分析，探讨符合学生以及群众需求的微视频形式。最后，提出制作园林科普微视频的相关建议，为园林植物微视频的制作与应用提供参考与借鉴。

2　结果与分析

2.1　样本选取与问卷设置

问卷设计分为基础信息调查和公众调查部分。基础信息主要调查了受调查者的性别、年龄、受教育程度、职业情况，确保问卷的真实有效性。公众调查的内容涉及公众对园林植物科普微视频具体内容的看法与建议。调查进行时间为 2021 年 1 月 19 日至 2021 年 2 月 19 日，借助问卷星平台制作问卷，并将生成的问卷链接在微信、QQ 等社交平台进行发放，一共发放了 270 份问卷，共收回 255 份有效问卷。

2.2　公众对园林植物科普微视频具体内容的看法与建议

在园林植物类科普微视频的时长设计方面（图 1），公众更偏向于 2 ～ 5 min 内（包括 5 min）的科普微视频。时间较长的科普微视频会让人容易失去耐心观看，从而使微视频失去传达知识的目的，其占用较多时间，并不适合现代人的碎片化生活；2 min 以内的科普微视频虽然简短，但不适合信息量较大的内容，提炼内容的难度也会提高。时间限制在 2 ～ 5 min 内的园林植物科普微视频，能在有限的时间内让人们专注于视频内容，吸收视频所传达的知识。

当前，网络上比较多的科普微视频是介绍植物的基础知识和植物之间的辨别，内容简单且容易

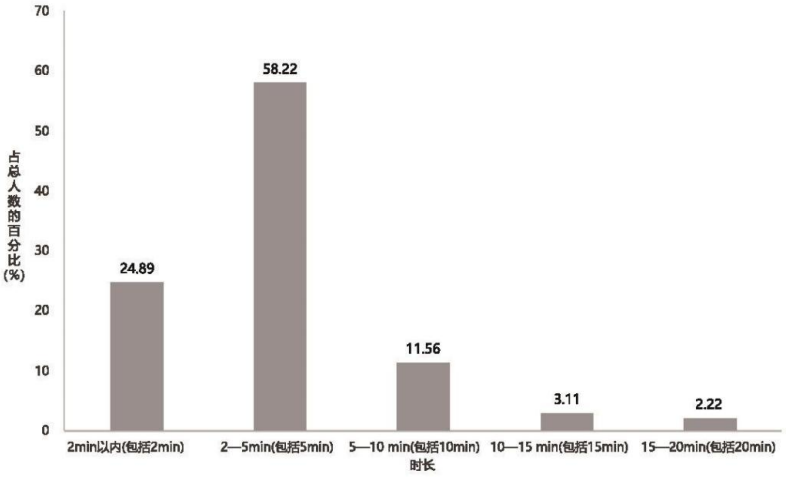


图 1　公众认为比较合适的园林植物科普微视频时长

创作，但容易流于形式。从图 2 的数据可以得知，42.67% 的受调查者更偏向于了解园林植物的应用与价值，其次是植物的文化。园林植物作为园林绿化中的重要材料，在城市生活中发挥着多种功能。园林植物并不是独立于环境当中，而是与居住在环境中的人类有着密切相关的联系。有必要让大众了解园林植物的应用与价值，认知园林植物的生态功能和观赏价值，加深大众对所居住环境的认知和联系。另外，植物科普一个很重要的功能是宣传植物文化。宣传植物文化会极大地丰富植物的趣味性，提升了植物的内涵 [6]。与常见的植物科普微视频不同，介绍植物的应用价值与文化更符合园林植物方面，更能为制作者发挥园林专业的特长。

然而一个精彩的科普视频的内容是丰富多样的，单纯地介绍一个知识点会让人觉得枯燥乏味。因此，在园林植物类科普微视频制作中，需要多方面内容的组合。近半数受调查者在科普微视频的呈现方式上倾向于多形式的结合（如图 3 所示），其次是图文并茂的形式。图文并茂的形式包括动画的形式，但是动画形式的视频制作需较高的专业水平，制作过程较为复杂且制作周期长，因此本次视频制作实践不考虑使用动画的形式呈现。真人出镜口述的视频显得过于正式，与课堂教学无异，这种方式较为枯燥且为一种被动吸收的状态。因此，多形式结合的视频更适合用以表达园林植物知识。首先，真实清晰的植物图像或视频有利于直观地表达出植物的形态以及外观。其次，适当的原创二维图像更吸引大众的眼球，为视频增添活力。最后，动态画面能增添视频的生动性。

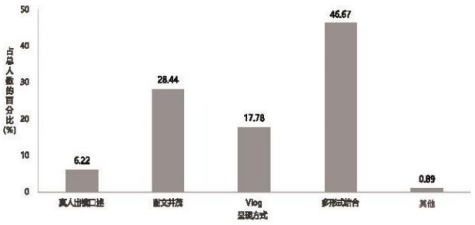


图 3　公众更喜欢园林植物科普微视频的呈现方式

在关于园林植物类科普微视频背景音乐方面的讨论中（图 4），大部分人认为需要添加背景音乐，占调查总人数的 57.33%，而 27.11% 的人持无所谓的态度。由此可见，背景音乐是科普视频重要的一部分。但是，不适合的背景音乐不仅会影响视频的观看，而且会削弱科普内容传达的效果。设计园林植物科普微视频时，挑选一个符合视频内容与形式的背景音乐是非常重要的。

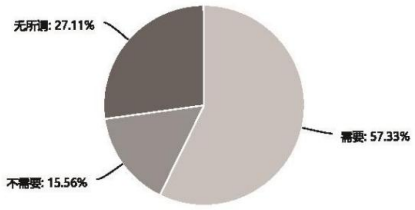


图 4　是否需要添加背景音乐

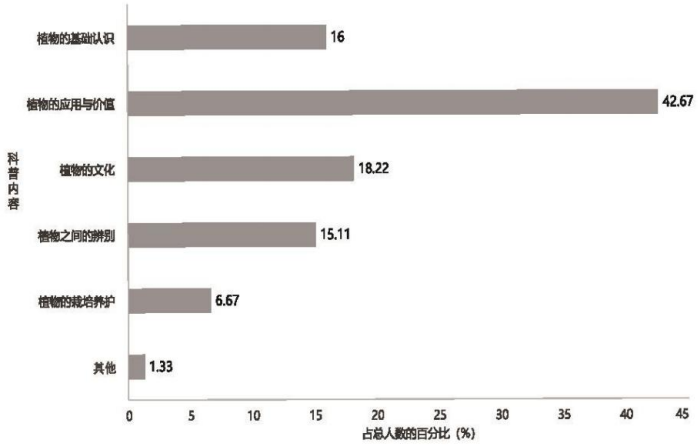


图 2　公众更喜欢科普的园林植物的内容

从图 5 的数据中，可看出在园林植物科普微视频是否需要添加字幕这个问题上接近 90% 的受调查者认为需要添加字幕作为学习的辅助。添加字幕能加深观看者对园林植物知识印象。特别是在介绍专有名词或者是名词里出现生僻字时，字幕有助于观看者理解视频传达的知识。因此，字幕也是园林植物科普微视频构成里必不可少的内容。

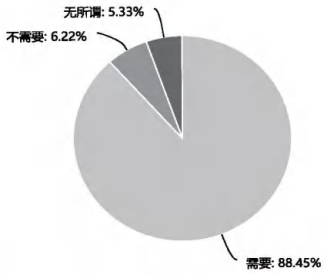


图 5　关于园林植物科普微视频是否需要添加字幕

在调查公众对园林植物科普微视频的建议的结果中，出现最高频的词汇是“有趣”。也就是说需要注重视频的趣味性，大多观众比较反感的是视频里古板的知识传达。比较规矩的图文式传达，不太容易让观众耐心看完。面对大多数接触植物较少的观众，趣味性能够提起观众对视频的兴趣。在视频的趣味性提升方面，受调查者提出内容设计要关注文化和时事热点，将其结合视频内容，这样才能加强与观众的联系；科普内容挑选时，抓住植物的独特之处；另外，叙述的语言也需要生动有趣，不能像新闻报道一样平铺直叙地讲解。

实际上，对科普微视频来说，科学性也是非常重要的。受调查者也提出了园林植物科普微视频要“准确可靠”，也可以看出大众比较反感错误的科普。网络上的科普微视频质量参差不齐，一些不专业的视频传达出错误的观点与知识的后果是难以预估的。因此，园林植物科普微视频的内容表达需要科学性与通俗性的结合。

2.3　园林植物科普微视频的设计与制作

2.3.1　园林植物科普微视频设计

植物科普是自然教育的基础内容，也是公众认为最想知道的教育内容，属于日常科普内容。植物作为环境构建的骨架，在平时的生活中，随处可见，且易于观察，四季各异，具有良好的观赏性和实用性[7]。本次视频制作实践选择大众身边熟悉的园林植物——细叶榕（*Ficus microcarpa*）作为科普内容。植物的科普的最终目的并不是简单地让人们认知植物，而是让人们在欣赏植物外表形态的同时，也会关注植物的生态和内在价值[8]。因此，本次细叶榕的科普着重介绍其景观价值以及给城市环境带来的困扰。

科普微视频的元素单个或者多个组合出现都带着其观赏性和隐藏含义，这种双重表达方式需要制作者在创作作品之前根据作品所要表达的主题和所普及的科学知识来确定作品整体的风格，简单来说，在制作科普微视频前应当确定视频风格以保证最后制作出的感官效果[9]。作为园林植物类科普微视频少不了要对受众传达植物的外观，所以植物摄影图像是视频表达的最佳的选择。但单一的摄影图片或者视频播放会使科普视频整体风格略显枯燥，而动画形式的视频制作周期长、难度高。所以视频的呈现在真实图片和视频的基础上，插入一些较为简单的原创二维图片进行过渡或者演示（如图 6、7 所示）。

