中国科技核心期刊（遴选）数据库
中国学术期刊综合评价数据库来源期刊
中国学术期刊（网络版）
中国学术期刊（光盘版）
中文科技期刊数据库
RCCSE中国准核心学术期刊（B+）
超星学术期刊（域出版）
江西省第六届优秀期刊

ISSN 2095-9818
CN 36-1342/S

南方林业科学

South China Forestry Science

2025
2月 第53卷 第1期
February Vol.53 No.1

江西省林业科学院
江西省林学会

ISSN 2095-9818
02>
9 772095 981250

公益广告

森林防火

SENLINFANGHUO

情系一片绿 心防一把火

森林防火 人人有责

全民消防 生命至上

火警请拨

119

目　　次

林木育种与栽培

基于BLUP育种值和GGE双标图的陈山红心杉优良家系选择
……陈兴彬,黎志强,彭小兵,娄永锋,冷春晖,肖平江,肖复明(1)

木荷无性系种子园生长与种实性状的遗传变异分析
……彭溢濠,陈梦义,何万存,刘 娟,朱鸿洋,肖文宇,施茂寅(7)

山苍子优良单株选择与综合评价
……陈 霞,万文娟,邓章文,朱国平,邓依培,刘 娟(14)

不同基质及播种方式对白花树育苗生长的影响
……黄毅杰,朱正斌,李嘉庆,谢德俊,代测枫,黄秋敏,莫明锋(22)

杉木幼苗土壤磷组分对氮磷添加的响应
……杨博涵,哀建国,董 达,邹鹏程(27)

雪灾后间伐保留密度对杉木林的影响研究
……石冠旗,杨模华(33)

^{60}Co-γ射线辐照对不同薄壳山核桃品种的嫁接效应分析
……邓立宝,万 雯,何新华,田荣雄,时德举,苏方贵,苏天明(39)

生物多样性与资源调查

黄龙岩省级自然保护区药用植物资源调查与分析
……何 遥,黄秋淋,林青青(43)

广东平远县野生林木种质资源现状
……王 沉,谢石杨,钟泳林,严法麟,连辉明,谢日芬,殷祚云,谢佩吾(50)

森林生态与功能服务

城市潜在林木树冠覆盖的区域分布与动态变化——以南昌市主城区为例
……王 华,汤浩藩,迟韵阳,罗坤水,黄文超,狄 岚,唐星林(56)

庐山风景名胜区山地湖泊生态系统服务功能价值评价
……文 静,谢冬明(61)

信阳市18种常见园林树种叶片滞尘效应研究
……单燕祥,冯万富,柳 勇,袁 浩(67)

森林灾害与森林保护

基于遥感技术的森林火灾灾后评估研究进展
……赫 鑫,王邵军,陈语奇(73)

南昌市松墨天牛成虫种群发生与消长动态研究
……程 芳,张 驰,周子超,高怀诚,刘兴平,曾菊平(80)

期刊基本参数:CN 36-1342/S*1973**A4*86*zh*P* ¥16*14*2025-02
本刊不以任何形式收取版面费、审稿费　　**举报电话**:0791-83833691

Contents

Forest tree breeding and cultivation

Selection of superior families of Chenshan red-heart Chinese fir based on BLUP breeding value and GGE biplot……CHEN Xingbin, LI Zhiqiang, PENG Xiaobing, LOU Yongfeng, LENG Chunhui, XIAO Pingjiang, XIAO Fuming (1)

Analysis of genetic variation in seed garden growth and seed traits of *Schima superba* PENG Yihao, CHEN Mengyi, HE Wancun, LIU Juan, ZHU Hongyang, XIAO Wenyu, SHI Maoyin (7)

Selection and comprehensive evaluation of *Litsea cubeba* ……CHEN Xia, WAN Wenjuan, DENG Zhangwen, ZHU Guoping, DENG Yipei, LIU Juan (14)

Effects of different substrates and seeding methods on seedling growth of *Styrax tonkinensis* …… HUANG Yijie, ZHU Zhengbin, LI Jiaqing, XIE Dejun, DAI Cefeng, HUANG Qiumin, MO Mingfeng (22)

Response of soil phosphorus fractions in Chinese fir seedlings to nitrogen and phosphorus addition ……YANG Bohan, AI Jianguo, DONG Da, ZOU Pengcheng (27)

Study on the effect of thinning retention density on *Cunninghamia lanceolata* forest after snow disaster ……SHI Guanqi, YANG Mohua (33)

Effect of ^{60}Co-γ irradiation on grafting of different *Carya illinoensis* cultivars ……DENG Libao, WAN Wen, HE Xinhua, TIAN Rongxiong, SHI Deju, SU Fanggui, SU Tianming (39)

Biodiversity and resource investigation

Investigation and research on medicinal plant resources in Huanglongyan Provincial Nature Reserve ……HE Yao, HUANG Qiulin, LIN Qingqing (43)

Investigation and analysis of wild forest tree germplasm resources in Pingyuan County, Guangdong Province……WANG Chen, XIE Shiyang, ZHONG Yonglin, YAN Falin, LIAN Huiming, XIE Rifen, YIN Zuoyun, XIE Peiwu (50)

Forest ecology and functional services

Regional distribution and dynamic change of possible urban tree canopy:a case study of the main urban area of Nanchang City……WANG Hua, TANG Haofan, CHI Yunyang, LUO Kunshui, HUANG Wenchao, DI Lan, TANG Xinglin (56)

Valuation of ecological assets of mountain lakes in Lushan Scenic Area ……WEN Jing, XIE Dongming (61)

Research on dust-retention effects of 18 common landscape tree leaves in Xinyang City ……SHAN Yanxiang, FENG Wanfu, LIU Yong, YUAN Hao (67)

Forest disaster and forest protection

Research progress on post-disaster assessment of forest fire based on remote sensing technology ……HAO Xin, WANG Shaojun, CHEN Yuqi (73)

Adult population occurrence and dynamics of the longhorn beetle, Monochamus alternatus in Nanchang ……CHENG Fang, ZHANG Chi, ZHOU Zichao, GAO Huaicheng, LIU Xingping, ZENG Juping (80)

Serial parameters: CN 36-1342/S*1973*b*A4*86*zh*P* ¥ 16*14*2025-02

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.001

基于BLUP育种值和GGE双标图的陈山红心杉优良家系选择

陈兴彬[1],黎志强[2],彭小兵[2],娄永锋[1],冷春晖[1],肖平江[2],肖复明[1]*
(1.江西省林业科学院,江西乡土树种良种选育与高效利用江西省重点实验室,江西 南昌 330013;2.安福县武功山林场,江西 吉安 343200)

摘 要:【目的】基于BLUP育种值和GGE双标图评价陈山红心杉家系的速生性和稳定性,为陈山红心杉家系的选择和利用提供依据。【方法】对江西省3个试验点的陈山红心杉1.5代种子园31个半同胞家系进行生长性状(胸径)测定,通过最佳线性无偏预测(BLUP)获得各家系4年生胸径育种值,再进行GGE双标图分析,对家系和试验点进行评价。【结果】3地点联合方差分析结果表明,胸径在家系间、地点间以及地点和家系间差异极显著。GGE双标图分析的前两个主成分解释方差变异的94.73%。安福点的代表性和区分力最强,婺源点的代表性和区分力最弱。最速生的家系是21号、17号和8号,最稳定的家系是22号和18号。21号和17号家系既速生又稳定。【结论】3个试验点中,安福试验点有最好的区分力和代表性。综合考虑,21号和17号为既速生又稳定家系。GGE双标图分析法能有效用于陈山红心杉家系及试验地点的评价。

关键词:最佳线性无偏预测;基因型与环境互作;GGE双标图;陈山红心杉
中图分类号:S791.27:S722.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0001-06

Selection of superior families of Chenshan red-heart Chinese fir based on BLUP breeding value and GGE biplot

CHEN Xingbin[1], LI Zhiqiang[2], PENG Xiaobing[2], LOU Yongfeng[1], LENG Chunhui[1], XIAO Pingjiang[2], XIAO Fuming[1]*
(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Improved Variety Breeding and Efficient Utilization of Native Tree Species, Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang Jiangxi 330013, China; 2. Wugongshan Forest Farm of Anfu County, Ji'an Jiangxi 343200, China)

Abstract:【Objective】To provide the basis for the selection and utilization of Chenshan red-heart Chinese fir families, BLUP breeding value and GGE (genotype main effect plus genotype-environmental interaction effect) biplot were deployed to analyze growth data of regional trials.【Method】DBH (diameter at breast height) of 31 half-sib families of Chenshan red-heart Chinese fir at 3 experimental sites in Jiangxi Province were measured at age of 4 years. Through best linear unbiased prediction (BLUP) analysis, the BLUP breeding value of DBH for each family at each site was obtained. GGE biplot based on BLUP breeding value of DBH was analyzed to evaluate families and sites.【Result】The analysis three-site combined variance showed that DBH had a significant difference between families, sites and between families and sites. The first two principal components (PC1 and PC2) of GGE biplot explain 94.73% of the variance based on BLUP breeding value of DBH. Anfu site had the strongest differentiation and representativeness, while Wuyuan site had the weakest differentiation and representativeness. The growth of family 21, 17 and 8 were the fastest, and family 22 and 18 were the most stable.【Conclusion】Anfu site had the best differentiation and representativeness among 3 trial sites. Family 21 and 17 showed both better stability and fast growth. GGE biplot based on BLUP breeding value can be effectively used for evaluation of Chenshan red-heart Chinese fir families and test sites.

Key words: best linear unbiased prediction; genotype by environment interaction; genotype main effect plus genotype-environment interaction effect(GGE) biplot; Chenshan red-heart Chinese fir

收稿日期:2024-09-04;2024-10-09修回
基金项目:国家重点研发计划项目任务(2022YFD2200201-04);江西省重点研发计划项目(20223BBF61005);江西省林业科技创新项目(202111);江西省林业科学院青年科技人才培养项目(2023521101, 2024521103)
第一作者:陈兴彬,男,副研究员,博士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail: xingbinsd@163.com
***通信作者:**肖复明,男,研究员,博士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail: jxxiaofuming@163.com
引文格式:陈兴彬,黎志强,彭小兵,等.基于BLUP育种值和GGE双标图的陈山红心杉优良家系选择[J].南方林业科学,2025,53(1):1-6.
CHEN X B, LI Z Q, PENG X B, et al. Selection of superior families of Chenshan red-heart Chinese fir based on BLUP breeding value and GGE biplot[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):1-6.