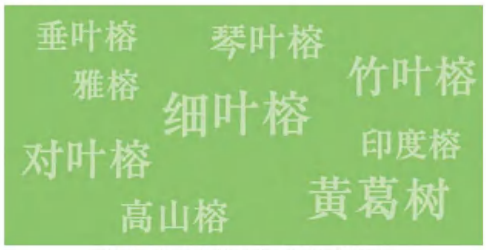


图 6　本次视频制作的图片素材图

图 7　本次视频制作的图片素材

脚本设计是微视频开发前的重要一环，直接影响旁白配音、素材选择和画面风格。脚本设计主要包括文字稿本以及分镜头脚本的设计[10]。文字稿本的语言注重日常化、口语化，把抽象的理论知识转化为通俗易懂的语言，忌讳书面化。本次用总分的叙述方法，先引出主题介绍细叶榕，接着分两部分介绍其生态与价值。被称为“视频故事板”的视频分镜头脚本，制作者将作品稿本通过镜头语言重新梳理，通常动画分镜头脚本是由一组独立镜头画面构成，包括镜画内容、镜号景别、镜头运动、镜头时长、台词、声效、剧本简介等主要元素构成[11]。本次视频相对于动画来说较简单，因此脚本构成只需要由画面、解说、镜头时长、特效构成。由于脚本篇幅较长，表 2 仅展示脚本片段。

表 2　园林植物科普——细叶榕视频制作脚本（片段节选）

序号	画面	解说	特效	时长/s
14		但当你的目光随着树干上移却会发现，这“几棵”树的枝干其实相互之间是连在一起的	画面从下往上移动	70～79
15		另外，细叶榕不耐寒，对生长环境要求不严格，因此可以在石灰石假山或者建筑物缝隙这种相对极端的环境中萌发生长	画面从局部转变为整体	79～94
16		无	从左方滑入画面	94～97
17		很多城市都喜欢将细叶榕作为行道树	展示两张图片	97～103

2.3.2　园林植物科普微视的制作

基于本次“公众对园林植物科普微视频的看法”的问卷调查以及各大网络平台上优秀视频案例分析，制作一个园林植物类的科普微视频。视频素材由摄影图片、摄录视频以及二维图片组成。大部分照片和视频由相机拍摄而成，部分图片由于时间和地点的原因无法拍摄只能取自网络。二维图片是利用专业图形处理软件 Adobe Photoshop 进行制作。配音配乐是科普微视频制作中必不可少的一部分，好的视听体验给人带来美的享受[9]。根据视频的呈现，选择普通话较为标准的女性为视频配音，能将知识更清晰地传达给受众。为了更加配合园林植科普的主题，背景音乐选择偏向轻快活泼的风格，配合女性配音员地解说词更能舒缓受众地情绪，对于在被“碎片化”地生活更加容易接受。视频的最终合成可以通过使用 Adobe Premiere 这一专业剪辑软件来完成。利用此软件，按照科普微视频的脚本设计，导入制作好的素材，进行视频、音频和图片的剪辑，制作特效和添加字幕，最后导出完整的视频文件。

2.4　科普微视的制作效果分析

为了解“园林植物科普——细叶榕”微视频的科普效果和制作效果，采取访谈法对制作的视频进行评价。限于时间和地点的原因，访谈的具体进行方式为线上微信访谈。访谈对象为在校大学生，选择在校大学生理由如下：大学生是年轻的一代，对

新鲜事物的接受程度较高，有自己的独特见解，能为科普微视频提出好的意见。本次访谈内容包含科普效果和制作效果两个维度。

在本次微视频科普效果方面，受访谈者均表示观看完视频后对细叶榕有了一定的了解。令大部分人印象深刻的知识点是细叶榕的气生根，以及细叶榕的根系有着横向生长的特点。受访者均表示这些知识点较贴近生活，容易记住。对于视频里出现的画面，能够被肯定的地方是选图准确、新颖，能简单明了地把细叶榕的知识表达出来。但是部分图片不够清晰，画面之间缺乏衔接，如果用一些动画效果来处理画面衔接会更好。在访谈中，大部分受访者建议添加动画素材使视频更灵动。比如在介绍某植物器官时在图片上加入一些标志性符号，指明其具体位置；针对本次视频，大部分受访者均表示解说语言清晰、准确，但有小部分人提出语言需要更加简练，配音的感情需要更加丰富、语速需加快。而时长方面是在可接受范围内，更简短一些可能会更好。我们处于“碎片化”的时代，冗长的视频是吸不了引受众去观看的。关注视频的长度和解说的有效性，让受众短时间内吸收知识，是当前科普视频创作者的目标。

在访谈的最后，受访者提出了对本视频的建议，比如在视频结束时，可以增加一个片尾或者结束语来结束整个视频，有助于视频结构的完整；希望能拓展细叶榕的其他价值，如药用价值；以及解答一下诸如“细叶榕的果实能不能吃”等人们喜闻乐见的问题。

3 结论与讨论

3.1 网络科普微视频的特征

总体来说网络上的科普微视频质量参差不齐，因此需要综合考虑内容的可靠性、播放量的准确性、数据的丰富性、类型的多样性这四个特性来挑选视频案例。分析视频案例，发现网络上的科普微视频常利用社会热点话题，用幽默诙谐的语言、多样的呈现形式来表达科普内容。而为了使视频同时具备科学性与趣味性，视频每个环节都经过作者的精心设计。每类视频都有独特的风格，呈现形式也不尽相同，有博主出镜、图文结合、动画、Vlog 等形式。

3.2 园林植物类科普微视频的设计制作建议

基于问卷调查以及制作园林植物类科普微视频得出的经验以及访谈结果，得出以下设计与制作园林植物科普微视频的建议：

1）内容是媒介的灵魂，是吸引用户的关键[12]。视频选择独特的角度作为科普内容，做到重点突出，达到让受众对该知识点印象深刻的目的。植物科普内容除了要注重植物文化和内在价值外，也可以从身边熟悉植物入手，讲解其独特之处，更易让人记住；2）就科普作品而言，其设计必须坚持科学性与艺术性相统一[13]。科普作品面向大众，能吸引大众的才是好的作品。在设计园林植物科普微视频时，可以考虑挑选科学的准确知识和运用艺术的视频风格；3）在园林植物类科普微视频的制作上，需要注意提炼需表达的内容，视频应尽量精简，时长控制在 2 ～ 5 min 内。解说词的设计要考虑知识点如何层层推进，即知识点之间需要连贯性；4）视频不一定全由动画构成，利用多形式的呈现方式来表达，适当地加入动画素材和动画特效会使视频更为生动活泼；5）在背景音乐选择上，园林植物科普类视频更适合轻松、灵动风格的背景音乐；6）视频结束时，可以增加一个片尾或者结束语来总结整个视频，使视频在结构上更为完整。

参考文献

[1] 汪明丽.我国植物园科普教育公共科学活动的研究[D].武汉：华中科技大学，2015.
[2] 马仲辉，邹承武，张平刚，等.“互联网+”背景下高校校园植物科普教育及网络建设初探：以广西大学为[J].广西农学报，2015，30（6）：68-69.
[3] 侯晨冉，王美仙，董丽.“以学习者为中心”的美国南部植物园科普活动研究[J].中国城市林业，2021，19（1）：111-116.
[4] 王向荣.五本书和一片园圃[J].中国园林，2011，27（6）：23-24.
[5] 王梦瑶.科普微视频评价标准研究[D].上海：上海师范大学，2018.
[6] 赵迎春，刘萍，胡亚萍.公园植物科普推广平台的建设探索：以何园为例[J].现代园艺，2018（3）：133-134.
[7] 杜家烨.自媒体视域下的自然教育实践[D].杭州：浙江农林大学，2018.
[8] 张元燕，周兰平，杨勋，等.基于二维码技术的植物科普系统[J].广东园林，2014，36（3）：62-64.
[9] 张淼羿.科普微视频《智慧支付》的创意与制作[D].扬州：扬州大学，2019.
[10] 朱雯.《声音的认知》系列科普微课的设计与开发[D].扬州：扬州大学，2018.
[11] 彭立，伍晓敏.浅谈动画短片中的分镜头语言[J].大众文艺，2017（10）：191.
[12] 马涛.网络视频，以内容为本[J].广告大观：媒介版，2010（2）：26-28.
[13] 赵玉娜，马俊刚.关于科普微视频设计的若干思考[J].科普研究，2018，13（4）：5-10，104.

新媒体研究

XINMEITI YANJIU

2022年第14期（7月下）

编辑部电话：010-64462956
010-64462811
投稿邮箱：nmrmagz@126.com
微信公众号：新媒体研究杂志

ISSN 2096-0360
CN 10-1330/G2

邮发代号：80-773
定　　价：18.00元

四、科研成果

1.科技奖励证书

广东省农业技术推广奖

获奖证书

为表彰在农业技术推广工作中做出贡献的单位和个人，特颁发此证书，以资鼓励。

获奖项目：水源林和生态风景林高效可持续经营关键技术研究与推广

奖励等级：二等奖

奖励个人：冼丽铧

奖励日期：2023年12月21日

证 书 号：2022-2-L04-R02

广东省农业技术推广奖
评审委员会

2.知识产权

2.1.专利授权证书

证书号第7383065号

专利公告信息

发明专利证书

发 明 名 称：一种基于VR技术的场地生态因子数据识别散热系统

专 利 权 人：华南农业大学

地　　址：510000 广东省广州市天河区五山路

发　明　人：冼丽铧;郑峰霖;高伟;刘邑君;阙青敏;徐韫琳

专　利　号：ZL 2023 1 1457814.3　　授权公告号：CN 117406842 B

专利申请日：2023年11月04日　　授权公告日：2024年09月17日

申请日时申请人：华南农业大学

申请日时发明人：冼丽铧;郑峰霖;高伟;刘邑君;阙青敏;徐韫琳

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法进行审查，决定授予专利权，并予以公告。

专利权自授权公告之日起生效。专利权有效性及专利权人变更等法律信息以专利登记簿记载为准。

局长
申长雨

国家知识产权局
2024年09月17日

第1页(共1页)

证书号第20959671号

实用新型专利证书

实用新型名称：可调节伸缩旋转支架

发　明　人：冼丽铧;郑峰霖;古佳玮;卢德浩;李静;常博文

专　利　号：ZL 2023 2 2519773.8

专利申请日：2023年09月18日

专利权人：华南农业大学

地　　址：510000 广东省广州市天河区五山

授权公告日：2024年05月17日　　授权公告号：CN 220965830 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

国家知识产权局
2024年05月17日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第20959671号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年09月18日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

华南农业大学

发明人：

冼丽铧;郑峰霖;古佳玮;卢德浩;李静;常博文

证书号第19506014号

实用新型专利证书

实用新型名称：一种降雨渗透的模拟实验装置

发　　明　　人：杨源通;洗丽铧;曾曙才;吴道铭;冯为迅;鲍利安;梁智淇

专　　利　　号：ZL 2023 2 0572394.2

专 利 申 请 日：2023年03月22日

专　利　权　人：华南农业大学

地　　址：510610 广东省广州市天河区五山

授 权 公 告 日：2023年08月15日　　授权公告号：CN 219532850 U

国家知识产权局依照中华人民共和国专利法经过初步审查，决定授予专利权，颁发实用新型专利证书并在专利登记簿上予以登记。专利权自授权公告之日起生效。专利权期限为十年，自申请日起算。

专利证书记载专利权登记时的法律状况。专利权的转移、质押、无效、终止、恢复和专利权人的姓名或名称、国籍、地址变更等事项记载在专利登记簿上。

局长
申长雨

国家知识产权局
2023年08月15日

第 1 页 (共 2 页)

其他事项参见续页

证书号第19506014号

专利权人应当依照专利法及其实施细则规定缴纳年费。本专利的年费应当在每年03月22日前缴纳。未按照规定缴纳年费的，专利权自应当缴纳年费期满之日起终止。

申请日时本专利记载的申请人、发明人信息如下：

申请人：

华南农业大学

发明人：

杨源通;冼丽铧;曾曙才;吴道铭;冯为迅;鲍利安;梁智淇

2.2.软件著作权证书

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第11794190号

软 件 名 称：参数化风景园林植物配置虚拟仿真实验软件 V1.0

著 作 权 人：华南农业大学

开发完成日期：2023年04月23日

首次发表日期：2023年04月26日

权利取得方式：原始取得

权 利 范 围：全部权利

登 记 号：2023SR1207017

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

2023年10月10日

華南農業大學
South China Agricultural University

技术成果申请专利（软件著作权）审批

拟申请软件著作权名　称	参数化风景园林植物配置虚拟仿真实验软件		
申请人	华南农业大学	申请类型	软件著作权
联 系 人	冼丽铧	手机号码	13760755892
E-Mail	xianlihua@scau.edu.cn		
发明人			
第一发明人	冼丽铧	性　别	女
所在单位	林学与风景园林学院	职　称	实验师

姓　名	性　别	所在单位	职　称
苏艳	女	林学与风景园林学院	高级实验师
吴奉奇	女	林学与风景园林学院	实验师

支持课题情况	
课题名称	新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系的探索与研究
课题来源及编号	2021年度广东省高等教育教学改革项目“新工科背景下生态融合的风景园林专业实践教学体系创新研究”（JG21009）
申请类别	☐发明专利　☐实用新型专利　☐外观设计专利
代理机构名称	北京华夏博通专利事务所（普通合伙） 代理机构资质查询：http://www.acpaa.cn/view/agencySearch.jhtml
拟申请软件著作权简　介	参数化风景园林植物配置虚拟仿真实验软件，可以查询常见华南地区园林植物集成信息，对园林植物的植物景观进行虚拟配置操作，提供高效信息化模式，便利和综合的管理模式，学生用户可随时处理、设计、修改植物配置的效果等信息，搭载良好的虚拟配置和设计管理平台，满足教学需求。
发明人承诺	本人将按照学校有关规定，积极配合学校知识产权办的工作，做好专利（软件著作权）申请过程中的答复等相关事宜，并及时将收到的有关通知、材料交学校知识产权办处理。

是否为第一发明人	◉是　○否	日　期	2023-08-03	

所在单位审核	本人代表学院对该专利（软件著作权）申请进行了审查。 学院将积极配合学校督促发明人按照学校的有关规定和工作需要做好该专利（软件著作权）的申请、宣传、转化等工作。			
	审核人	何茜	审核时间	2023-08-07

科研院业务科室科员审核	科研院已备存，无需提交纸质版专利（软件著作权）审批表；如有材料需加盖公章，请在办事服务大厅--知识产权类材料用章申请办理。			
	审核人	秦晓艺	审核时间	2023-08-08

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号：软著登字第12436036号

软 件 名 称：场地生态学虚拟仿真平台软件 V1.0

著 作 权 人：华南农业大学

开发完成日期：2021年09月01日

首次发表日期：2021年11月01日

权利取得方式：原始取得

权 利 范 围：全部权利

登 记 号：2024SR0032163

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。

中华人民共和国国家版权局 计算机软件著作权登记专用章

2024年01月04日

華南農業大學
South China Agricultural University

技术成果申请专利（软件著作权）审批

拟申请软件著作权名　称	场地生态学虚拟仿真平台软件V1.0		
申请人	华南农业大学	申请类型	软件著作权
联 系 人	刘邑君	手机号码	18826074178
E-Mail	330409269@qq.com		
发明人			
第一发明人	高伟	性　别	男
所在单位	林学与风景园林学院	职　称	教授

姓　名	性　别	所在单位	职　称
冼丽铧	女	林学与风景园林学院	实验师
刘邑君	女	林学与风景园林学院	无
阙青敏	男	林学与风景园林学院	实验师
李剑	男	林学与风景园林学院	讲师
陈燕明	女	林学与风景园林学院	副教授
陈璞	女	林学与风景园林学院	无

支持课题情况				
课题名称	华南农业大学场地生态认知与模拟虚拟仿真项目			
课题来源及编号	无			
申请类别	☐发明专利　☐实用新型专利　☐外观设计专利			
代理机构名称	北京帝源知识产权代理有限公司 代理机构资质查询：http://www.acpaa.cn/view/agencySearch.jhtml			
拟申请软件著作权简　介	该软件提供一个全面的工具，用于教育、研究、决策制定和环境保护，以便更好地理解和管理生态系统。提供教育模块，支持师生互动，生态模型集成，数据记录与分析，实时数据采集、高性能计算，多用户协作，为学生提供实验和练习机会，以增进他们的生态学知识。			
发明人承诺	本人将按照学校有关规定，积极配合学校知识产权办的工作，做好专利（软件著作权）申请过程中的答复等相关事宜，并及时将收到的有关通知、材料交学校知识产权办处理。			
	是否为第一发明人	○是 ◉否	日　期	2023-11-09

所在单位审核	本人代表学院对该专利（软件著作权）申请进行了审查。 学院将积极配合学校督促发明人按照学校的有关规定和工作需要做好该专利（软件著作权）的申请、宣传、转化等工作。				
		审核人	何茜	审核时间	2023-11-09
科研院业务科室科员审核	科研院已备存，无需提交纸质版专利（软件著作权）审批表；如有材料需加盖公章，请在办事服务大厅--知识产权类材料用章申请办理。				
		审核人	秦晓艺	审核时间	2023-11-10

五、其他业绩

1. 参与编写的地方标准

ICS 65.020.40
B 64

DB44

广　东　省　地　方　标　准

DB44/T 2187—2019

翅荚决明和双荚决明栽培技术规程

Technical regulations on cultivation of *Senna alata* & *S. bicapsularis*

2019－09－09 发布　　2019－12－01 实施

广东省市场监督管理局　发布

前　言

本标准按GB/T 1.1－2009 给出的规则起草。

本标准由广东省林业局提出并归口。

本标准起草单位：华南农业大学。

本标准主要起草人：翁殊斐、冯志坚、冼丽铧、张波、陈红跃、翁恩彬、王晓帆、秦昊林。

翅荚决明和双荚决明栽培技术规程

1 范围

本标准规定了翅荚决明（*Senna alata*（L.）Roxb.）和双荚决明（*S. bicapsularis*（L.）Roxb.）苗木培育、绿化栽植、养护管理、建档等技术要求。

本标准适用于翅荚决明与双荚决明的栽培。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅所注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 2772 林木种子检验规程

GB 6000 主要造林树种苗木质量分级

CJJ 82 园林绿化工程施工及验收规范

LY/T 1000 容器育苗技术

LY/T 2280 林木种苗生产经营档案

LY/T 2290 林木种苗标签

DB44/T 268 城市绿地养护技术规范

DB44/T 269 城市绿地养护质量标准

3 苗木培育

3.1 播种育苗

3.1.1 种子

3.1.1.1 采集

选择4 a生以上，生长良好、果实饱满、无病虫害的母树采种。采种期为秋冬季，翅荚决明果实由青绿色转为黑褐色时、双荚决明荚果由青绿色转为淡黄棕色时采集。

3.1.1.2 调制

翅荚决明果实收集后置通风干燥处摊放或在日光下摊晒，荚果开裂取出种子。双荚决明果实置于阴凉处晾晒2 d～3 d后，将包裹种子的黄褐色外囊去除，取出种子。用清水搓洗干净，置于阴凉处晾干。

3.1.1.3 质量

翅荚决明种子含水量10%～13%、净度95%以上、发芽率60%以上。双荚决明种子含水量10%～13%、净度95%以上、发芽率35%以上。种子检验按GB 2772执行。

3.1.2 芽苗培育

2. 指导学生参加学科竞赛获奖证书

YUANYE AWARD
INTERNATIONAL COMPETITION

2017 “园冶杯”
大 学 生 国 际 竞 赛
2017 Yuan Ye Award International Competition for Students