性状变异中的遗传组分是树木遗传改良利用的基础，利用基因型选择代替表型选择可以改善遗传改良的效率和精度。最佳线性无偏估计（BLUE）用于获得固定效应的最佳无偏估计值，最佳线性无偏预测（BLUP）用于得到随机效应的最佳无偏估计值[1]。林木表型是由基因、环境和基因环境互作效应（G×E）共同决定的。林木中基因环境互作效应普遍存在，基因环境互作导致相同的林木家系和无性系因环境不同而存在差异[2]。因此正确评估和减少这种互作效应对于优良种质的选择十分重要。联合回归法、B型相关分析、因子分析、主效可加互作可乘模型（Additive main effectes multiplicative interaction，AMMI）和基因型主效加基因型-环境互作效应（Genotype main effect plus Genotype-by-environment interaction，GGE）双标图分析常用于估计林木基因型环境互作效应[3]。GGE可以提供多地点直观的图形结果，评价试验点、鉴定高产和稳定基因型[4]。然而，GGE要求平衡数据、地点间误差同质且仅限固定效应模型，这限制了其在林木中的应用。为克服GGE的固定效应模型、试验地点同质和缺失数据的约束，在进行GGE双标图分析之前，程玲等[5]提出采用空间分析结合因子分析法（FA模型）获得BLUP数据，郑聪慧等[6]提出基于空间变异结合包含测量误差的非结构化矩阵模型（US模型）获得BLUP数据。

陈山红心杉主产于江西省安福县陈山林区，是江西省特有的优良杉木种源，因其近髓心木质部相当大的比例呈油亮的栗褐色而得名，其树干圆直、材质优良、生长迅速，是建筑、家具、装璜的上乘环保之材。由于陈山红心杉木材品质好，已引种至福建、浙江、安徽、湖北、四川等省，在各地生长均表现优良[7-8]。本研究对陈山红心杉区域化试验林31个半同胞家系生长性状进行测定，利用BLUP育种值绘制GGE双标图，评价家系和环境对生长的影响，探讨家系的速生性、稳定性和试验点的区分力和代表性，旨在为陈山红心杉的选育和推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与方法

试验材料为陈山红心杉1.5代种子园子代测定林，参试家系31个。2017年11月分家系收集安福县武功山林场陈山红心杉1.5代无性系种子园的31个无性系自由授粉种子。2018年按家系育苗，2019年分别在婺源县许村镇水埠头村（wy）、安福县武功山林场（af）和信丰县林木良种场（xf）3地营建家系测定林，3个试验点的气候条件见表1。造林采用完全随机区组设计，5株小区，重复8次，株行距2 m×2 m。2022年冬，对3个试验点的4年生红心杉子代测定林进行每木测量胸径。

表1 试验点的气候条件

Tab. 1 Geographical conditions of the test sites

序号	试验点	北纬/°	东经/°	年降水量/mm	年平均气温/℃	无霜期/d
1	婺源县许村镇	29.103 3	117.532 0	1 880.8	16.7	250
2	安福县武功山林场	27.183 8	114.141 5	1 638.3	17.7	282
3	信丰县林木良种场	25.173 3	114.895 0	1 510.0	19.6	298

1.2 数据统计与分析

用Excel进行数据整理，利用R软件中的GLM过程进行性状方差分析。方差分析的统计模型为[9]：

$$y_{ijk}=\mu+s_i+sb_{ij}+f_k+sf_{ik}+\varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

式中：y_{ijk}为观测值，μ为总体均值，s_i为地点效应，sb_{ij}为地点内区组效应，f_k为i家系效应，sf_{ik}为区组和家系交互效应，ε_{ijk}为随机误差。

用R语言lme4包的一般线性混合模型计算每个家系的BLUP育种值[10]。线性混合模型为：

$$y_{ij}=\mu+s_i+sg_{ij}+\varepsilon_{ij} \quad (2)$$

式中：y_{ij}为观测值，μ为总体均值，s_i为环境固定效应，sg_{ij}为环境和个体的互作效应，ε_{ij}为随机误差效应。

使用R语言GGEBiplotGUI程序包绘制GGE双标图，参数Scales选择0，Center选择“G+GE”，SVP选择“Symmetrical”[11]。

2　结果与分析

2.1　生长性状的遗传变异

表2　3个试验点家系胸径生长表现

Tab. 2　The performance of diameter at breast height of the families in three experimental sites

地点	胸径均值/ cm	变幅/ cm	变异系数/ %
婺源	4.59	3.99～5.12	5.70
安福	4.86	4.23～5.43	6.24
信丰	5.59	4.74～6.30	6.71

由表2可知,3个试验点中,信丰试验点参试家系的胸径均值最大,说明信丰试验点的生长量最大。信丰试验点的生长性状变异系数大于其他两地的变异系数,说明信丰试验点的生长性状分化较大。3个试验林总体生长良好,表明陈山红心杉1.5代种子园子代适宜在江西全省造林推广。

3地点联合方差分析结果(表3)表明,胸径在家系间差异均达极显著水平,说明可以进行优良家系的选择。胸径在地点间、地点×家系和重复×家系间都存在极显著差异,表明家系在各试验点生长表现不一致,环境条件显著影响家系生长。

表3　3地点联合方差分析

Tab. 3　Three experimental sites combined variance analysis

变异来源	自由度	平方和	均方	*F*值	*P*值
地点	2	413.141 5	206.570 7	118.87	<0.000 1
地点内重复	21	1 089.571 5	51.884 3	29.86	<0.000 1
家系	30	224.892 0	7.496 4	4.31	<0.000 1
地点×家系	60	280.996 8	4.683 2	2.69	<0.000 1
重复×家系	210	658.034 7	3.133 4	1.80	<0.000 1
误差	3 091	5 371.455 0	1.737 7		

2.2　基于BLUP育种值的GGE双标图分析

为提高遗传评价的精度,采用BLUP法计算每个试验地参试家系的育种值(表4)。3个试验点育种值均大于0的家系有7、8、6、18号,表现出较好的适应性。5、25号家系育种值在3个地点均小于0,表现不佳。其它家系在不同试验点的表现不一致(育种值大于0或小于0),波动性较大。各试验点家系排名不同,说明存在地点×家系互作效应,与方差分析研究结果一致。

表4　参试家系在不同试验地点的胸径育种值

Tab. 4　The breeding value of diameter at breast height of tested families

婺源家系号	胸径育种值	排名	安福家系号	胸径育种值	排名	信丰家系号	胸径育种值	排名
7	0.111 8	1	21	0.334 8	1	17	0.243 6	1
19	0.062 3	2	8	0.289 7	2	6	0.197 8	2
20	0.056 2	3	3	0.238 0	3	28	0.175 4	3
8	0.054 0	4	31	0.236 3	4	11	0.129 5	4
22	0.045 8	5	4	0.195 7	5	14	0.128 4	5
6	0.044 7	6	13	0.171 4	6	1	0.109 9	6
29	0.039 8	7	17	0.152 3	7	32	0.105 9	7
32	0.038 8	8	24	0.120 2	8	9	0.095 3	8
15	0.033 1	9	18	0.113 0	9	21	0.084 1	9
16	0.029 5	10	30	0.099 2	10	19	0.047 0	10
12	0.029 3	11	1	0.076 3	11	7	0.032 5	11
24	0.023 5	12	6	0.073 0	12	23	0.030 9	12
18	0.020 1	13	28	0.063 8	13	18	0.029 4	13
27	0.019 2	14	14	0.057 2	14	16	0.027 4	14
25	−0.003 3	15	2	0.046 6	15	26	0.020 9	15
2	−0.007 8	16	7	0.011 7	16	12	0.019 6	16
14	−0.008 4	17	9	0.009 7	17	8	0.013 0	17
23	−0.009 8	18	19	−0.013 0	18	27	0.001 2	18

表4（续）

婺源家系号	胸径育种值	排名	安福家系号	胸径育种值	排名	信丰家系号	胸径育种值	排名
21	−0.010 6	19	16	−0.018 3	19	15	−0.008 0	19
9	−0.013 1	20	20	−0.018 6	20	3	−0.009 1	20
5	−0.013 7	21	32	−0.030 1	21	25	−0.053 2	21
4	−0.016 8	22	11	−0.051 0	22	22	−0.055 9	22
31	−0.022 9	23	27	−0.052 5	23	31	−0.067 1	23
26	−0.032 7	24	26	−0.067 3	24	30	−0.108 7	24
13	−0.036 9	25	22	−0.075 2	25	29	−0.137 7	25
30	−0.043 6	26	25	−0.104 4	26	4	−0.139 3	26
17	−0.048 6	27	5	−0.152 9	27	13	−0.151 6	27
28	−0.051 0	28	23	−0.161 6	28	24	−0.182 7	28
11	−0.056 3	29	12	−0.188 1	29	5	−0.188 1	29
3	−0.059 1	30	29	−0.245 9	30	2	−0.195 4	30
1	−0.128 8	31	15	−0.285 2	31	20	−0.222 9	31

基于4年生胸径BLUP育种值进行GGE双标图分析（图1～图3），图中wy、af、xf为试验点，1～32为参试家系，x轴和y轴分别为第一主成分（PC1）和第二主成分（PC2）。胸径前两个主成分共同解释方差变异的94.73%，其中PC1解释了58.74%的变异，PC2解释了35.99%，说明分析结果可靠。

2.2.1 试验点的分组情况

GGE双标图将离原点最远的家系连成一个多边形，通过原点对多边形各边作垂线，将多边形分成几个扇形区域，由图1可知，3个试验点各单独形成1个区。

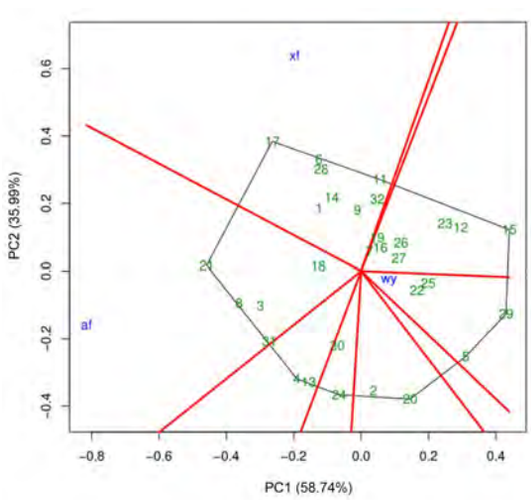


图1 试验点的分组情况

Fig. 1 Grouping of test sites

2.2.2 各试验点的代表性、区分力和最优试验点筛选

图2显示3个试验点的区分力和代表性，过原点的实线为平均环境向量，平均环境向量上的圆圈代表平均环境，试验点与原点的虚线向量和平均环境的夹角代表试验点的代表性，夹角越小代表性越强；试验点虚线向量的长度代表试验点的区分力，向量长度越大，区分力越强。3个试验点中，信丰和安福试验点与平均环境轴的夹角和到原点的距离均相当，说明安福和信丰试验点代表性和区分力均较强。婺源试验点与平均环境轴的夹角为钝角，到原点的距离最短，表明婺源试验点的代表性和区分力均较差。

最理想试验点位于平均环境轴上的箭头处（同心圆圆心）（图3），距离最理想试验点越近，被认为试验地的区分力和代表性越强。通过图中同心圆可知，安福试验点离同心圆圆心最近，其次是信丰县试验点和婺源县试验点，说明安福试验点是本试验的最理想试验点。

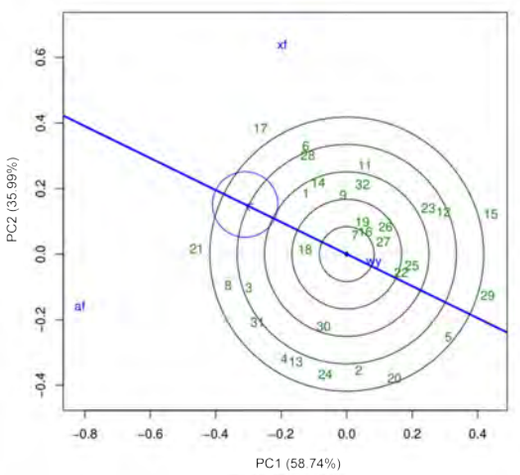


图2 试验点的鉴别力和代表性

Fig. 2 Discrimination and representativeness of test sites

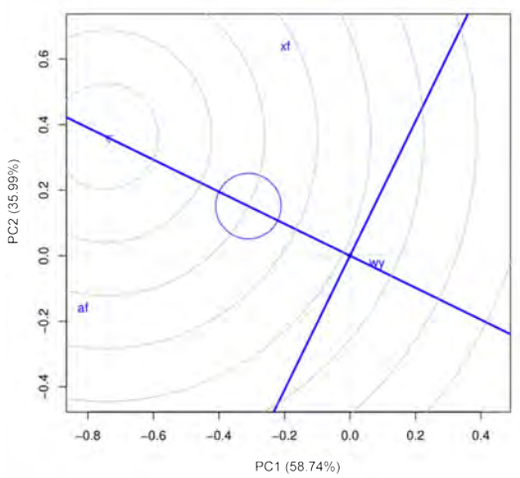


图3 试验点比较

Fig. 3 Comparison of test sites

2.2.3 家系的速生性和稳定性

图4显示家系的速生性和稳定性,带箭头的实线为平均环境轴,平均环境轴上的小圆圈为平均环境,与平均环境轴垂直且过原点的实线为产量的总体均值。箭头一侧的家系高于总体均值,非箭头一侧的家系低于总体均值;距离总体均值越远,胸径越大,反之,胸径越小。平均环境轴上虚线线段代表家系的稳定性,虚线越短越稳定。由图4可知,21、17、8、6、28、3号等家系胸径高于平均胸径,29、5、15、20号等家系胸径低于平均胸径,7、19和13号家系的胸径与总体均值接近。21号是生长量最大家系,其次为17、8号家系。最不稳定家系是4号家系,最稳定家系是22、18号家系。综合考虑胸径的速生性和稳定性,21和17号家系是既速生又稳定家系。

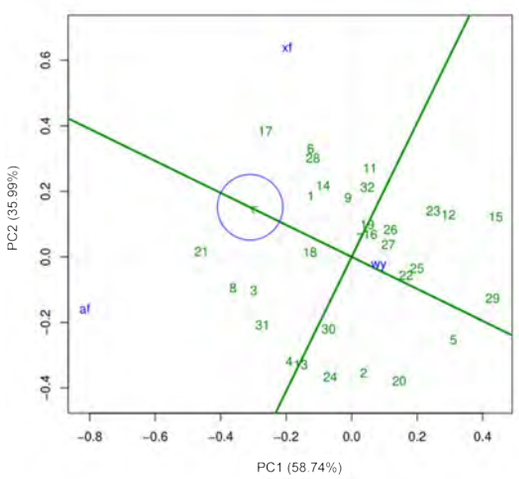


图4 参试家系的速生性与稳定性

Fig. 4 Genotype mean and stability of tested families

3 结论与讨论

信丰试验点参试家系的胸径均值在3个试验点中最大,高于安福和婺源试验点的生长量,这可能是由于信丰县位于赣南地区,气温相对较高,生育期更长。前人研究表明生育期和温度是影响杉木生长的重要因素[12-13]。3地点方差分析结果表明,陈山红心杉胸径在地点间、地点×家系间差异均极显著,表明环境条件显著影响陈山红心杉生长。各试验点参试家系的育种值排名前列的家系不一致,也说明地点×家系互作效应的存在,与方差分析研究结果一致,因此需要进一步进行家系速生性和稳定性分析。

GGE双标图可以直观显示多地点的图形结果,评价试验点、鉴定高产和稳定基因型,模型要求应用固定效应模型、误差同质和平衡数据,是农业品种多点试验分析的先锋分析方法[14-15]。但林业多地点遗传测定中存在各种空间变异和缺株等问题,使GGE双标图分析使用受到限制。近年来,林业学者尝试利用BLUP与GGE双

标图相结合以解决GGE双标图在林业应用中的局限。程玲等[5]采用空间分析结合因子分析法（FA模型）获得BLUP数据，再进行GGE双标图分析，以提高对基因型和试验地评估的精度。郑聪慧等[6]提出基于空间变异结合包含测量误差的非结构化矩阵模型（US模型）获得BLUP数据用于GGE双标图分析，有效的用于华北落叶松家系及试验地点的评价。李金花[16]基于BLUP数据和GGE双标图分析法对黑杨派无性系区域化试验进行分析，为黑杨派引种无性系的选择和应用提供理论依据。使用BLUP育种值代替观测均值进行GGE双标图分析，可以解决试验数据不平衡导致的误差问题，提高多点分析的准确性[17]。王润辉等[18]利用胸径BLUP育种值开展多地点杉木子代测定GGE双标图分析，前两个主成分共解释方差变异的95.28%，YUAN等[3]利用材积BLUP育种值对多地点马尾松子代测定林进行GGE双标图分析，前两个主成分共解释方差变异的95.2%，均得到可靠的试验结果。本文基于胸径BLUP育种值开展陈山红心杉多地点GGE双标图分析，胸径前两个主成分共解释方差变异的94.73%，说明分析结果可靠。从试验点代表性和区分力来看，安福试验点为最理想的试验点，其次为信丰试验点，可能是因为安福县是陈山红心杉的原产地，其气候条件更适合陈山红心杉的生长，虽然与信丰试验点相比生长量稍弱，但代表性和区分力更强。在参试家系评价方面，综合考虑胸径的速生性和稳定性，21、17号家系为既速生又稳定家系。

4年生陈山红心杉区域试验的胸径性状在地点间、地点×家系间差异均极显著，表明环境因素显著影响陈山红心杉生长。基于胸径育种值的GGE分析得出安福县是理想种植环境，综合考虑胸径的速生性和稳定性，21号和17号家系是既速生又稳定家系。本研究仅以4年生测定林的胸径数据进行了GGE双标图分析，因杉木幼龄期生长变化较大，今后还要结合多年的数据对区域试验进行综合评价，以得到更加准确的试验结论。

参考文献：

[1] SWAIN T L, VERRYN S D, LAING M D. An investigation of assumptions made in estimating genetic parameters and predicting genetic gain in a *Eucalyptus nitens* breeding programme in South Africa[J]. New Forests, 2015, 46(1): 7-21.

[2] MIRANDA A C, da Silva P H M, MORAES M L T, et al. Investigating the origin and genetic diversity of improved Eucalyptus grandis populations in Brazil[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 130-138.

[3] YUAN C Z, ZHANG Z, JIN G Q, et al. Genetic parameters and genotype by environment interactions influencing growth and productivity in Masson pine in east and central China[J]. Forest Ecology and Management, 2021, 487: 118991.

[4] 严威凯.双标图分析在农作物品种多点试验中的应用[J].作物学报,2010,36(11):1805-1819.

[5] 程玲,张心菲,张鑫鑫,等.基于BLUP和GGE双标图的林木多地点试验分析[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2018,46(3):87-93.

[6] 郑聪慧,张鸿景,王玉忠,等.基于BLUP和GGE双标图的华北落叶松家系区域试验分析[J].林业科学,2019,55(8):73-83.

[7] 曾志光,杨先锋,肖复明,等.陈山红心杉材性变异及其基因资源利用的研究[J].江西林业科技,2001,29(3):1-6,39.

[8] 陈兴彬,何龙燕,肖复明,等.基于转录组测序的陈山红心杉EST-SSR开发及应用[J].中南林业科技大学学报,2020,40(8):120-127.

[9] 黄少伟,谢维辉.实用SAS编程与林业试验数据分析[M].广州:华南理工大学出版社,2001.

[10] 林元震,陈晓阳.R与Asreml-R统计分析教程[M].北京:中国林业出版社,2014.

[11] FRUTOS E, GALINDO M P, LEIVA V. An interactive biplot implementation in R for modeling genotype-by-environment interaction [J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2014, 28(7): 1629-1641.

[12] 叶志宏,施季森,翁玉榛,等.杉木种源地理变异的影响因子及性状遗传、相关和选择[J].南京林业大学学报(自然科学版),1991,15(2):7-10.

[13] 伍汉斌,段爱国,张建国.杉木地理种源不同林龄生长变异及选择[J].林业科学,2019,55(10):181-192.

[14] 曹元元,丁逸帆,左示敏,等.基于GGE双标图和AMMI模型对江苏省水稻区试品种的丰产性和稳定性分析[J].种子,2021,40(6):38-43,51.

[15] 魏常敏,许卫猛,邢永锋,等.AMMI模型和GGE双标图在黄淮海甜玉米中的应用[J].分子植物育种,2021,19(17):5909-5916.

[16] 李金花.基于BLUP和GGE双标图的黑杨派无性系生长性状基因型与环境互作效应[J].林业科学,2021,57(6):64-73.

[17] 王楚彪,罗建中,何文亮,等.桉树无性系多区域联合测试的G×E分析及选优[J].林业科学,2022,58(11):108-117.

[18] 王润辉,胡德活,韦如萍,等.基于BLUP育种值与GGE双标图分析杉木第三代全同胞家系生长性状的适生性[J].亚热带植物科学,2023,52(1):43-49.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.002

木荷无性系种子园生长与种实性状的遗传变异分析

彭溢濠[1],陈梦义[2],何万存[2],刘 娟[1]*,朱鸿洋[1],肖文宇[1],施茂寅[2]
(1.亚热带森林资源培育江西省重点实验室,江西农业大学林学院,江西 南昌 330045;2.江西省林业科技推广和宣传教育中心,江西 南昌 330038)

摘 要:【目的】研究木荷无性系种子园内生长性状和种实性状的遗传变异,选育优良无性系。【方法】在江西省林业局科技示范园林丰基地采用完全随机设计,将60株木荷(12个无性系,每个无性系5个重复)随机分配至种植区。对12个木荷无性系的树高、胸径、冠幅等10个指标进行方差分析、邓肯多重比较、变异系数分析和相关性分析,并通过主成分分析和聚类分析,选育出优良无性系。【结果】12个无性系在结实量、千粒重、发芽率、发芽势、叶长、叶宽等指标上均存在显著差异。各生长性状和种实性状整体呈中等程度变异,平均变异系数为29.92%,其中发芽势的变异系数最大(60.83%),树高变异系数最小(14.73%)。相关性分析结果表明,无性系树高与胸径呈显著正相关关系,叶长与叶宽、发芽率与结实量、发芽率与发芽势之间呈极显著正相关关系。主成分分析和聚类分析结果表明,无性系sy39、lc21、jo57和sy50综合表现较好,下一步可重点开展子代测定,基于后代表现来准确评估各个无性系的遗传品质及其遗传增益。【结论】无性系sy39表现特别优异,可将其作为优良亲本之一,为种子园的升级换代提供育种繁殖材料。

关键词:木荷;生长性状;种实性状;无性系
中图分类号:S722.3 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0007-07

Analysis of genetic variation in seed garden growth and seed traits of *Schima superba*

PENG Yihao[1], CHEN Mengyi[2], HE Wancun[2], LIU Juan[1]*, ZHU Hongyang[1], XIAO Wenyu[1], SHI Maoyin[2]
(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Subtropical Forest Resources Cultivation, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China; 2. Jiangxi Forestry Science and Technology Promotion and Publicity Education Center, Nanchang Jiangxi 330038, China)

Abstract:【Objective】To study the genetic variation of growth and seed traits in the clonal seed orchard of *Schima superba*, and to select superior clones at an early stage.【Method】A completely randomized design was employed, with 60 *S. superba* trees (12 clones with five replicates each) randomly assigned to a planting area. Variance analysis, Duncan's multiple range test, coefficient of variation analysis, and correlation analysis were conducted on 10 indexes such as tree height, diameter at breast height and crown width of 12 *S. superba* clones at the Linfeng Base of Jiangxi Provincial Forestry Bureau Science and Technology Demonstration Garden. Superior clones were selected through principal component analysis and cluster analysis.【Result】Significant differences were observed among the 12 clones in terms of fruit yield, 1000-seed weight, germination rate, germination potential, leaf length, and leaf width. The overall variation in growth and seed traits was moderate, with an average coefficient of variation of 29.92%. The maximum coefficient of variation was found in germination potential (60.83%), while the minimum was in tree height (14.73%). Correlation analysis showed significant positive correlations between tree height and diameter at breast height, leaf length and leaf width, germination rate and fruit yield, and germination rate and germination potential. Principal component analysis and cluster analysis indicated that Clone sy39, lc21, jo57, and sy50 performed well comprehensively. Progeny testing of these clones is recommended in the next step to accurately assess their genetic quality and genetic gain.【Conclusion】Clone sy39 was particularly outstanding and can be used as one of the superior parents to provide breeding materials for the upgrading and renewal of seed orchards.

Key words: *Schima superba*; growth traits; seed fruit traits; Clone

收稿日期:2024-10-28;2024-12-25修回
基金项目:江西省林业局林业科技创新专项项目(创新专项〔2023〕24号);江西省林业专项资金林木种苗培育补助项目
第一作者:彭溢濠,男,硕士在读,主要从事森林培育研究。E-mail: pengyihao2001@163.com
***通信作者:**刘娟,女,副教授,博士,主要从事林木遗传改良研究。E-mail: liu_juan1122@163.com
引文格式:彭溢濠,陈梦义,何万存,等.木荷无性系种子园生长与种实性状的遗传变异分析[J].南方林业科学,2025,53(1):7-13.
PENG Y H, CHEN M Y, HE W C, et al. Analysis of genetic variation in seed garden growth and seed traits of *Schima superba*[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 7-13.