荣誉奖
HONORABLE PRIZE

作品名称： 广州公园花境应用调研与分析
Title
作　　者： 欧阳舒怡
Author
指导老师： 冼丽铧、翁殊斐
Instructor
参赛院校： 华南农业大学
University
类　　别： 生态植物论文
Category

二〇一七年十一月

2018
YUAN YE AWARD
INTERNATIONAL
COMPETITION

荣 誉 奖
HONORABLE PRIZE

2018 “园冶杯” 大学生国际竞赛
2018 YUAN YE AWARD INTERNATIONAL
COMPETITION FOR STUDENTS

作品名称| Title
广州市公园园路植物配置及其优化策略

作　　者| Author
刘付强

指导老师| Instructor
冼丽铧 翁殊斐

参赛院校| University
华南农业大学

类　　别| Category
毕业论文

园冶杯组委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Organizing Committee
亚洲园林协会主席
President of Asian Landscape Architecture Society

园冶杯评委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Jury Panel
IFLA 亚太主席
President of International Federation of Landscape Architects Asia-Pacific Region

2018.11

YUANYE AWARD
INTERNATIONAL COMPETITION

2017“园冶杯”
大学生国际竞赛
2017 Yuan Ye Award International Competition for Students

三等奖
THIRD PRIZE

作品名称：城市建筑墙体绿化景观调查与评价——以广州、深圳为例
Title

作　　者：冯瑞雯
Author

指导老师：翁殊斐、冼丽铧
Instructor

参赛院校：华南农业大学
University

类　　别：生态植物论文
Category

二〇一七年十一月

2018
YUAN YE AWARD
INTERNATIONAL
COMPETITION

三等奖
THIRD PRIZE

2018“园冶杯”大学生国际竞赛
2018 YUAN YE AWARD INTERNATIONAL
COMPETITION FOR STUDENTS

园冶杯组委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Organizing Committee
亚洲园林协会主席
President of Asian Landscape Architecture Society

园冶杯评委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Jury Panel
IFLA 亚太主席
President of International Federation of Landscape Architects Asia-Pacific Region

作品名称| Title
广州市儿童公园植物科普教育内容与形式的探讨

作　　者| Author
刘钰莹

指导老师| Instructor
翁殊斐 冼丽铧

参赛院校| University
华南农业大学

类　　别| Category
毕业论文

2018.11

2018
YUAN YE AWARD
INTERNATIONAL
COMPETITION

荣 誉 奖
HONORABLE PRIZE

2018“园冶杯”大学生国际竞赛
2018 YUAN YE AWARD INTERNATIONAL
COMPETITION FOR STUDENTS

作品名称| Title
广州市园林绿地的墙面植物景观评价研究

作　　者| Author
胡嘉乐

指导老师| Instructor
翁殊斐 冼丽铧

参赛院校| University
华南农业大学

类　　别| Category
毕业论文

园冶杯组委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Organizing Committee
亚洲园林协会主席
President of Asian Landscape Architecture Society

园冶杯评委会主席
President of Yuan Ye Award International Competition Jury Panel
IFLA 亚太主席
President of International Federation of Landscape Architects Asia-Pacific Region

International Competition Organizing Committee 国际竞赛组委会 园冶杯 Yuan-Ye Award 2018.11

3. 指导创新创业训练项目

华南农业大学2018年度国家级、省级、校级大学生创新创业训练计划拟立项项目公示

发布者：创新创业学院 发布时间：2018-05-09 浏览次数：5521

根据《教育部高等教育司关于报送2018年国家级大学生创新创业训练计划立项项目的通知》（教高司函（2018）14号）、《广东省教育厅关于报送2018年度国家级、省级大学生创新创业训练计划立项项目的通知》（粤教高函[2018]42号）要求，经各学院组织专家评审和学校专家评审答辩，评选出500项大学生创新创业训练计划，并从项目中择优遴选出160项送省教育厅申报省级大学生创新创业训练计划项目、60项送省教育厅申报国家级大学生创新创业训练计划项目。

为进一步激发大学生的创新创业热情，展示高校创新创业教育成果，搭建大学生创新创业项目与社会投资对接平台。教育部等相关部门决定举办主题为“勇立时代潮头敢闯会创扎根中国大地书写人生华章”的第四届中国“互联网+”大学生创新创业大赛。请拟立项项目团队在各学院与创新创业学院统一组织下，通过登录“全国大学生创业服务网”（cy.ncss.org.cn）或大赛微信公众号（名称为“大学生创业服务网”）进行注册，并填写参赛团队相关信息。对于获得晋级省级和国家级“互联网+”大学生创新创业大赛竞赛并获奖的团队给予额外配套资助，获得该大赛国家级奖励按照国家级创新训练项目等额配套、省级奖励按照省级创新训练项目等额配套、省级优胜奖按照省级创新训练项目50%配套，同一项目以最高获奖奖励配套。参赛团队参加学校组织的比赛培训工作，培训时间和地点另行通知。

现将拟推荐申报2018年度国家级、省级和校级大学生创新创业训练计划立项项目予以公示。如对以上拟立项结果有异议，请在公示期间以实名制书面形式向创新创业学院反映，反映情况时须签署真实姓名并提供联系方式，要求有具体事实根据，否则不予受理。

公示时间：2018年5月9日至5月13日

立项公示联系人：顾老师；联系电话：15920517179；联系地址：地址：六一区莘园2楼创新创业学院D201。

“互联网+”大学生创新创业大赛联系人：陈老师；联系电话：13450442181；地址：六一区莘园2楼创新创业学院D203。

附件：《华南农业大学2018年度国家级、省级、校级大学生创新创业训练计划拟立项项目》

华南农业大学2018年度国家级、省级、校级大学生创新创业训练计划拟立项项目信息（公示版本）.xls

创新创业学院

2018年5月9日

华南农业大学2018年度国家级、省级、校级大学生创新创业训练计划拟立项项目信息

项目编号	学院	项目名称	项目类型	项目负责人	指导教师	职称	拟立项级别
201810564030	林学与风景园林学院	广州珠村乞巧节事空间保护与活化研究	创新训练项目	林淑敏	佘美萱、赵建华	副教授、副教授	国家级
201810564031	林学与风景园林学院	华南农业大学校园植物导览系统开发与示范	创新训练项目	林黛仪	吴永彬	副教授	国家级
201810564032	林学与风景园林学院	珠三角地区城市绿地可食用植物选择及搭配	创新训练项目	吴昊书	李自若、冼丽铮	讲师、实验师	国家级
201810564033	林学与风景园林学院	污泥施用下黄梁木和花叶鹅掌柴根系生长的原位观察和模拟分析	创新训练项目	张书源	吴道铭	副教授	国家级
201810564141	林学与风景园林学院	基于性信息素的柚木野螟引诱剂的研究与林间应用	创新训练项目	张娜	马涛、温秀军	实验师、教授	省级
201810564142	林学与风景园林学院	污泥施用对构树和阳桃生长适应性及重金属吸收的影响	创新训练项目	李昕	曾曙才	教授	省级
201810564143	林学与风景园林学院	基于口述历史研究法的建国后广州城市公园建设历史研究	创新训练项目	林琪	潘建非	讲师	省级
201810564144	林学与风景园林学院	校园常见昆虫鸣声采集及数字化转换研究	创新训练项目	韦嘉怡	陈晓胜	讲师	省级
201810564145	林学与风景园林学院	基于气候适应性的中小学校园外部空间微改造研究	创新训练项目	黄怡欣	王凌、赵晓铭	讲师、待完善	省级

关于2022年度林学与风景园林学院大学生创新创业训练计划项目评审推荐结果的公示

发布者：林学与风景园林学院 发布时间：2022-05-02 浏览次数：3286

各位同学：

根据学校《关于组织申报2022年度华南农业大学大学生创新创业训练计划项目的通知》，经学生申报，学院组织专家评审，拟推荐《基于GWR模型的西江流域生态系统服务价值与植被梯度演替耦合研究》等30个项目立项为校级及以上级别项目。具体推荐顺序如下：

序号	项目名称	项目类别	队伍负责人
1	基于GWR模型的西江流域生态系统服务价值与植被梯度演替耦合研究	创新训练项目	肖茵茵
2	黄柰木提取物提高牧草青贮保存的机制	创新训练项目	阮诗诗
3	基于AI的城市公园对老年人情绪影响评估及优化设计	创新训练项目	谢晓涵
4	木麻黄根际真菌抗青枯病菌活性的研究	创新训练项目	郑采青
5	基于多元回归分析的“定制化情景”视域下红色旅游资源对大学生理想信念 引导作用机制的模型探究——以广州市为例	创新训练项目	张静怡
6	污泥施用方式对林地土壤养分和重金属随地表径流迁移影响	创新训练项目	史昊文
7	草酸青霉纤维素酶与木聚糖酶对杨树细胞壁的影响	创新训练项目	杜语芊
8	轻游戏在历史环境教育中的应用研究——以越秀康养游径建设为例	创新训练项目	黄建涛
9	基于视障群体具身体验的城市公共游憩空间包容性规划研究	创新训练项目	苏巧文
10	干旱胁迫对构树叶片异形性以及叶经济谱的影响	创新训练项目	龙硕
11	生物炭肥对桉树生长及土壤碳氮固特的影响	创新训练项目	胡英
12	基于全排列多边形指标法的校园遗产评价与保护研究	创新训练项目	廖宝怡
13	鸟类对广寄生种子的传播研究	创新训练项目	张伟茵
14	两种南药的种植栽培试验	创新训练项目	邹淇
15	基于VTA体系的广州高校校园行道树及其风险评估研究	创新训练项目	黄澄
16	连南瑶族装饰纹样在瑶寨特色营造的创新与应用	创新训练项目	陈乐
17	肉桂三种病害病原微生物的鉴定及开发利用	创新训练项目	郑澄淋
18	华南地区7种藤本植物攀附特性及其在广州园林中造景应用分析	创新训练项目	梁倩童
19	莫黎苜蓿细胞骨架相关基因SPIRAL1L-2的功能研究	创新训练项目	姜佳雨
20	基于可穿戴设备与多主体模拟的城市传统街区可步行性研究	创新训练项目	黄敏虹
21	茶籽饼高效脱毒微生物的筛选与鉴定	创新训练项目	叶大航
22	乡愁记忆代际差异视域下岭南水乡传统村落文化景观保护与优化策略研究	创新训练项目	王梦灵
23	阴香粉实病果共生真菌Esf-36的次生代谢产物及其生物活性	创新训练项目	仇思润
24	宫灯长明——广式红木宫灯非遗活化路径探索及市场开发	创业训练项目	付今萌
25	黄槿木对砷胁迫的生理响应及其机理初探	创新训练项目	何子杰