木荷(*Schima superba*)为山茶科(Theaceae)木荷属(*Schima*)常绿阔叶大乔木[1-2],是亚热带常绿阔叶林的主要建群种和南方主要的造林树种之一[3]。木荷的木材坚重致密,结构均匀,是珍贵优质的用材树种,广泛用于建筑、器材和木制工艺品制作等领域[4-5]。木荷具有浓密的树冠和厚实的叶片,叶片含水量较高,具有出色的抗火性能和萌芽力,是我国南方防火林带常用的造林树种[6-7]。

种子园是由人工选育出来的、具有优良性状的优株而营造的人工林,是林木栽培及生产提供优良种子的特殊场圃[8]。通过对种子园无性系生长和种实性状的调查与分析,可初步淘汰一些表现不良的无性系或家系,提升种子园良种种子的遗传品质和提高种子产量[9-10]。木荷优良无性系种子园营建和管理对木荷遗传品质的改良和良种的应用具有重要作用。我国木荷种子园建设历史较短,建园理论和技术还不成熟,种子园无性系间结实和种子的品质相差悬殊,在一定程度上影响了种子园的良种生产[11-12]。

江西省是木荷的主产区之一[13]。为了提升江西省木荷人工林的品质,江西省林业局科技示范园于2017年引种了中国林业科学院亚热带研究所选育的木荷优良无性系,并构建木荷初级无性系种子园,但尚未对种子园建园亲本无性系生长状态、种实性状进行评价,不清楚其产种能力和种子遗传品质。因此,本研究对木荷初级无性系种子园的12个无性系进行了生长性状和种实性状的调查,并根据这些性状对各个无性系进行分析和评估,全面了解木荷无性系在江西赣北地区的生长表现,以期为木荷种子园的丰产经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验材料来源于江西省林业局科技示范园林丰基地(原"江西省林木育种中心")木荷无性系初级种子园,建园材料为引种自中国林业科学院亚热带研究所选育的木荷优良无性系,种子园日常经营管理主要采用抚育、施肥和垦复等一般林木生产经营模式。该种子园地理坐标为115°49′ N,29°01′ E,海拔约31 m,土壤质地粘重,呈微酸性,属于中亚热带湿润季风性气候,光热丰富,气候温暖,年平均气温16.9℃,1月平均气温3.3℃,7月平均气温29℃,年平均降水量1 485.3 mm。

1.2 试验材料

2017年11月整地,翌年1月定植,株行距为3 m×4 m,采用完全随机设计,每个无性系5个重复,绘制定植图。经实地踏查后,选取12个无性系为研究对象,分别为无性系xf19、jo18、sy24、龙17、jo57、jo59、sy39、jo15、sy50、jo49、xf3、lc21,每个无性系选取3株生长状况较好的单株,调查每个单株的生长性状和种实性状。

1.3 试验方法

2023年10月,测定每个无性系的单株胸径、冠幅(取东西冠幅和南北冠幅的平均值)、株高等生长指标。木荷各无性系的千粒重由测得的百粒重估算,重复3次[14]。每个单株随机采集树体中上部向阳的10片叶片,每个无性系共计30片叶。利用直尺在标准计算纸上量出叶长(从叶基到叶尖,不含叶柄)和叶宽(叶片上与主脉垂直方向上的最宽处),或用游标卡尺直接测量。

2024年3月,对采集的12个无性系的种子进行萌发试验,测定不同无性系种子的萌发率和发芽势。每个无性系随机选择100粒饱满健壮的种子。用清水浸泡种子12～24 h,用蒸馏水反复冲洗3次,沥干后均匀撒播于垫有滤纸的培养皿上,置于25℃恒温培养箱中培养。当木荷种子胚根突破种皮1 mm时可记为发芽,每日统计各处理木荷种子的单日平均发芽数,连续统计3 d,并计算各组木荷种子的发芽情况。

种子发芽率:$P = M_1/M_0 \times 100\%$ (1)

发芽势:$G=M_2/M_0 \times 100\%$ (2)

变异系数:$CV = \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%$ (3)

式中,M_0为供试木荷种子数,M_1为试验期内正常发芽木荷种子数,M_2为前7天的种子发芽数量,σ为标准差,μ为平均值。

1.4 数据统计和分析

采用Excel对调查数据进行整理,用SPSS 25.0对各性状差异进行统计分析,用基于R语言的bioplot进行各

个性状PCA分析，并基于hclusi函数和plot函数对无性系各性状进行系统聚类分析，用Origin绘图。

2　结果与分析

2.1　木荷无性系生长性状差异性

根据参试木荷无性系的生长性状结果(表1)可知，参试无性系树高平均值为4.82 m，其中无性系jo15树高最高，为5.67 m，达到平均值的1.17倍。参试无性系的胸径平均值为27.63 cm，其中无性系jo57胸径最大，为32.73 cm，达到平均值的1.18倍；7个无性系的胸径高于平均值，占参试无性系的58.33%。参试无性系的冠幅平均值为3.80 m，其中无性系sy39冠幅最大，为4.48 m，达到平均值的1.18倍；6个无性系的冠幅高于平均值，占参试无性系的50.00%。

木荷叶片性状与其单株叶片水分含量和叶片耐火性成正比，因此，木荷无性系间叶片性状变异对其的应用具有重要意义。本研究选用了叶长、叶宽和长宽比3个叶片性状。参试无性系中，无性系sy39叶长最长，为14.59 cm，是平均值的1.19倍；6个无性系的叶长高于平均值，占参试无性系的50.00%。无性系jo15的叶宽最宽，为5.09 cm，是平均值的1.19倍；6个无性系叶宽高于平均值，占参试无性系的50%。叶片长宽比最大的是无性系sy50，为3.25，最小的是xf3，为2.70；4个无性系长宽比高于平均值，占参试无性系的33.33%。

方差分析结果表明(表2)，木荷种子园内的生长性状中树高、胸径和冠幅的差异均未达到显著水平，叶宽与叶长性状的差异均达到极显著水平($P<0.01$)，叶片长宽比差异不显著。

表1　不同木荷无性系之间生长性状的比较

Tab. 1　Comparison of growth traits among different clones of *S. superba*

无性系	树高/ m	胸径/ cm	冠幅/ m	叶长/ cm	叶宽/ cm	长宽比
xf19	4.07±1.12b	28.23±8.57a	4.25±0.61a	9.81±1.82d	3.60±0.23cd	2.73±0.45b
jo18	4.73±0.31ab	28.27±0.95a	3.95±0.74ab	12.14±0.57abcd	4.27±0.20abcd	2.87±0.10b
sy24	4.83±0.49ab	27.93±8.45a	3.83±0.80ab	12.33±1.07abcd	4.17±0.47bcd	2.98±0.19b
龙17	4.27±1.02b	26.10±6.88a	2.97±0.94b	10.80±1.59cd	4.01±0.52cd	2.71±0.14b
jo57	4.83±0.32ab	32.73±8.10a	3.78±0.53ab	9.75±2.35d	3.45±0.94d	2.88±0.42b
jo59	4.83±0.15ab	25.33±7.68a	3.97±0.16ab	11.76±1.43bcd	4.12±0.53cd	2.86±0.06b
sy39	4.63±0.51ab	29.03±5.85a	4.48±0.38a	14.59±0.60a	5.03±0.36ab	4.12±1.87a
jo15	5.67±0.06a	26.53±2.32a	3.48±0.84ab	13.98±0.84ab	5.09±0.16a	2.75±0.08b
sy50	5.40±0.50ab	27.90±4.16a	4.05±0.43ab	14.18±0.42ab	4.42±0.17abc	3.25±0.11ab
jo49	5.17±0.45ab	29.80±4.97a	3.73±0.21ab	12.46±1.94abcd	4.44±0.68abc	2.83±0.01b
xf3	4.60±1.35ab	24.27±3.10a	3.38±0.71ab	11.79±1.49bcd	4.40±0.28abc	2.70±0.32b
lc21	4.80±0.56ab	25.47±6.78a	3.68±0.70ab	13.33±0.23abc	4.25±0.31abcd	3.15±0.19ab
平均值	4.82±0.71	27.63±5.57	3.80±0.65	12.24±1.92	4.27±0.60	2.99±0.62

注：同列不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: different lowercase letters in same column indicated significant differences at 0.05 level among different treatments.

2.2　木荷无性系种实性状差异性

由参试木荷无性系的种实性状结果(表3)可知，无性系sy39结实量最大，为28.18 g，是平均值的2.19倍；5个无性系结实量高于平均值，占参试无性系的42.00%。无性系jo49千粒重最大，为6.91 g，千粒重最小的是jo18，为3.58 g；5个无性系千粒重高于平均值(5.26 g)，占参试无性系的42.00%。无性系sy39的发芽率最高，为47.00%，发芽率最低的是无性系xf3，仅为5.00%；发芽率高于平均值的无性系有6个，占参试的无性系的50.00%。发芽势最高的是无性系jo49，为23.67%；最低的是无性

表2　不同木荷无性系间生长性状的方差分析

Tab. 2　Variance analysis of growth traits among different clones of *S. superba*

性状	*F*	显著性
树高	1.156	0.365
胸径	0.5	0.884
冠幅	1.131	0.382
叶长	4.169**	0.002
叶宽	3.232**	0.008
长宽比	1.376	0.246

注：*表示在0.05水平(双侧)上差异显著，**表示在0.01水平(双侧)上差异极显著。

Note: * meant significant difference at 0.05 level (bilateral), ** meant significant differences at 0.01 level (bilateral).

系sy24，仅为4.00%；发芽势达到平均值的无性系有6个，占参试无性系的50%。

方差分析结果(表4)表明，不同木荷无性系的结实量、千粒重和发芽率的差异均达到极显著水平($P<0.01$)，发芽势的差异达到显著水平($P<0.05$)。

表3 不同木荷无性系之间种实性状的比较

Tab. 3 Comparison of growth traits among different clones of *S. superba*

无性系	结实量/ g	千粒重/ g	发芽率/ %	发芽势/ %
xf19	7.47±1.51ef	4.80±0.08e	11.33±3.79f	8.67±3.79cde
jo18	6.03±0.52f	3.58±0.10i	20.67±4.04e	18.33±2.31ab
sy24	15.69±2.23c	3.76±0.03h	6.00±2.00fg	4.00±1.00e
龙17	6.36±1.39f	6.23±0.17b	27.67±3.79cd	14.67±5.13bc
jo57	22.35±3.38b	4.63±0.09f	38.33±4.16b	14.67±3.06bc
jo59	8.62±1.94ef	4.46±0.11g	26.67±1.53d	17.67±3.51ab
sy39	28.18±1.84a	6.24±0.07b	47.00±1.00a	23.33±7.37a
jo15	8.03±0.62ef	6.74±0.09a	9.33±2.08fg	4.33±2.08de
sy50	11.01±2.23de	5.43±0.11c	20.67±1.53e	11.00±1.73cd
jo49	13.36±2.48cd	6.91±0.05a	32.67±6.03c	23.67±4.73a
xf3	7.75±1.65ef	5.15±0.14d	5.00±2.65g	4.67±1.53de
lc21	20.69±2.37b	5.09±0.09d	40.33±3.79b	5.67±1.53de
平均值	12.88±7.34	5.26±1.07	23.81±13.94	12.56±7.64

注：同列不同小写字母表示不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)。

Note: different lowercase letters in same column indicated significant differences at 0.05 level among different treatments.

表4 不同木荷无性系的种子性状的方差分析

Tab. 4 Analysis of variance of seed traits in different clones of *S. superba*

性状	*F*	显著性
结实量	40.849**	0.000
千粒重	366.159**	0.000
发芽率	60.693**	0.000
发芽势	2.866*	0.015

注：*表示在0.05水平(双侧)上差异显著，**表示在0.01水平(双侧)上差异极显著。

Note: * meant significant differences at 0.05 level (bilateral), ** meant significant differences at 0.01 level (bilateral).

2.3 木荷无性系生长性状和种实性状变异性分析

对木荷种子园无性系的各参试性状进行变异程度分析(表5)，结果表明，参试无性系的树高、胸径、冠幅、叶长、叶宽、长宽比、千粒重的变异系数为14.73%～20.74%，属于中等变异程度，说明这些性状在无性系之间存在一定差异，但差异相对较小，可能受到遗传和环境因素的共同影响。树高和冠幅的变异系数分别为14.73%和17.11%，变化幅度分别为2.00～6.00 m和1.95～4.95 m，表明无性系在生长形态上存在一定差异，但整体生长趋势较为一致。结实量、发芽率、发芽势这3个性状的变异系数较高，分别为56.99%、58.55%和60.83%，变化幅度较大，如结实量为3.77～30.01 g，发芽率和发芽势的变化范围更是跨越了几十个百分点。这表明这些性状在无性系之间存在显著差异，可能与遗传因素密切相关，遗传改良潜力较大。10个性状的平均变异系数为29.92%，整体呈现中等程度的变异。这表明木荷无性系在这些性状上存在一定程度的变化，但变化范围相对适中，既不过于单一，也不过于分散。

表5 各参试性状变异情况

Tab. 5 Comparison of leaf characters of different *S. superba* clones

性状	平均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/ %
树高/ m	4.82	0.71	6.00	2.00	14.73
胸径/ cm	27.63	5.57	39.60	18.20	20.16
冠幅/ m	3.80	0.65	4.95	1.95	17.11
叶长/ cm	12.24	1.92	19.30	6.90	15.69
叶宽/ cm	4.27	0.60	6.60	2.20	14.75
长宽比	2.99	0.62	4.29	1.86	20.74
结实量/ g	12.88	7.34	30.01	3.77	56.99

表5(续)

性状	平均值	标准差	最大值	最小值	变异系数/%
千粒重/g	5.26	1.07	6.95	3.51	20.34
发芽率/%	23.81	13.94	48.00	3.00	58.55
发芽势/%	12.56	7.64	29.00	2.00	60.83
平均值	–	–	–	–	29.92

2.4 木荷无性系各性状间的相关性分析

对木荷无性系的10个性状指标进行相关性分析(表6),结果表明树高与胸径存在显著正相关关系($P<0.05$),这说明随着树木胸径的增加,其树高也在增加,显示出树木生长的一致性。树木胸径增长有利于其结构稳定性和提高对光照的竞争能力,同时相应地增加树高以获取更多的光照。这种模式在许多树种中是普遍存在的,尤其是在成熟稳定的森林生态系统中。叶长与叶宽存在极显著正相关关系($P<0.01$),说明各参试无性系中叶片越长,其叶宽也较大,这反映了木荷叶片在形态发育上的协调性,即在一定的生长条件下,叶片的长和宽会按照一定的比例增长,以保持其结构和功能的稳定性。结实量与发芽率存在极显著相关关系($P<0.01$),说明来自高产母树的种子具有良好的种子萌发能力。发芽率与发芽势存在极显著正相关关系($P<0.01$),说明种子的发芽成功率主要取决于初期萌发的种子数量,而后期的发芽数量相对较少。

表6 不同木荷无性系之间的相关性分析

Tab. 6 Correlation analysis of different clones of *S. superba*

	树高	冠幅	胸径	叶长	叶宽	长宽比	结实量	千粒重	发芽率	发芽势
树高	1	0.154	0.377*	0.233	0.169	0.150	0.011	0.213	−0.026	−0.076
冠幅		1	0.194	0.322	0.187	0.177	0.263	−0.154	0.163	0.150
胸径			1	0.235	0.272	−0.098	0.206	0.024	0.144	0.145
叶长				1	0.855**	0.128	0.168	0.258	−0.002	0.006
叶宽					1	−0.394*	0.015	0.304	−0.134	−0.007
长宽比						1	0.262	−0.041	0.256	0.051
结实量							1	0.074	0.664**	0.202
千粒重								1	0.263	0.216
发芽率									1	0.630**
发芽势										1

注:*表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上极显著相关。

Note: * indicated significant association at 0.05 level (bilateral), ** indicated significant association at 0.01 level (bilateral).

2.5 木荷无性系各性状间的主成分分析

基于木荷不同无性系的10个性状,通过主成分分析对这些性状进行综合评估,如表7所示,根据特征值大于等于1的原则,共提取出4个主成分,累计方差贡献率为82.31%,可以反映原始数据的大部分信息。第一主成分贡献率为31.24%,发芽率、发芽势、结实量和长宽比主成分载荷相对较高。第二主成分的贡献率为25.67%,叶长、叶宽、树高和胸径主成分载荷相对较高。以第一主成分和第二主成分获得双序图以综合评价各无性系的表现(图1),前两轴能够解释总方差的比例是56.9%。结果表明,所有指标在PC1呈现正相关性。叶宽、叶长、叶长宽比、树高、种子千粒重和冠幅在PC2呈现正相关性;结实量、种子发芽率、种子发芽势和胸径在PC2呈现负相关性。无性系sy39表现最优,结实量、种子发芽率、种子发芽势、冠幅、叶长宽比等性状均排序靠

表7 各指标的各主成分分析及因子载荷

Tab. 7 Principal component analysis and factor loadings of various indicators

指标	PC1	PC2	PC3	PC4
树高	0.249	0.533	0.068	0.685
胸径	0.500	−0.506	−0.018	0.18
冠幅	0.474	0.061	−0.524	−0.418
叶长	0.422	0.872	−0.142	−0.144
叶宽	0.141	0.898	0.085	−0.366
长宽比	0.673	0.157	−0.365	0.428
结实量	0.797	−0.131	−0.064	0.027
千粒重	0.208	0.424	0.828	0.055
发芽率	0.767	−0.326	0.355	−0.044
发芽势	0.584	−0.358	0.424	−0.292
特征值	3.124	2.567	1.435	1.105
贡献率/%	31.24	25.67	14.36	11.05
累计贡献率/%	31.24	56.91	71.26	82.31

前。无性系sy50的千粒重、树高、叶长、叶宽等性状表现较好。无性系lc21和jo49在各个性状中表现居中，无性系xf3、龙17、sy24、xf19、jo59和jo18的表现较差。千粒重的箭头最短，表明它对以种实性状为主的第一主成分和以生长性状为主的第二主成分贡献并不大。

2.6 木荷无性系性状的聚类分析

对木荷无性系性状进行系统聚类分析(图2)，结果显示参试无性系共划分为3个类群。第Ⅰ类群包含3个无性系材料，分别为无性系sy39、lc21、jo57，该类群的结实量和种子发芽率均在平均值以上，树高、胸径和冠幅表现良好，植株体型较大，其中无性系sy39的生长性状和种实性状均排列靠前。第Ⅱ类群包含5个无性系材料，分别为无性系龙17、jo59、jo18、sy50、jo49，该类群的结实量、千粒重、发芽率和发芽势表现居中，均接近平均值。第Ⅲ类群包含4个无性系材料，分别为无性系jo15、xf3、xf19、sy24，该类群的种实性状整体表现较差，只有无性系jo15千粒重表现良好。由以上的分类结果可以看出第Ⅰ类群的无性系sy39、lc21和jo57综合表现优于其他无性系，其中无性系sy39最优。

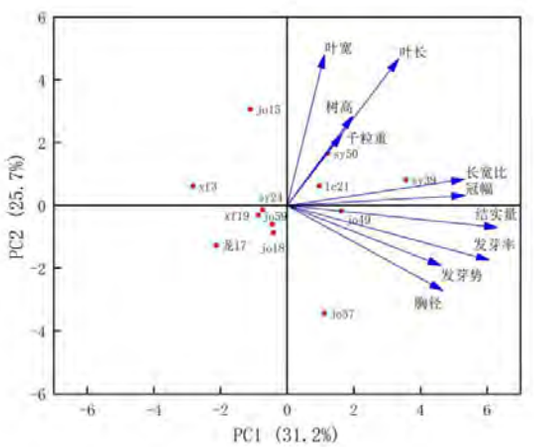


图1 不同木荷无性系各性状的PCA分析

Fig. 1 PCA analysis of variaus traits of different clones of *S. superba*

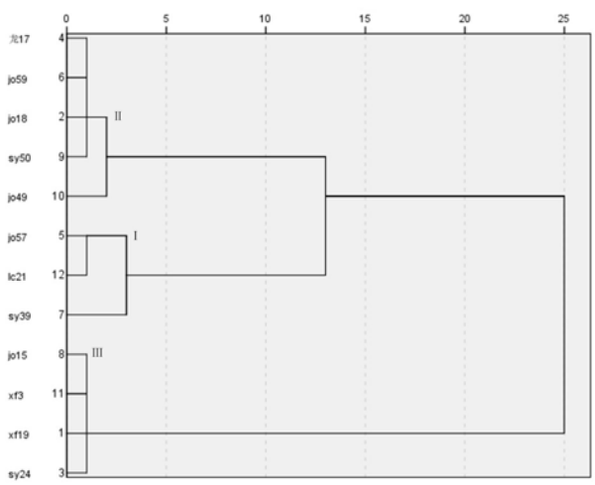


图2 12个木荷无性系聚类分析结果

Fig. 2 Results of cluster analysis of 12 *S. superba* clones

3 结论和讨论

通过研究分析木荷种子园12个无性系的10个生长性状和种实性状，结果发现，生长性状之间的差异没有达到显著水平，即树高、胸径和冠幅的差异均未达到显著水平；而种实性状之间的差异达到显著水平，其中，结实量、千粒重、发芽率的差异均达到极显著水平，发芽势的差异达到显著水平。通过对木荷无性系种子园各性状的变异分析发现，各无性系间存在一定程度变异，其中发芽势变异系数最大(60.83%)，其次是发芽率(58.55%)和结实量(56.99%)，而树高、冠幅、胸径、千粒重等性状变异较小。郑如德等[15]通过研究木荷种子园不同种源的生长变异规律，发现不同种源木荷的生长性状变异极为显著。这与本研究的木荷无性系种子园的研究结果不一致，可能是木荷不同地理种源间群体差异较大，而种子园的建园材料均来自筛选后的优株，变异幅度较小，下一步选育的潜力较小。此外，本研究发现，不同无性系种子的发芽率和发芽势的变异系数最大，这可能是由于各无性系种子的成熟时间存在一定的差别。前期的采种发现，不同无性系结实期相差近一个月。而种子园在无性系配置中存在近交或者自交现象，也容易导致种子败育，从而引起种子空壳，种子萌发率低。研究发现，蒙古栎(*Quercus mongolica*)自交或与具有一定亲缘关系的个体近交，在一定程度上会导致种子生活力衰退[16]；油茶自交或近交时结实量低，或完全不结实，种子生活力下降，生长退化[17]。因此，在种子园规划初期，优选母树的标准考虑到了种子园所处环境的复杂性，以及为了避免无性系间的自交和近交，确保种子园后代具有广泛的遗传基础[9]。在种子园经营管理过程中，可开展杂交授粉试验，确定不同无性系杂交的结实率，提高种子园的种子的数量和质量。

通过分析木荷无性系的各个性状间相关性发现，树高与胸径、叶长与叶宽之间存在显著正相关关系。说

明在种子园内的木荷植株生长的一致性，树木胸径增长有利于其结构稳定和提高对光照的竞争能力，同时相应地增加树高以获取更多的光照。结实量与发芽率呈极显著正相关关系，韩净等[18]在不同结实量的杉木种子发芽率与种实性状相关性及通径分析研究中的结果表明，发芽率与种子产量没有显著相关性。木荷种子园中结实量大的无性系，其种子品质也更高，有利于木荷的生长繁衍[19]。而杉木涩籽的形成可能与特定基因型有关，遗传因素对涩籽率的影响较大，可能对发芽率产生影响，但不一定会直接影响种子产量。王靖林[20]在向日葵花盘不同部位种子活力差异研究中的结果表明，种子结实量差异是衡量树种繁衍生长的重要指标。通常，高结实率表明种子在生长发育过程中具有较强的环境适应能力。结实量越高，种子扩散繁衍更有利；而发芽率越高，其扩散繁衍更有效。此外，本研究结果显示，树高、冠幅、胸径间的相关性系数均低于0.5。郑如德等[15]在木荷优树自由授粉家系生长性状分析与早期选择研究中发现，木荷的树高、胸径、材积两两的相关系数均大于0.7，这显著高于本研究相关性分析结果。这可能是由于本研究为同质园内的木荷无性系，林地为较缓坡，生长环境相对一致，环境对其影响较小。

主成分分析的双序图结果表明，无性系sy39、sy50与其他无性系相比在各性状方面综合表现更好，而无性系lc21与jo49在各个性状方面表现良好。分析结果显示，第Ⅰ类群无性系材料，即无性系sy39、lc21和jo57的各性状都表现较优。结合两种分析结果，本研究认为无性系sy39、lc21、jo57和sy50综合性状表现优异，其中无性系sy39位居第一。

综上所述，林丰基地木荷无性系种子园在经营管理过程中，可考虑将无性系sy39、lc21、jo57和sy50作为优良无性系，下一步可重点对这些无性系开展子代测定工作，基于后代表现进一步准确评估各个无性系的遗传品质及其遗传增益。其中，对表现特别优异的无性系sy39，可将其作为优良亲本之一，开展双亲清楚的杂交授粉，筛选优良杂交子代，为木荷种子园升级改造提供遗传基础更为丰富和品质更优良的建园材料。

参考文献：

[1] 倪健.中国木荷及木荷林的地理分布与气候的关系[J].植物资源与环境,1996,5(3):28-34.