26	服务公众健康福祉的岭南园林遗产活化研究	创新训练项目	凌彩云
27	不同倍性构树调控镉胁迫相应特征及机理研究	创新训练项目	刘颖薇
28	基于场景构建理论的历史村落旅游新模式——以义合镇芳家围为例	创业训练项目	杨易
29	《广东大径材树木》专著编研	创新训练项目	黄灿桐
30	“桌上园林”创意实践	创业训练项目	黄昱

2022年度林学与风景园林学院大学生创新创业训练计划项目立项评审专家名单：张巨明、谭建文、孙思、李雁群、龙健梅、黄家平、吴宝娜、古德泉、骆泽顺。

项目评审推荐结果公示期为2022年5月2日—2022年5月4日18:00，共三天。若对公示有异议，请联系陶翔宇老师（联系方式：13265317994），逾期不予受理。

共青团华南农业大学林学与风景园林学院委员会

2022年5月2日

华南农业大学2021年大学生创新创业训练计划项目立项汇总表						
54	生态触媒效应下岭南水乡振兴发展路径研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	卢丹梅、王婷	曾昭仪、揭皓阳、梁舒婷、陈乐淇、池泓文	国家级
55	高密度街区下垂直绿化热环境效应研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	潘澜	蔡晓毅、丁宁、黄澜、邝子扬、王雨澄、朱映烨	国家级
56	一种植物根系半固态凝胶培养方法	创新训练项目	林学与风景园林学院	吴道铭	邢鹤严、陈佳倩、邓文琪、谢子曦、于珊	国家级
57	城市公共空间适老健康效益智能化评价及优化研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	陈崇贤	吴伊童、蔡楚灵、陈斯璐、欧冰纯、章永乐、钟敏	国家级
58	基于韧性理论的广东少数民族村寨发展策略研究——以连南县油岭瑶寨为例	创新训练项目	林学与风景园林学院	陈思颖、卢丹梅	叶瑜、房婷、李家源、李易、阮一芯、熊轻舟	国家级
59	南药阳春砂内生真菌中农用抗生素的发掘和鉴定	创新训练项目	林学与风景园林学院	单体江	蔡腾、郭茂涛、兰成浩、李婉琳、丘莳芬	国家级
164	丛枝菌根真菌对油茶生长及其炭疽病的影响	创新训练项目	林学与风景园林学院	陈祖静	吕嘉妍、梁家俊、罗连荷、彭梦萱、张咏瑄	省级
165	基于matlab的森林资源统计软件开发应用	创新训练项目	林学与风景园林学院	刘萍	吴越、何子杰、王梓琪、吴文凯	省级
166	7株捕食松材线虫真菌生防菌株的鉴定及捕食活性测评	创新训练项目	林学与风景园林学院	殷明亮	郑梓霞、傅若楠、李静、卢艺丹、王玉珏、郑梦霞	省级
167	红椎根际外生菌根真菌彩色豆马勃子实体的林下仿生培育	创新训练项目	林学与风景园林学院	胡文涛	罗月凤、陈嘉显、刘唯、温嵩徽、叶晓雯、张芝林	省级
168	林木结构复杂度的测定及其对结构效益率的作用机制	创新训练项目	林学与风景园林学院	林娜、陆永超	罗贞、何辰辰、和展梅、黄家燕、康骏杰、李嘉诚	省级
170	基于抗风性能的城市行道树智能树池设计	创新训练项目	林学与风景园林学院	秦新生	谢冰、何利梅、胡兵、黄飘萍、梁涵清、刘晓微	省级
171	城郊休闲旅游空间的福祉效力研究——以广州增城为例	创新训练项目	林学与风景园林学院	林敏慧	洪旎、陈湘榕、郭美美、廖佳雨、卢娜妍、孟悦	省级
172	岭南园林香景时空分布特征研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	陈意微	陈蕴仪、黄靖雯、章书凡、左静雯	省级
173	观叶草灌类植物数字建模及配置研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	李自若	曹白莹、黄林满、黄婷君、雷婧旋、温汶琪	省级
373	粤港澳大湾区自然教育成效评估研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	虞依娜	陈珊珊、陈想娣、柯晓静、彭轲	校级
374	利用单碱基编辑工具Prime editor创制抗ALS除草剂的阔鹵翦股颖种质	创新训练项目	林学与风景园林学院	陈曙	桂春生、邓垚灯、杜文轩、郭鑫洁、何亮亮、利梦洁	校级
375	广东道地药材穿心莲组织培养与植株再生研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	张俊杰	谢国鸿、蒋奉强、臧唯卿、曾澄、张榇悦	校级
376	自然教育课程软件的开发与营销	创业训练项目	林学与风景园林学院	刘思蓓、张卓欣	方珂逸、陈佳欣、陈思祺、何胤萱、那祖秋	校级
377	黄野螟抗绿僵菌机制的研究及免疫抑制剂在生物防治中的应用	创新训练项目	林学与风景园林学院	王偲	邵雨荷、黄晓薇、盘李进、王小倩	校级
378	城中村中公共空间的非正规性及其更新改造策略研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	叶昌东、杨文越	唐楚婷、刘曦、卢泳欣、尹敏仪、江荧盈、吴明菊	校级
379	产果胶酶乳酸菌的筛选及其在青贮饲料的应用	创新训练项目	林学与风景园林学院	张庆	陈雨晴、宋科蓉、任慈、郭田心、刘林云慧	校级
380	乡创引领下乡村民俗文化景观活化与再生——以清远市保安村重阳民俗为例	创新训练项目	林学与风景园林学院	赵建华、吴宝娜	刘德义、邓佳宜、何美慧、黄楚然、谢萍、郑欣杜	校级
381	林中纳趣 -自然 探索 创意	创业训练项目	林学与风景园林学院	陈红跃、冼丽铮	丰颖、陈洁仪、陈秋娟、邱雯睿、许圳达、叶田田	校级
382	本土植物在广州海绵公园下凹式绿地的配置净化效益研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	林蔚、佘美萱	林晓文、陈彦洁、黄颖琪、赖俊华	校级
383	镉毒害对黄粱木生长影响的机理研究及其修复讨究	创新训练项目	林学与风景园林学院	吴篤民	杨毅、安雨洋、冯澈怡、彭华粱、尹孙葆	校级
384	38种植物提取物杀线虫成分的筛选与评价	创新训练项目	林学与风景园林学院	毛子翎	李嘉慧、邝伟冬、叶春意、袁子欣	校级
385	促进公共健康为导向的老旧住区景观品质提升策略	创新训练项目	林学与风景园林学院	夏宇	叶劭民、郭静、温淑宇、修瑞欣、尹晓诗、郑键洲	校级
386	华南地区森林植被恢复进程中生态水文效应演变规律研究——以鼎湖山为例	创新训练项目	林学与风景园林学院	刘效东	蔡雁行、何柏锋、黄凝翠、郭绍杰	校级
387	基于认知发展理论的自然研学活动实践探索研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	程晓山	廖进、何谷、潘雯、潘垚倩、温广源、张湘婷	校级
388	广东翁源青云山省级自然保护区野生动物监测	创新训练项目	林学与风景园林学院	佟富春	麦艳仪、官方正、杨梅啸云、张昊妍、章亚宁、朱耘生	校级
389	多维价值视角下大湾区城市更新中 公共空间的营造研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	王凌、赵晓铭	黄泳儿、李怡馨、罗晓慧、谢浩鹏、曾文欣、郑好	校级
390	服务自闭症儿童群体的乡村共建式社区农园营造与循证研究	创新训练项目	林学与风景园林学院	汤辉、黄东	赵嘉美、饶婕妤、宋奕桑、苏芷敏、谢崎萱、杨越	校级
391	御谷PgRAVs基因在水分胁迫中的功能解析	创新训练项目	林学与风景园林学院	解新明、钟天秀	王辰雨、刘祯、杨金成、占思露	校级

关于2020年度林学与风景园林学院大学生创新创业训练计划项目评审推荐结果的公示

发布者：林学与风景园林学院 发布时间：2020-05-29 浏览次数：2833

各位同学：

根据学校《关于组织申报2020年度华南农业大学大学生创新创业训练计划项目的通知》，经学生申报，学院组织专家评审，拟推荐《南粤古驿道遗产网络生态系统服务功能及价值量化评估研究》等34个项目立项为校级及以上级别项目。具体推荐顺序如下：

序号	项目名称	项目类型	项目负责人	年级专业
1	南粤古驿道遗产网络生态系统服务功能及价值量化评估研究	创新训练	郑潼	2018级城乡规划
2	AMF、桉树和青枯菌互作中水杨酸合成关键酶及其基因表达研究	创新训练	钟英文	2018级林学
3	在岭时光——岭南民艺传承及园林文化教育传播平台	创业训练	张译雯	2017级园林
4	广东三水云东海国家湿地公园鸟类多样性调查	创新训练	邓适彦	2019级野生动物与自然保护区管理
5	空间正义导向下的农民工市民化路径研究	创新训练	冯碧盈	2018级城乡规划
6	基于3S技术的珠江三角洲水路交错带植被类型演替及群落特征研究	创新训练	杨楠	2018级风景园林
7	粤东中药资源调查研究——以汕尾、陆丰为例	创新训练	黄俊凯	2018级林学
8	一种基于中国肉桂枝叶精油的护臀霜制备方法研究	创新训练	杜嘉华	2018级林学
9	代际共享视角下的穗深两地高层居住区户外活动空间探析	创新训练	邹小骞	2018级风景园林
10	儿童自然观培育的乡村共建社区花园在地营造与可续发展研究	创新训练	王宇晶	2018级风景园林
11	渗透胁迫下构树叶片生长模式	创新训练	龙硕	2019级林学
12	基于遗产廊道视角的南粤古驿道沿线村落保护与活化政策研究	创新训练	刘嘉文	2018级旅游管理
13	校园屋顶可食用景观设计策略	创新训练	戚百韬	2018级园林