[2] 肖复明,曾志光,包国华,等.木荷种源苗期生长性状地理变异及遗传参数估算[J].江西农业大学学报,2004,26(4):545-550.

[3] WANG Y P, WU G L, HUANG S H, et al. Analysis of genetic parameters of growth and wood traits provides insight into the genetic improvement of *Schima superba*[J]. Tree Genetics & Genomes, 2024, 20(2): 8.

[4] 王家燚,陈焕伟,张蕊,等.木荷全同胞家系生长与分枝性状的遗传变异及效应分析[J].浙江农林大学学报,2023,40(4):738-746.

[5] 李建光.木荷的生物学特征及其造林技术[J].现代园艺,2018(23):62-63.

[6] BAI Q S, SHI L L, LI K J, et al. The construction of lncRNA/circRNA-miRNA-mRNA networks reveals functional genes related to growth traits in *Schima superba*[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2024, 25(4): 2171.

[7] BAI Q, HE B, CAI Y, et al. Genetic diversity and population structure of *Schima superba* from Southern China[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2022, 10:879512.

[8] 李启少,鲁华,赵文植,等.楚雄华山松种子园无性系生长差异分析[J].农业与技术,2023,43(10):52-55.

[9] 李淑辉.油松种子园营建和经营管理技术[C]//山西省林学会,山西省林木种苗协会,山西省林业种苗管理总站.山西省林木种苗建设研究会议论文集,太原,2007:67-69.

[10] 欧阳天林,朱柯帆,邱建勋,等.木荷种子园自由授粉家系生长遗传变异及初选[J].中南林业科技大学学报,2022,42(9):17-23.

[11] 鲍长楠.木荷种子园的营建技术[J].安徽农学通报,2019,25(6):87-88.

[12] 王建明.木荷良种造林效果早期评价[J].福建林业科技,2024,51(2):66-70,148.

[13] 徐福华,傅雪罡,刘光正.江西常绿阔叶林群落类型研究[J].南方林业科学,2017,45(5):75-78.

[14] 唐洁,汤玉喜,杨艳,等.不同种源木荷种子形态变异研究[J].湖南林业科技,2015,42(6):61-64,69.

[15] 郑如德,钱国财,潘昕,等.木荷优树自由授粉家系生长性状分析与早期选择[J].防护林科技,2023(5):17-22.

[16] 蔡艺玮,程广有.蒙古栎种子园花期同步性分析[J].北华大学学报(自然科学版),2022,23(4):441-448.

[17] 彭邵锋,陈佳辉,陈永忠,等.油茶种子园高效营建与丰产培育技术[J].湖南林业科技,2012,39(5):115-119.

[18] 韩净,叶腾云,叶代全,等.不同结实量的杉木种子发芽率与种实性状相关性及通径分析[J].种子,2023,42(7):72-76,95.

[19] 贾春雷,尹海波,王丹,等.黄精种子与种苗质量分级标准研究[J].时珍国医国药,2023,34(8):1969-1973.

[20] 王靖林.向日葵花盘不同部位种子活力差异研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.003

山苍子优良单株选择与综合评价

陈 霞[1,2],万文娟[1],邓章文[1],朱国平[1],邓依培[1],刘 娟[2*]
(1.抚州市林业科学研究所,江西 抚州 344000;2.江西农业大学 林学院 森林培育重点实验室,江西 南昌 330045)

摘 要:【目的】探究江西省山苍子优树选择标准与综合评价方法,筛选经济性状表现优异的优良单株。【方法】以江西省萍乡和贵溪初选的72株候选优树为研究对象,测定树高、胸径、枝下高等14个生长性状和经济性状,并采用主成分分析法、隶属函数法进行优株综合评价。【结果】14个选优性状存在丰富变异,其中柠檬醛含量的总变异系数最小,为5.75%,稳定性较高;鲜果产量和精油产量的总变异系数较大,分别为148.63%、51.78%。树高、胸径等5个生长性状与百粒果鲜重、标准枝产量、鲜果产量、精油含量4个经济性状之间存在显著相关关系,而与结果枝率之间相关性不显著。基于主成分分析法和隶属函数法综合评价选出8个优良单株,分别为PX-1010、PX-0003-1、PX-0002-3、PX-0002、PX-0005-3、PX-0006-1、GX-837-1、GX-837;8个山苍子优株可聚为3个类群:类群Ⅰ为高精油含量且综合性状优良型优株,类群Ⅱ为高鲜果产量型优株,类群Ⅲ为高柠檬醛型优株。【结论】主成分分析法和隶属函数法可有效评价山苍子优良单株,树高和柠檬醛产量可作为优树选择的重要指标。

关键词:山苍子;优树选择;选优性状;主成分分析法;隶属函数法
中图分类号:S793.9 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0014-08

Selection and comprehensive evaluation of *Litsea cubeba*

CHEN Xia[1,2], WAN Wenjuan[1], DENG Zhangwen[1], ZHU Guoping[1], DENG YiPei[1], LIU Juan[2*]
(1.Forestry Research Institute of Fuzhou, Fuzhou Jiangxi 344000, China; 2. Key Laboratory of Silviculture, Forestry College, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China)

Abstract:【Objective】To explore the selection criteria and comprehensive evaluation methods of *Litsea cubeba* superior trees in Jiangxi Province, and to select excellent individual trees with excellent economic traits as the breeding goal, so as to provide a theoretical basis for the popularization and application of *L. cubeba* superior clones.【Method】The 72 candidate trees from Pingxiang and Guixi in Jiangxi Province were selected as the research objects. The variation of 14 growth and economic characters, such as tree height, breast height diamete, and under branch height, were analyzed. Principal component analysis, subordination function and cluster analysis were used to comprehensively evaluate the superior trees.【Result】There were abundant variations in the 14 selected traits, among which the total coefficient of variation of citral content was the smallest, 5.75%, with high stability. However, the total coefficient of variation of fresh fruit yield and essential oil yield was larger (148.63%, 151.78%). The results of correlation analysis showed that there was no significant correlation between the five growth traits and the percentage of bearing branches, but there was a significant correlation with the fresh weight of 100 seeds, the yield of standard branches, the yield of fresh fruits, and the content of essential oil. Based on the comprehensive evaluation of principal component analysis and membership function, eight excellent individual plants were selected: PX-1010, PX-0003-1, PX-0002-3, PX-0002, PX-0005-3, PX-0006-1, GX-837-1, GX-837. By cluster analysis, 8 superior *L. cubeba* plants were divided into three groups: group I belonged to high essential oil content plants with excellent comprehensive properties, group Ⅱ belonged to high fresh fruit yield type plants, and group Ⅲ belonged to high citral type plants.【Conclusion】Principal component analysis and membership function can effectively evaluate the excellent individual plants of *L. cubeba*, tree height and citral production can be important indicators for selecting superior trees.

Key words: *Litsea cubeba*; superior tree selection; selected traits; principal component analysis; membership function method

收稿日期:2024-09-06;2025-01-24修回
基金项目:江西省科学技术厅重大科技研发专项(20203ABC28W016);江西省林业局樟树研究专项(创新专项〔2020〕07)
第一作者:陈霞,女,助理工程师,硕士,研究方向:林木遗传育种。E-mail:Chenxia01023@163.com
***通信作者:**刘娟,女,副教授,博士,研究方向:林木遗传育种。E-mail:liu_juan1122@163.com
引文格式:陈霞,万文娟,邓章文,等.山苍子优良单株选择与综合评价[J].南方林业科学,2025,53(1):14-21.
CHEN X, WAN W J, DENG Z W, et al. Selection and comprehensive evaluation of *Litsea cubeba*[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 14-21.

山苍子(*Litsea cubeba*),又名山鸡椒、木姜子、山胡椒,系樟科(Lauraceae)木姜子属(*Litsea*)的落叶灌木或小乔木,是广泛分布于我国南方丘陵山区的乡土树种[1]。山苍子鲜果,作为一种天然调味料,在我国民间食用历史悠久;干燥后的果实为荜澄茄,是一味中药,具有温中散寒、行气止痛功效[2]。山苍子油,主要是从山苍子成熟新鲜果实中经蒸馏提取的芳香油,其主要成分为柠檬醛,含量可达60%～90%。因柠檬醛具有抗氧化性和抗菌性等生物活性,山苍子油被广泛用于制药、合成香料、保健品等现代化工和医药领域[3]。

由于具有生长快、幼龄期短、产量高、经济价值大等特点,山苍子已成为我国南方低矮丘陵山区一种极具开发前景的天然香料和工业油料树种。然而,我国目前山苍子开发利用仍以野生资源为主。尽管在贵州、江西、湖南等省份部分地区已有山苍子人工栽培林,但多为实生起源。良种缺乏已严重制约了山苍子产业的快速发展。近年来,一些研究单位已开展山苍子良种选育工作,李红盛等[4]对6个种源13个家系6年生的山苍子生长性状进行遗传变异分析,并筛选出了经济性状和生长性状综合表现均优良的优良家系JO1。高暝等[5]对不同种源和不同家系山苍子苗期生长性状进行遗传变异分析,筛选了5个优良家系和2个优良种源。与油茶(*Camellia oleifera*)、文冠果(*Xanthoceras sorbifolium*)等以果实为育种目标的经济树种优良单株选择不同,山苍子的良种选育研究多集中在以种子繁殖为主的种源、家系等方面,这很难最大化固定良种的遗传增益。近期,有研究表明,通过调整植物生长调节剂IBA、NAA、ABT溶液的比例可使山苍子扦插成活率达到97%[6]。这为山苍子优良单株的扩繁和无性系推广应用提供了强有力的技术支撑。因此,非常有必要开展山苍子优树选择和品种选育工作,为加快我国山苍子产业化发展进程提供技术支撑。

主成分分析法是利用降维的方法,在损失很少信息的前提下把多个指标转化为几个综合指标的多元统计方法[7-8],转化成的综合指标称之为主成分。主成分分析法已在文冠果、油茶等经济树种中应用[9-10]。隶属函数分析法是将不同指标系数转化成[0,1]度量值,进行定量评价、综合比较的方法,可以对单株的综合能力作出全面评价[11],目前在浙江红花油茶(*Camellia chekiangoleosa*)、花椒(*Zanthoxylum bungeanum*)等经济树种的优良品种资源筛选方面已有研究报道[12-13]。本研究以来自湖南省张家界种源的山苍子人工林为研究对象,基于优势木对比法初步筛选了72株候选优树,以选择经济性状表现优异的优良单株为育种目标,利用主成分分析法和隶属函数法对山苍子选优性状进行综合评价,以期为山苍子的优良无性系的推广应用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于江西省贵溪市双圳林场(27°58′ N,117°24′ E,海拔159～234 m,年均气温18～25℃)和江西省萍乡市鉴山林场(27°40′ N,113°57′ E,海拔152 m,年均气温17～23℃);试验地均属于亚热带季风性湿润气候,降雨充沛;坡度较缓,土壤类型为红黄壤。采用随机取土的方法,对两个样地的土壤理化性质进行检测。检测结果为:贵溪双圳林场土壤pH值5.03、有机质23.57 g/kg、速效钾82.08 mg/kg、速效磷5.03 mg/kg、全氮1.76 g/kg、全磷1.40 g/kg、全钾4.50 g/kg;萍乡鉴山林场土壤pH值4.85、有机质16.17 g/kg、速效钾61.50 mg/kg、速效磷6.25 mg/kg、全氮1.82 g/kg、全磷1.05 g/kg、全钾3.06 g/kg。

1.2　研究材料

参试材料种源均来源于湖南省张家界播种培育的一年生山苍子实生苗,于2018年春季随机分配栽植在贵溪和萍乡,株行距为2.0 m×3.0 m,并进行除草、施肥、修剪、补植、病虫害防治等常规抚育。

1.3　研究方法

1.3.1　初选树的确定

参照其他木本香料树种选优方法[14-15],结合山苍子生长性状的特性,于2021年8月采用优势木对比法筛选候选优树。在样地实地踏查时,先选择1株树冠均匀张开、树干通直圆满、结果量大的雌株作为候选优树;然后以候选优树为中心在其10～25 m半径范围内选择3～5株生长性状仅次于候选优树的结果株作为优势木[16],进

行编号并挂牌标记和记录具体位置信息；其中萍乡试验地用PX表示、贵溪试验地用GX表示，编号001、002……010表示候选优树，001-1、001-2……010-5表示与候选优树相对应的优势木，另4株候选优树沿用已有编号1010、836、837、838。最终确定初选优树72株，其中萍乡42株，贵溪30株。

1.3.2 *初选树生长性状和经济性状的测定*

根据选优目标，结合山苍子的经济价值，考虑选优不仅要结合生长性状和经济性状，养分特征与植物经济性状也存在密切关系[17-18]。因此选择受树龄影响较小、相对稳定的14个性状作为选优性状。于2021年8月调查测定山苍子生长性状，并剪取标准枝及果实带回实验室测定其经济性状指标。其中，生长性状指标包括树高、胸径、冠幅、枝下高、分枝数；经济性状指标包括结果枝率、百粒果鲜重、单株标准枝产量、单株鲜果产量、精油含量、柠檬醛含量、单株精油产量、单株柠檬醛产量和平均冠幅产量。

采用标杆、皮尺和围尺测量树高、胸径、冠幅、枝下高，计算结果枝率；随机选取各方位的5个标准枝（为三级分支），用电子天平称量山苍子果质量，即为单株标准枝产量；用标准枝法[19]测定单株鲜果产量；采用水蒸气蒸馏法[20]对山苍子果实进行蒸馏，水油分离后，收集上层精油，称取精油质量，计算精油含量（收集到的精油质量占山苍子果实的质量的百分比）。将山苍子油经无水硫酸钠（Na_2SO_4）处理，去除精油中的水分，取150 uL精油，加入4.5 mL甲醇进行稀释，利用6890B-5977A气相色谱质谱联用仪测定精油中的化学成分，采用保留时间定性和峰面积归一法进行定量分析。

气相色谱条件：色谱柱为毛细管柱（30 m×250 μm×0.25 μm），色谱柱升温程序：柱初温80℃保持5 min，溶剂延迟3 min，2.5℃/min升温到120℃保持1 min，20℃/min升温到240℃保持8 min。载气为高纯度氦气，柱流速2.695 3 mL/min，进样口温度100℃，进样量1 μL，不分流，采用面积归一法进行定量。质谱条件：EI源，电子能量为70 eV，传导线温度为250℃，离子源温度为230℃，四级杆温度为150℃，全扫描采集模式，质量范围m/z 50～650 u，倍增器电压1 200 V。

1.3.3 *数据处理方法*

利用Excel进行数据汇总和变异系数分析，用SPSS 22.0软件进行相关性分析和主成分分析，利用主成分分析和隶属函数法进行综合评价分析，筛选优良单株，并用Origin 2021软件对优良单株进行聚类分析。其中，隶属函数值的计算公式：

$$Y_{ij}=\left(X_{ij}-X_{i\min}\right)\Big/\left(X_{i\max}-X_{i\min}\right) \quad (1)$$

式(1)中，Y_{ij}为i单株j指标的隶属函数值；X_{ij}为i单株j指标的测量数值，X_{imin}为所有单株中此指标的最小值，X_{imax}为所有单株中此指标的最大值。计算各单株各指标的隶属函数值，得出平均隶属函数值，平均隶属函数值越大，综合品质越好。

2 结果与分析

2.1 选优指标的变异分析

由表1可知，山苍子各选优性状的总变异系数为5.75%～151.78%，表明这些性状在群体内和群体间存在丰富变异，具有较大的选优潜力。生长性状指标的总均值分别为：树高4.46 m、胸径4.31 cm、冠幅2.18 m、枝下高1.20 cm和分枝数219.45个（萍乡试验地分枝数较高是由于植株死亡后萌发所致）。经济性状指标的总变异系数由大到小依次为：151.78%（单株精油产量）、148.63%（单株鲜果产量）、147.73%（单株柠檬醛产量）、111.62%（平均冠幅产量）、102.35%（单株标准枝产量）、25.15%（精油含量）、21.20%（百粒果鲜重）、19.96%（结果枝率）、5.75%（柠檬醛含量）。山苍子的精油产量在不同个体间变异幅度较大，而精油含量、百粒果鲜重、结果枝率和柠檬醛含量变异相对较小，稳定性较高。

不同试验地的山苍子选优性状的变异系数存在较大差异，萍乡试验地选优性状的变异系数为5.20%～127.41%，其中变异系数最大的性状为精油产量（127.41%），最小的为柠檬醛含量（5.20%）；而贵溪试验地选优性状的变异系数为4.72%～118.42%，变异系数最大的性状为单株鲜果产量（118.42%），最小的为柠檬醛含量（4.72%）。

表1 山苍子选优性状变异分析

Tab. 1 Analysis on variation of selected characters of *L. cubeba*

性状		萍乡			贵溪			总变异系数/%	总变幅	总均值±标准差
		变幅	均值±标准差	变异系数/%	变幅	均值±标准差	变异系数/%			
生长性状	树高/ m	2.30～8.00	4.76±1.37	28.86	2.00～8.50	4.04±1.50	37.13	32.74	2.00～8.50	4.46±1.46
	胸径/ m	1.80～11.60	4.06±2.04	50.30	2.40～8.50	4.65±1.93	41.51	46.40	1.80～11.60	4.31±2.00
	冠幅/ m	0.70～6.00	2.51±1.19	47.30	0.70～3.65	1.72±0.66	38.37	49.08	0.70～6.00	2.18±1.07
	枝下高/ m	0.00～2.00	1.01±0.47	47.04	0.00～3.00	1.47±0.72	48.98	52.50	0.00～2.50	1.20±0.63
	分枝数/ 个	70.00～1 200.00	341.62±215.34	63.03	13.00～112.00	42.52±29.19	68.65	101.31	13.00～1 200.00	219.45±222.32
经济性状	结果枝率/ %	36.36～100.00	86.99±14.79	17.00	40.00～100.00	77.63±17.56	22.62	19.96	36.36～100.00	83.07±16.58
	百粒果鲜重/ g	5.97～16.97	11.30±2.35	20.77	10.42～18.34	14.07±2.16	15.35	21.20	5.97～18.34	12.45±2.64
	单株标准枝产量/ g	1.03～43.93	8.06±9.04	112.13	0.67～33.38	9.98±9.15	91.64	102.35	0.67～43.93	8.86±9.07
	单株鲜果产量/ kg	0.16～11.08	2.19±2.58	117.76	0.03～1.92	0.38±0.45	118.42	148.63	0.03～11.08	1.46±2.17
	精油含量/ %	0.95～4.16	2.88±0.61	21.26	3.62～5.46	4.22±0.47	11.14	25.15	0.95～5.46	3.42±0.86
	柠檬醛含量/ %	64.41～81.45	75.08±3.92	5.20	69.63～86.33	79.56±3.76	4.72	5.75	64.41～86.33	76.92±4.42
	单株精油产量/ g	3.94～393.29	63.97±81.50	127.41	1.19～74.09	15.86±18.45	116.34	151.78	1.19～393.29	45.14±68.52
	单株柠檬醛产量/ g	3.14～289.04	49.75±62.15	124.92	0.90～62.31	13.27±15.47	116.58	147.73	0.90～289.04	35.38±52.27
	平均冠幅产量/ (kg·m^2)	0.03～2.13	0.40±0.38	95.01	0.01～0.82	0.15±0.16	107.07	111.62	0.01～2.13	0.30±0.33

山苍子精油共检测出98种化合物组分,两个试验地的山苍子精油化合物种类各有不同,去除匹配度低和含量较低的化合物,得到山苍子精油中21种主要化学成分,其中两地山苍子均含有的化合物共15种,而藏红花醛、2-乙基环己酮、3,7,7-三甲基-双环庚烷-2-酮、α-石竹烯仅在萍乡试验地被检测到,而香叶酸、4,8-二甲基壬-3,8-二烯-2-酮仅在贵溪试验地被检测到。对21种化合物进行变异分析(表2)可知,两地山苍子精油成分含量最高的为香叶醛,萍乡的均值为38.19%、贵溪为40.21%;其次是橙花醛,萍乡的均值为36.89%、贵溪为39.29%。此外,d-柠檬烯的含量也比较高,萍乡的均值为6.42%、贵溪为3.53%。

在山苍子精油化合物中,2,4-二甲基-1-庚烯-4-醇、β-石竹烯、2-乙基环己酮、香叶酸、(-)-氧化石竹烯在两地的变异均较大,变异系数为58.70%～210.14%。7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛、芳樟醇、橙花醛、香叶醛的变异系数较低,为5.26%～16.31%,说明这4种化合物含量较稳定,选优效果较小。

表2 山苍子精油主要成分变异分析

Tab. 2 Variation analysis of main components in *L. cubeba* essential oil　　单位:%

化合物	萍乡			贵溪		
	变幅	均值±标准差	变异系数	变幅	均值±标准差	变异系数
橙花醛	31.26～40.16	36.89±2.04	5.53	34.33～42.28	39.29±1.71	4.34
(-)-氧化石竹烯	0.04～0.43	0.12±0.07	58.70	0.06～0.55	0.15±0.13	86.18
藏红花醛	0.04～0.08	0.05±0.01	18.98	-	-	-
月桂烯	0.42～2.06	1.16±0.37	31.75	0.44～1.96	1.07±0.43	39.58
β-蒎烯	0.57～2.53	1.56±0.49	31.64	0.77～1.39	1.02±0.17	16.36
香叶醛	33.15～42.28	38.19±2.01	5.26	33.78～44.05	40.21±2.12	5.26
2,4-二甲基-1-庚烯-4-醇	0.09～1.01	0.22±0.16	72.59	0.11～4.14	0.39±0.81	210.14
2-乙基环己酮	0.02～0.11	0.03±0.02	65.59	-	-	-
3,7,7-三甲基-双环庚烷-2-酮	0.07～0.30	0.24±0.06	22.72	-	-	-
香叶酸	-	-	-	0.04～0.27	0.09±0.07	79.60
7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛	1.39～2.12	1.70±0.19	11.11	0.92～1.55	1.19±0.19	16.31
3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛	1.46～5.05	3.70±0.64	17.34	1.81～4.33	3.24±0.58	17.77

表2(续)

化合物	萍乡			贵溪		
	变幅	均值±标准差	变异系数	变幅	均值±标准差	变异系数
(1S,8aα)-十氢-1,4aβ-二甲基-7β-异丙烯基-1-萘酚	0.03～0.12	0.07±0.03	40.61	0.04～0.18	0.09±0.04	45.25
d-柠檬烯	0.36～13.92	6.42±3.08	47.95	0.82～5.5	3.53±1.22	34.44
α-石竹烯	0.03～0.09	0.05±0.02	37.53	-	-	-
2-甲-2-乙-1-丁烯	0.12～3.63	1.63±0.90	55.08	0.81～3.62	1.74±0.89	51.12
芳樟醇	1.13～2.73	1.78±0.25	13.92	1.07～1.83	1.66±0.15	8.94
β-石竹烯	0.04～0.69	0.18±0.12	65.40	0.06～0.28	0.13±0.06	49.26
4,8-二甲基壬-3,8-二烯-2-酮	-	-	-	1.14～11.45	4.40±2.60	59.08
2,4-二特丁基苯酚	0.02～0.03	0.02±0.01	19.64	0.01～0.03	0.02±0.01	26.36

注:"-"表示未检出。

Note: "-" indicated not detected.