14	新型自修复材料保水抗菌特性及其关键技术研究	创新训练	樊宸烜	2018级草业科学
15	松材线虫内寄生真菌Esteya vermicola与松墨天牛关系初步研究	创新训练	张静怡	2017级森林保护
16	乡村振兴背景下南粤古驿道的休闲福祉研究——以钱岗古道为例	创新训练	胡文锋	2018级旅游管理
17	沉浸式营销："广告廊道"对旅游者感知与行为的影响	创新训练	刘彩玲	2019级旅游管理
18	自然教育对青少年亲环境行为的影响及发展对策研究	创新训练	黎楚瑶	2018级旅游管理
19	污泥林用对林地土壤N2O排放的影响	创新训练	符邦霞	2018级林学
20	极端高温促植物顶端分枝的机理研究	创新训练	白秩丞	2018级草业科学
21	适用于树木根系原位观察的根箱制作和应用	创新训练	董晓全	2017级林学
22	基于研学视角的广州从化古驿道保护与发展研究——以钱岗古道为例	创新训练	桂奕	2017级城乡规划
23	不同供应磷素水平对华南地区主要造林树种幼苗生长的影响	创新训练	温珍杰	2018级林学
24	粤港澳大湾区建设背景下的东莞 水乡景观整治研究	创新训练	林毅苗	2017级城乡规划
25	社区公园绿地的使用特征研究——以广州为例	创新训练	杨志宏	2018级城乡规划
26	基于新糖苷键的木糖促半纤维素溶解的研究	创新训练	欧阳沛瑶	2018级林学
27	有机溶剂预处理解构林木纤维及其制备燃料乙醇的研究	创新训练	陆勇健	2019级林学
28	花随城开，人随花来——基于广州公共绿地探究岭南花卉文化对公众身心健康的影响评价	创新训练	陈欣欣	2018级园林
29	基于岭南园林文化的文创产品研发与运营平台	创业训练	徐翔	2017级风景园林
30	基于图像学分析的广州传统城市特色形象构成与要素研究	创新训练	王健	2017级园林
31	两种南药植物主要病原菌的分离鉴定及其药剂筛选	创新训练	郑灌淋	2019级中药资源与开发
32	健康社区视角下老旧小区绿色空间对居民活动的影响-以广州微改造为例	创新训练	吴仪	2018级城乡规划
33	青年旅舍公共空间住客互动机制研究	创新训练	吴宇宏	2019级旅游管理
34	季节性冲击下旅游小企业的经营现状与旅游产业规划研究——以海口	创新训练	刘彤	2018级城乡规划

	市为例			

（注：创业实践项目按照学校通知要求，将直接参加创新创业学院的答辩和评审，不在学院推荐之列。）

2020年度林学与风景园林学院大学生创新创业训练计划项目立项评审专家名单：陆永超、林同、陈辉、秦新生、刘小蓓、佟富春、陈燕明、董朝霞、李雁群、王雅君、尹晓昕。

项目评审推荐结果公示期为2020年5月29日—2020年5月31日18:00，共三天。若对公示有异议，请联系张东文老师（联系方式：020-38294737），逾期不予受理。

共青团华南农业大学林学与风景园林学院委员会
2020年5月29日

4. 实验室建设与管理

4.1. 广东省质量工程项目-林学实验教学示范中心建设

广东省质量工程项目

验收登记表

项目类别：	实验教学示范中心
项目名称：	林学实验教学示范中心
所在学校：	华南农业大学
项目负责人：	吴永彬
项目参与人：（限前5人，不含项目负责人）	冼丽铧，吴奕敏，苏艳，刘纯鑫，郑明轩
立项时间：	2015年7月17日
填表时间：	2018年11月20日

广东省教育厅 制

二〇一八年

一、项目既定建设举措执行情况

以项目申报书（建设任务书）为参照，梳理截至现阶段项目建设已经执行和落实的主要建设（改革）举措(步骤、计划、措施等)，分条列举（800 字以内），已执行的建设举措需提供证明材料。

（1）加强和完善实验室信息化管理与实验教学平台建设

建立了华南农业大学林学实验教学示范中心的网页，网址为 http://202.116.160.44:8004/syzx/，建立了实验教学公共平台——学院教学实验中心，分专业逐步建设各专业实验室。学院以建设广东省重点实验室为契机，按照相对集中、集中连片的原则对学院实验室场地进行了调整和归类，仪器集中管理和使用，购置并添加新仪器，对陈旧教学科研设施进行了更新。目前实验室对所有本科生全面开放，各个实验室的利用率显著提高，相近专业可相互借用，有效实现了学科交叉、平台共享。实施本项目以来，年实验人数 2000 多人，累计实验学时 1800 多学时；此外，在保证实验教学资源充分满足要求的基础上，积极发挥实验室的科研功能。近三年来，我院学生的部分毕业论文、大学生科技创新项目均可在实验室内完成。

（2）进一步完善仪器设备共享平台建设

通过华南农业大学林学实验教学示范中心的网站，共享本实验中心所有仪器设备，本中心实验仪器共 1475 台件，其中单值 1 万元以上设备 415 台件，总值 2342.5 万元，单值为 10 万元以上设备 38 台件，能够满足林学专业、森林保护专业、园林专业、草业科学专业、风景园林专业、城乡规划、旅游管理专业等现代实验教学需要。购置设备的任务基本完成，达到设备更新率 85%，设备完好率和利用率 100%。

（3）建设一支稳定的高素质实验教师队伍

本中心专职实验技术人员共 16 人，在学位结构上，14 人具有硕士及以上学位，占比 87.5%，其中 3 人具有博士学位，占比 18.8%。职称结构上，4 人具有高级职称，占比 25%。年龄结构上，35 岁及以下教师 9 人，占比为 56.3%；36-45 岁教师 3 人，占比为 18.8%；46-55 岁教师 4 人，11 占比为 25%。拥有六个月以上国（境）外学习和研究经历的教师 1 人。

（4）建立一套操作性强的实验教学评估系统

实验中心结合本科教学工作审核评估的要求，将办学定位与目标、师资队伍、教学资源、培养过程、学生发展、质量保障等方面，发挥实验教学中心的示范作用，贯穿教学与科研的，提高本科实验教学水平。

项目申报书已设定的，但目前尚未实施或者未完全实施的建设(改革)举措，分条列举，并说明未执行相应建设举措的原因（500 字以内）。

无。

六、项目校内管理部门初步审核意见

（须从管理部门层面对项目建设成效进行客观评价，明确该项目是否已经具备资格可以参加校内结题，并附学校管理部门初步审核意见）

由广东省教育厅立项的“广东省质量工程实验教学示范中心项目——林学实验教学示范中心”，自 2015 年 7 月立项以来，项目组严格按照任务书的要求专款专用，开展项目建设，主要获得了以下成果:

(1) 加强和完善了在实验室信息化管理与实验教学平台建设，建设了一个网络化的实验教学示范中心，建立了华南农业大学林学实验教学示范中心网页；同时积极与国内外多所知名高校建立广泛的实验教学交流。

(2) 进一步完善了仪器设备共享平台建设，通过华南农业大学林学实验教学示范中心的网页，对本实验中心所有仪器设备进行共享。

(3) 在实验师资建设方面，已经建成了一支稳定的高素质实验教师队伍，目前示范本中心共有专职实验技术人员 16 人，有 3 位老师具博士学位，11 位老师具硕士学位，职称和年龄结构比较合理上，其中 4 人具有高级职称；35 岁及以下教师 9 人。以林学实验教学示范中心为实验平台，近三年来学院教师共发表 SCI 论文 131 篇，本科生发表论文 54 篇。

(4) 建立了一套操作性强的实验教学评估系统，并加强实验室安全教育。

(5) 示范中心积极参与指导大学生创新创业项目立项，近三年来，共指导大学生创新创业项目共 102 项，其中国家级项目 6 项，省级项目 15 项，校级项目 49 项，有 95 名教师参与指导工作。

(6) 在成果和获奖方面，从 2015 至 2018 年，获教学成果奖 6 项；获科技成果奖 13 项；教师获专利授权 40 项，本科生或专利授权 3 项。

(7) 在项目建设成果价值及推广应用方面，建设了林学实验教学示范中心网页，开发了一套以“华南农大校园植物导览”系统，方便了学生进行学习，并提高了动手能力。

总体上，本项目建设效果良好，完成了各项任务书的建设任务，达到项目建设的既定目标，为林学和风景园林相关专业学生的学习提供了基础保障，同意申请验收。

部门负责人签章:

2018 年 月 日

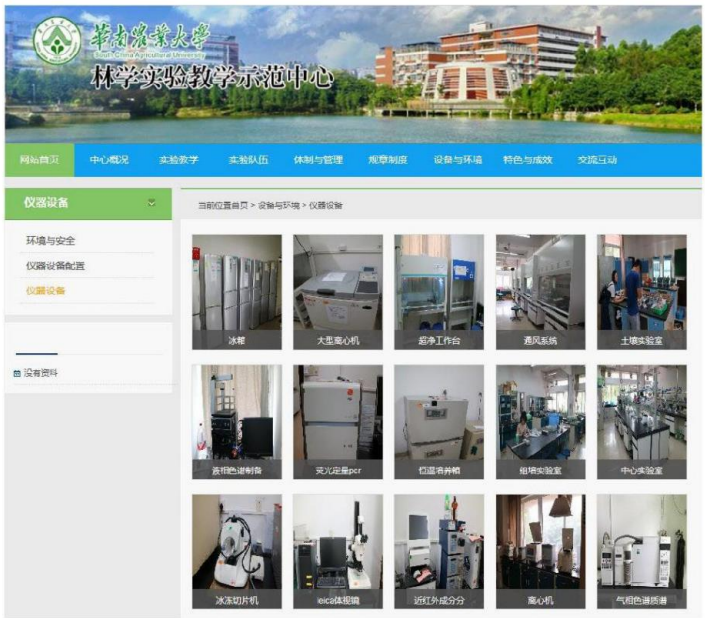
八、学校审核意见

负责人签章：

公章：

2018 年 12 月 13 日

附件 5 林学实验教学示范中心网站



4.2.担任农事训练园林站站长的佐证材料教学基地建设

林学与风景园林学院农事训练课程有关说明

实验中心、农事训练中心：

为落实试验中心、农事训练中心6月21日在林学与风景园林学院就农事训练课程的调研成果，经林学与风景学院研究决定，具体落实以下事项：

1、邱权老师为林学站站长、冼丽铧老师为园林站站长。

2、在保留原有农事训练课内容的（4个模块）的基础上，增加“植物识别与鉴定”及“森林环境因子观测”训练内容（附件）。

教学院长签字（盖章）：

2017年7月4日

附件：

学院名称：林学与风景园林学院

课程名称	上课地点	任课教师
植物识别与鉴定	树木园、校园	✓秦新生、张卓欣、李玉玲 13416164982
森林环境因子观测	林学院、树木园、校园	✓吴道铭、龙凤玲、莫其锋 13533065570

当红课程

经过近4年的农事训练教学实践，农事训练教学受到了广大学生好评，学校曾经做过调查问卷，学生对农事训练课的满意度达到97.6%。

有着如此高的认可度的课程，想必一定是很有趣，现在让小新带你一起来上农事训练中的最受同学欢迎的课程。

观赏植物栽培

观赏植物，顾名思义，就是用来观赏的植物，观赏植物一般都有美丽的花或形态比较奇异。下面一起来欣赏我们学校的观赏植物。

4.3.华南农业大学场地生态认知与模拟虚拟仿真项目实验教学课程建设

课程资源系统制作技术服务合同

项目名称：华南农业大学场地生态认知与模拟虚拟仿真项目

委托方（甲方）：华南农业大学

受托方（乙方）：七造（重庆）科技有限公司

签订地点：广州市天河区

本合同甲方委托乙方提供场地生态学课程资源系统制作技术服务，并支付服务费用，乙方接受委托并进行此项技术服务工作。甲乙双方经过平等协商，在真实、充分地表达各自意愿的基础上，根据《中华人民共和国民法典》的规定，达成如下协议，并由甲乙双方共同恪守。

第一条　本合同研究开发项目的要求如下：

1.技术目标：按照场地生态学课程资源系统的要求进行相关课程资源系统的制作工作。

2. 技术内容：

2.1（地生态认知与模拟虚拟仿真项目由信息网页及后台管理平台、虚拟仿真实验交互主体程序两大模块构成，采用 BS 架构，纯 Web 端轻量化线上交互模式制定技术开发路线，其虚拟仿真实验交互主体程序基于 Unity 3D 引擎与 Web GL 承载的形式进行开发；项目预期将在实现交互实验步骤的同时，融入智能化计算公式，实现生态数据的自动计算和设计效果评分的自动计算等；）

2.2（项目将按照专业视觉色彩标准及甲方提供的参考模板以及 CAD 文件标准，配套甲方提供的模型和图片标准完成场地生态认知与模拟虚拟仿真项目的 UI 美术设计和 3D 场景设计；）

2.3（项目将按照甲方提出的界面框架、模型操作、模型锁定、自动计算等功能需求以及自动计算公式标准，开发实现场地生态认知与模拟虚拟仿真项目的基本操作内容；）

2.4（项目将根据甲方的需求，在华南农业大学邵阳湖和林学与风景园林学院院楼及周边为建设范围（约 5000 平方米）为地形基础上，建立相关模型并将整个项目步骤分为植物认知、植物造景、空间认知、基本方法、基本理论、构成要素、空

罢工、暴乱、法律法规强制规定、政府政策限制。遇到上述不可抗力事件的一方，应立即书面通知合同其他方，并应在不可抗力事件发生后十五天内，向合同其他方提供经不可抗力事件发生地区县级以上政府部门出具的证明合同不能履行或需要延期履行、部分履行的有效证明文件原件，由合同各方按事件对履行合同影响的程度协商决定是否解除合同、或者部分或全部免除履行合同的责任、或者延期履行合同。遭受不可抗力的一方未履行上述义务的，不能免除其违约责任。如因不可抗力事件造成项目无法继续履行而导致合同解除时，实际已发生的费用，由甲乙双方各承担 50%的损失。

第十三条　甲乙双方因履行本合同而发生的争议，应协商、调解解决。协商、调解不成的，应向甲方所在地人民法院提起诉讼。

第十四条　甲乙双方对于合同内容的补充约定：无

第十五条　本合同一式四份，甲方执两份，乙方执两份，具有同等法律效力。

第十六条　本合同经甲乙双方授权代表签字并加盖双方公章后生效，无论本合同以何种方式终止，保密条款长期有效。

第十七条　一方在本协议履行过程中向对方发出或者提供的所有通知、文件、文书、资料等；均以本合同所列明的地址送达。一方如果迁址、变更电话，应当书面通知对方，未履行书面通知义务的，一方按原地址邮寄相关材料或通知相关信息即视为已履行送达义务。当面交付上述材料的，在交付之时视为送达；以邮寄方式交付的，寄出、发出或者投邮后即视为送达。

（以下无正文）

甲方单位（盖章）：	乙方单位（盖章）：
授权代表（签字）：	授权代表（签字）：
联系人：　冼丽钟	联系人：　兰浩
联系地址：　广州市天河区五山华南农业大学林学与风景园林学院 702	联系地址：　重庆高新区西永街道学城大道 62 号附 2 号研发楼一期 B2#1-601
联系电话：　13760755892	联系电话：　18290301873
电子邮件：　331074379@qq.com	电子邮件：　1013961895@qq.com
签订日期：2022年 11 月 7 日	签订日期：2022年 11 月 7 日

华南农业大学
虚拟仿真实验教学课程申报书

课程名称：场地生态认知与模拟

专业类代码：0828

负责人：高伟

联系电话：13751749101

申报单位：林学与风景园林学院

填表日期：2021 年 5 月 18 日

华南农业大学本科生院制

二〇二一年五月

1. 基本情况

实验名称	场地生态认知与模拟	是否曾被推荐	○是 √否
实验所属课程（可填多个）	场地生态学，风景园林设计基础，风景园林规划设计 1&2		
性质	○独立实验课 √课程实验		
实验对应专业	风景园林（含国际班），园林		
实验类型	○基础练习型 √综合设计型 ○研究探索型 ○其他		
虚拟仿真必要性	□高危或极端环境 ☑ 高成本、高消耗 ☑ 不可逆操作 ☑ 大型综合训练		
实验语言	○中文 √中文+外文字幕（语种） ○外文（语种）		
实验已开设期次	共　次： 1. 时间、人数 2. 时间、人数 3. …		
有效链接网址	（要求填写标准 URL 格式的实验入口网页，不允许仅为文件下载链接）		

2. 教学服务团队情况

2-1 团队主要成员（含负责人，总人数限 5 人以内）								
序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	手机号码	电子邮箱	承担任务
1	高伟	1982.6	华南农业大学	专业主任	副教授	13751749101	35105706@qq.com	课程理论框架搭建与课程教授
2	阙青敏	1990.8	华南农业大学	实验员	实验师	15820245143	1184784882@qq.com	实验流程设计与课程教授
3	陈燕明	1975.10	华南农业大学	教师	副教授	13811856266	954277133@qq.com	课程教授
4	冼丽铧	1987.7	华南	实验	实验	13760755	33107437	实验管理

			农业大学	员	师	892	9@qq.com	与课程教授
5	李剑	1980.7	华南农业大学	教研室主任	讲师	13570300698	233108583@qq.com	课程教授

2-2 团队其他成员

序号	姓名	出生年月	单位	职务	职称	承担任务
1	王云才	1967.8	同济大学	副系主任	教授	课程理论体系构建
2	董芦笛	1968.3	西安建筑科技大学	系主任	教授	课程理论体系构建
3	潘剑彬	1981.5	北京建筑大学	院长助理	副教授	课程实验逻辑设计
4	李晖	1967.11	华南农业大学	学科带头人	教授	课程理论体系构建
5	翁殊斐	1969.11	华南农业大学	-	副教授	课程实验逻辑设计
6	古德泉	1973.6	华南农业大学	教研室主任	讲师	实验课与理论课衔接协调
7	王正宏	1981.8	光辉城市（重庆）科技有限公司	商务总监	工程师	执行管理
8	戴振宇	1983.3	光辉城市（重庆）科技有限公司	总监	工程师	技术开发
9	兰浩	1995.11	光辉城市（重庆）科技有限公司	技术	工程师	服务支持
10	刘环欢	1993.9	光辉城市（重庆）科技有限公司	技术	工程师	技术开发

团队总人数： 15 人 其中高校人员数量： 11 人 企业人员数量： 4 人

2-3 团队主要成员教学情况（限 500 字以内）

（近 5 年来承担该实验教学任务情况，以及负责人开展教学研究、学术研究、获得教学奖励的情况）

近 5 年来团队承担的实验教学任务包括：场地设计调研、生态园林设计、生态规划与生态修复、生态园林设计课程实训、风景园林规划设计 I（含实训）、

4.4.2021 年本科实践教学条件建设项目实践教学平台

关于公示2021年本科实践教学条件建设项目的通知 http://202.116.160.8/_s124/2021/0511/c5138a277729/page.psp

学校主页 本科招生网 旧教务系统 旧版网站

搜索关键词 搜索

网站首页 机构设置 本科招生 专业设置 管理文件 办事指南 信息公开 资料下载

关于公示2021年本科实践教学条件建设项目的通知

发布者：实践教学科 发布时间：2021-05-11 浏览次数：1207

各相关单位：

根据各单位申报的2021年本科实践教学条件建设项目，经学校组织专家评审，现将2021年本科实践教学条件拟建设项目予以公示，详细内容请见附件。

公示期为2021年5月11日至5月14日。如有异议，请在公示期内实名向本科生院反映，匿名及其他形式的异议恕不受理。

联系人：李老师 黄老师

地址：行政楼302房

联系电话：85280051

电子邮箱：shijian@scau.edu.cn

本科生院

2021年5月11日

2021年本科实践教学条件建设项目拟立项方案.docx

地址：广州市天河区五山华南农业大学行政楼三楼

备案编号：粤ICP备05008874号 4401060500010

管理员登录 备案编号：粤ICP备05008874号

招生公众号

-----教学单位-----

序号	申报单位	项目负责人	项目类型	项目名称	立项经费（万元）
1	体育教学研究部	卢三妹	补短板	第二风雨操场教学设备采购	50
2	林学与风景园林学院	马涛	补短板	实验教学中心实验室建设	78
3	食品学院	钟青萍	补短板	食品学院教学实验中心教学设备更新	82
4	兽医学院	陈红	补短板	动物药学专业实践教学条件建设	100
5	生命科学学院	朱国辉	补短板	本科教学实验仪器设备更新	104
6	数学与信息学院	肖磊	补短板	数学与信息学院本科实践教学条件更新	107
7	工程学院	闫国琦	补短板	开放共享共用工程专业实验室建设	150
8	艺术学院	李美群	补短板	艺术学院本科教学实验室——音乐厅建设项目	150
9	基础实验与实践训练中心	陈建军	补短板	基础实验与实践训练中心条件建设	150
10	材料与能源学院	汤日元	补短板	应用化学与材料化学一流专业实验室建设	200
11	海洋学院	孙际佳	补短板	以培养应用型、研究型创新人才为目标的海洋学院实验教学中心建设	200
12	园艺学院	吴振先	补短板	本科教学实验仪器设备更新	150
13	动物科学学院	李莉	补短板	动科学院实验教学中心实验室建设	74
14	水利与土木工程学院	孙杨栩	补短板	土木工程与建筑类BIM 技术的虚拟仿真实践教学应用一期	64
15	资源环境学院	周艳华	补短板	数字三维测绘实验室	33
16	数学与信息学院	熊俊涛	新专业	大数据管理与应用	30
17	工程学院	漆海霞	新专业	机器人工程	50
18	资源环境学院	蔡燕飞	新专业	农业资源与环境	50
19	经济管理学院	米运生	一流专业	经管类实验教学人才测评等软件购置	38
20	生命科学学院	朱国辉	一流专业	微观可视化生物实验及虚拟仿真条件建设	69

21	食品学院	范小平	一流专业	对标省一流专业和工程认证要求，建设包装工程本科实验教学条件	80
22	资源环境学院	周艳华	一流专业	环境工程专业虚拟仿真实验实践教学项目建设	150
23	水利与土木工程学院	胡威	新工科	智慧实验室管理平台项目建设	57
24	电子工程学院（人工智能学院）	刘洪山	新工科	面向全校工科的电子类基础实验线上线下混合教学实验室/集成电路制造 AR 实验室/人工智能实验室建设	200
25	园艺学院	陈厚彬	新农科	荔枝霜疫病识别、发生和防治虚拟仿真实验	35
26	农学院	牟英辉	新农科	农学院新农科现代农业技术实践基地建设	14
27	兽医学院	贾坤	新农科	动物医学外科手术技能提升与拓展	21
28	动物科学学院	吴银宝	新农科	动物科学学院实训中心培训室建设	23
29	林学与风景园林学院	高伟、冼丽铧	新农科	风景园林营造技艺实践与数字化实验室	75
30	农学院	段美洋	新农科	农学院开放-共享-智慧型实践教学实验室建设	140
31	植物保护学院	李云锋	新农科	2021 年度植物保护学院本科实验教学示范中心智慧实验室建设项目	200
32	人文与法学学院	李颖	新文科	华南农业大学普通话水平测试站	15
33	外国语学院	陈琳慧	新文科	国际贸易实训平台	29
34	公共管理学院	区晶莹	新文科	公共管理虚拟仿真实验平台建设	120
35	经济管理学院	米运生	新文科	现代农业经营管理智慧实验室建设	132

4.5.华南农业大学广州紫荆林业规划设计有限公司实践教学基地

关于公布2020—2021年度林学与风景园林学院院级实践教学... https://lf.scau.edu.cn/2022/0922/c887a325067/page.htm

书记信箱 院长信箱 学校主页 English Version

联系电话：020-85280256 招生电话：020-85280255

华南农业大学 South China Agricultural University | 林学与风景园林学院 College of Forestry and Landscape Architecture

搜索关键词

网站首页 学院概况 师资队伍 人才培养 科学研究 党群工作 学生工作 招生就业 对外交流 校友之家 办事指南

关于公布2020—2021年度林学与风景园林学院院级实践教学基地检查结果的通知

发布者：谭颖 发布时间：2022-09-22 浏览次数：428

各教研室、实验中心：

根据《华南农业大学林学与风景园林学院实践教学基地建设与管理办法》（林风[2021]19号），学院开展了2020—2021年度院级实践教学基地运行情况检查，现予公布检查结果（详见附件1）：“华南农业大学林学与风景园林学院海珠湿地实践教学基地”等4个基地为“优秀”，“岭南盆景文化与园林造景时间教学基地”等4个基地为“合格”，“华南农业大学广州曾和梦湘西餐饮管理有限公司实践教学基地”等20个基地由于合同到期，不续签，予以撤销。

为加强学院实践教学基地建设，学院决定对2020-2021年度检查结果为“优秀”的实践教学基地给予5000元/个的经费支持，用于改善实践教学条件建设。请各基地负责人利用建设经费进一步做好基地建设工作，不断提高实践教学质量。

附件：1.2020—2021年度林学与风景园林学院院级实践教学基地检查结果汇总表

林学与风景园林学院

2022年9月6日

附件1

2020—2021年度林学与风景园林学院

院级实践教学基地检查结果汇总表

序号	基地名称	依托单位	现行协议起止时间	学校基地负责人	评估结果
1	华南农业大学广州市海珠区湿地保护管理办公室实践教学基地	广州市海珠区湿地保护管理办公室	2020.06.28-2025.06.27	高伟、陈燕明	优秀
2	华南农业大学广州市公园协会实践教学基地	广州市公园协会	2019.04.01-2024.03.31	程晓山	优秀
3	华南农业大学-广东连南板洞省级自然保护实践教学合作基地	广东连南板洞省级自然保护区管理处	2019.4.18-2024.4.17	彭友贵	优秀
4	华南农业大学广州紫荆林业规划设计有限公司实践教学基地	广州紫荆林业规划设计有限公司	2020.09.28-2025.09.30	冼丽铧	优秀

第1页 共3页 2023-2-24 15:22

HT202202048

华南农业大学联合培养研究生基地建设合作协议书

甲方：华南农业大学

乙方：广州紫荆林业规划设计有限公司

为贯彻国家及广东省有关人才和教育发展规划纲要精神，加快高级专门人才培养的步伐，有效提高人才培养质量，建设全面开放的研究生教育创新体系。华南农业大学（甲方）和 **广州紫荆林业规划设计有限公司**（乙方）决定建设联合培养研究生基地（以下简称“基地”）。双方经充分协商，达成如下协议。

第一条　合作目的

充分利用双方的优质资源，充分发挥各自在学术队伍、文献资料、设施设备和经费等方面的优势，协同开展研究生培养和生产技术创新，共同打造培养应用型、创新型、复合型、创业型高层次人才的平台，实现产、学、研良性互动，提高研究生培养质量和企业创新能力。

第二条　权利和义务

（一）甲方权利和义务

1. 甲方每年派遣 5～7 名 林业、风景园林 等专业的研究生到乙方单位进行联合培养、科研实践、开展研究生论文等工作。每位研究生在“基地”的实践时间不少于 6 个月。

2. 甲方负责为派去乙方的联合培养研究生购买保险。

3. 甲方研究生进入乙方进行联合培养、科研实践、开展研究生论文等工作期间，应严格遵守国家和地方有关法律法规及乙方的各项管理规章制度。

本合同项下所作之任何其他承诺、保证、确认的，乙方未按甲方要求限期改正的，甲方有权单方解除合同，而不承担任何责任。

4. 一方在本合同履行过程中向对方发出或者提供的所有通知、文件、文书、资料等；均以本合同所列明的地址送达。一方如果迁址、变更电话，应当书面通知对方，未履行书面通知义务的，一方按原地址邮寄相关材料或通知相关信息即视为已履行送达义务。当面交付上述材料的，在交付之时视为送达；以邮寄方式交付的，寄出、发出或者投邮后即视为送达。

（以下无正文）

附件 1：基地研究生培养方案

甲方单位（盖章）：	乙方单位（盖章）：
授权代表（签字）：	授权代表（签字）：
联系人：冼丽铧	联系人：曾银萍
联系地址：华南农业大学林学与风景园林学院 702 室	联系地址：广州市天河区金慧街 88 号大院 17 栋 115 室
联系电话：13760755892	联系电话：13143375195
电子邮件：331074379@qq.com	电子邮件：1296453090@qq.com
签订日期：2022年 10 月 30 日	签订日期：2022 年 10 月 30 日