2.2 选优指标的相关性分析

对山苍子的5个生长性状与山苍子精油中的15个主要化学成分含量进行相关性分析(表3),结果发现,山苍子树高与d-柠檬烯呈显著正相关($P<0.05$),与精油中(-)-氧化石竹烯呈显著负相关($P<0.05$)。胸径与月桂烯、香叶醛含量呈显著正相关($P<0.05$),与(-)-氧化石竹烯呈显著负相关($P<0.05$)。冠幅与d-柠檬烯呈显著正相关($P<0.05$),与(-)-氧化石竹烯呈极显著负相关($P<0.01$)。枝下高与橙花醛呈显著正相关($P<0.01$),与7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛呈显著负相关($P<0.05$)。分枝数与3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛呈显著正相关($P<0.05$),与β-蒎烯、7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛、d-柠檬烯呈极显著正相关($P<0.01$),与橙花醛、香叶醛呈极显著负相关($P<0.01$)。

表3 山苍子生长性状与精油成分含量相关性分析

Tab. 3 Correlation analysis between growth traits and essential oil content of *L. cubeba*

化合物	生长性状				
	树高	胸径	冠幅	枝下高	分枝数
橙花醛	-0.07	0.16	-0.17	0.31*	-0.42**
(-)-氧化石竹烯	-0.29*	-0.27*	-0.36**	-0.13	0.01
月桂烯	0.19	0.33*	0.24	0.28	0.06
β-蒎烯	-0.02	-0.29	0.09	-0.01	0.52**
香叶醛	-0.01	0.27*	-0.06	0.29*	-0.38**
2,4-二甲基-1-庚烯-4-醇	-0.09	-0.10	-0.19	-0.07	-0.09
7-甲基-3-亚甲基-6-辛烯醛	0.22	-0.30	0.23	-0.35*	0.50**
3,7-二甲基-3,6-辛二烯醛	0.02	-0.15	0.21	-0.17	0.28*
(1S,8aα)-十氢-1,4aβ-二甲基-7β-异丙烯基-1-萘酚	0.08	0.03	0.12	0.07	-0.23
d-柠檬烯	0.24*	-0.10	0.24*	-0.17	0.36**
3-甲-2-乙-1-丁烯	0.15	-0.09	-0.02	-0.17	0.15
芳樟醇	-0.22	-0.18	-0.08	-0.10	0.03
β-石竹烯	0.09	-0.13	-0.02	-0.11	0.17
2,4-二特丁基苯酚	0.23	-0.13	-0.12	-0.15	0.07

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated a highly significant correlation ($P<0.01$).

对山苍子的5个生长性状与9个经济性状进行相关性分析(表4)。结果表明,树高与单株鲜果产量、单株精油产量、单株柠檬醛产量呈极显著正相关($P<0.01$);胸径与单株标准枝产量、单株鲜果产量、单株精油产量、单株柠檬醛产量呈极显著正相关($P<0.01$),与平均冠幅产量呈显著负相关($P<0.05$);冠幅与百粒果鲜重呈极显著负相关($P<0.01$),与单株标准枝产量、单株鲜果产量、精油产量、柠檬醛产量呈极显著正相关($P<0.01$)。枝下高与单株标准枝产量呈极显著正相关($P<0.01$);分枝数与单株鲜果产量、单株精油产量、单株柠檬醛产量、平均

冠幅产量呈极显著正相关($P<0.01$),与精油含量、柠檬醛含量呈极显著负相关($P<0.01$)。

表4 山苍子生长性状与经济性状相关分析

Tab. 4 Correlation analysis between growth traits and economic traits of *L. cubeba*

经济性状	生长性状				
	树高	胸径	冠幅	枝下高	分枝数
结果枝率	−0.13	−0.02	0.18	0.02	0.23
百粒果鲜重	−0.22	−0.20	−0.31**	0.07	−0.22
单株标准枝产量	0.16	0.59**	0.35**	0.35**	−0.18
单株鲜果产量	0.40**	0.32**	0.59**	−0.12	0.57**
精油含量	−0.20	0.14	−0.12	0.26*	−0.59**
柠檬醛含量	−0.04	0.22	−0.12	0.30*	−0.41**
单株精油产量	0.35**	0.39**	0.64**	−0.06	0.45**
单株柠檬醛产量	0.36**	0.40**	0.65**	−0.07	0.43**
平均冠幅产量	0.04	−0.24*	−0.19	−0.17	0.42**

注:*表示显著相关($P<0.05$),**表示极显著相关($P<0.01$)。

Note: * indicated significant correlation ($P<0.05$), ** indicated a highly significant correlation ($P<0.01$).

2.3 选优指标的主成分分析

在主成分的提取上,提取特征值大于1,且累计贡献率大于80%的前n个主成分。根据9个经济性状的主成分分析可知,1～4主成分的累积贡献率大于80%,说明前4个主成分能表达山苍子综合特征信息的81.91%(表5)。因此,根据选优原则,选择前4个主成分作为优树选择的综合指标。

表5 主成分分析的特征值、贡献率、累计贡献率

Tab. 5 Characteristic value, contribution rate and cumulative contribution rate of principal component analysis

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	3.67	40.79	40.79
2	1.59	17.70	58.49
3	1.11	12.30	70.79
4	1.00	11.12	81.91
5	0.79	8.78	90.68
6	0.48	5.35	96.03

由表6可知,第一主成分与单株柠檬醛产量(0.97)、单株鲜果产量(0.97)、单株精油产量(0.96)呈显著正相关;第二主成分与精油含量(0.78)呈显著正相关;第三主成分与平均冠幅产量(0.69)呈显著正相关;第四主成分与柠檬醛含量(0.86)呈显著正相关。由于第一主成分的贡献率达40.79%,明显高于第二主成分。因此,在优树选择时,可认为柠檬醛产量、鲜果产量、精油含量这3个性状是首先考虑的特征主导因子,可将其作为优树选择的标准。

表6 各变量旋转因子负荷量

Tab. 6 Rotation factor load of each variable

经剂性状	主成分			
	1	2	3	4
单株柠檬醛产量	0.97	0.17	−0.06	−0.05
单株鲜果产量	0.97	0.03	0.04	−0.08
单株精油产量	0.96	0.17	−0.06	−0.08
单株标准枝产量	0.60	0.53	−0.02	−0.04
精油含量	−0.29	0.78	−0.29	0.01
百粒果鲜重	−0.29	0.59	0.56	−0.13
平均冠幅产量	0.43	−0.38	0.69	−0.06
柠檬醛含量	0.02	0.27	0.32	0.86
结果枝率	0.41	−0.29	−0.36	0.48

2.4 两种方法对比综合选择优良单株

将72个样本的9个经济性状原始数据X_i标准化后代入主成分方程，分别计算在这9个综合指标上的得分F_j(j = 1～4)。根据主成分分析结果，以4个主成分的贡献率作为权重，构建综合评价函数：

$$F = 0.407\,85\,F_1 + 0.177\,03\,F_2 + 0.122\,99\,F_3 + 0.111\,21\,F_4 \quad (2)$$

由式(2)计算得到72株选优树的综合得分值F，并对综合主成分值进行排序，选出排名靠前的优良单株。另将经济性状原始数据标准化后，计算各选优指标的隶属函数值，累加各指标的隶属函数值得出平均隶属函数值，进行排序和综合评价。

利用主成分分析法和隶属函数法分别得出综合评分、平均隶属函数值和排序情况。由表7可知，主成分分析法中排名前8的优株分别为：PX-1010、PX-0003-1、PX-0002-3、GX-837-1、PX-0002、PX-0005-3、GX-837、PX-0006-1。隶属函数法排名前8的优株分别为：PX-1010、PX-0002-3、PX-0003-1、GX-837-1、PX-0002、PX-0006-1、PX-0005-3、GX-837。综合两种对比方法的结果，选取在两种评价方法都排名前8的山苍子作为优良单株。最终选出优良单株共8株：其中萍乡地区有6株，为PX-1010、PX-0003-1、PX-0002-3、PX-0002、PX-0005-3、PX-0006-1；贵溪地区有2株，为GX-837-1、GX-837。

表7 两种方法综合选择优良单株

Tab. 7 Comprehensive selection of excellent individual plants by two methods

优良单株	主要经济性状				主成分分析法		隶属函数法	
	单株鲜果产量/ kg	精油含量/ %	单株柠檬醛产量/ g	单株精油产量/ g	综合得分	排名	平均隶属函数值	排名
PX-1010	9.45	4.16	289.04	393.29	2.57	1	0.77	1
PX-0003-1	11.08	2.81	247.74	310.97	1.95	2	0.64	3
PX-0002-3	10.35	2.59	113.95	268.46	1.60	3	0.66	2
GX-837-1	1.84	3.89	58.05	71.42	1.19	4	0.55	4
PX-0002	6.02	2.45	113.95	147.42	0.98	5	0.52	5
PX-0005-3	3.80	3.24	89.05	123.33	0.82	6	0.49	7
GX-837	1.92	3.85	62.31	74.09	0.76	7	0.46	8
PX-0006-1	3.88	3.34	98.38	129.91	0.66	8	0.51	6

2.5 聚类分析

山苍子优树聚类分析结果如图1所示。8株优良单株在欧氏距离为5时可以聚为3个类群：类群Ⅰ为PX-1010，该类群的优株属于高精油含量、高精油产量、高柠檬醛产量型优株，精油含量为4.16%，单株精油产量为393.29 g、柠檬醛产量为289.04 g，综合排名第一，综合品质最佳。类群Ⅱ包括2株优树，分别为PX-0003-1、PX-0002-3，聚入此类的优树鲜果产量较高，平均单株产果量为10.72 kg，属于高鲜果产量型优株。类群Ⅲ包括5株优树，分别为GX-837-1、GX-837、PX-0005-3、PX-0006-1、PX-0002，此类群优株属于高柠檬醛型株系，平均柠檬醛含量为78.12%。

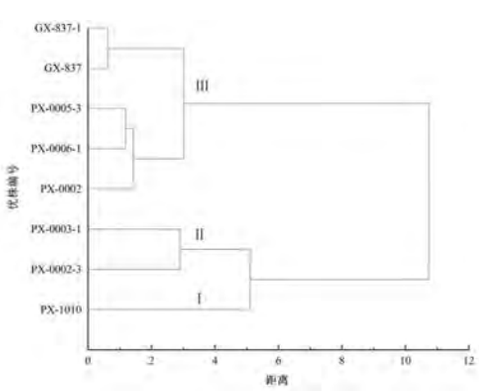


图1 山苍子优良单株的层次聚类

Fig. 1 Hierarchical clustering of superior *L. cubeba* individual plants

3 结论与讨论

山苍子作为极具开发潜力的木本香料树种，其优异种质资源的挖掘和优良无性系的培育对规模化种植和产业集约化发展至关重要。我国南方丘陵地区的山苍子多为实生起源，种源间及单株间存在显著变异，为良种选育提供了丰富材料。

根据变异分析得知，山苍子果实精油中柠檬醛含量在不同单株间差异最小，变异系数为5.75%，在单株间最为稳定，且平均柠檬醛含量为76.92%，明显高于天然柠檬醛主要来源之一的柠檬草提取物的柠檬醛含量

(73%)[21]。而鲜果产量和精油产量的变异最大,分别为151.78%和148.63%,具有较强的选择潜力。此外,由于山苍子树高果小产量高,野外采摘时常用标准枝法估测果实产量。而本研究中山苍子鲜果产量和精油产量变异幅度大,可能源于单株间遗传差异或估测偏差。例如,贵州山苍子良种选择研究中,长果枝和短果枝在不同良种类型中比例差异大,很难用统一的标准来定义标准枝[22]。因此,后期对山苍子优树选择或产量预测时,应尽可能采用实测数据或通过显著性检验验证估测值。GC-MS分析发现,同一种源的两个地区山苍子精油成分存在差异,这可能与性状在家系间的遗传力、环境条件及基因与环境互作效应有关[23]。

相关分析表明,冠幅与精油产量(r = 0.64,P<0.001)、柠檬醛产量(r = 0.65,P<0.001)呈极显著正相关,而精油含量主要受分枝数的影响(r = −0.59,P<0.001),这一结论与周永丽等[24]和李红盛等[4]对山苍子的相关研究结果相似,证实冠幅和分枝数等生长性状可以作为山苍子优树选择中精油含量的间接选择指标。鲜果产量与树高、胸径、冠幅和分枝数均呈极显著正相关,这与吴昌龙等[25]在山苍子优良单株选择研究中结论一致,说明树高、胸径、冠幅和分枝数可作为表型上的参考因子。

通过主成分分析与隶属函数分析,从72株候选优树中选出8株优良单株PX-1010、PX-0003-1、PX-0002-3、PX-0002、PX-0005-3、PX-0006-1、GX-837-1、GX-837。通过层次聚类分析法,将8株优株聚为3类:高柠檬醛型、高鲜果产量型、高精油含量且综合性状优良型,可分别培育不同类型种质资源并作为优良株系推广。为了最大化固定和保存优株的优良品质,后续可采用无性繁殖方法构建优良单株采穗圃,保存优良种质资源,并进一步快速扩繁,同步开展无性系测定及区域性试验,评价其优良性状稳定性和一致性。

参考文献:

[1] 冷家归,李靖锐.中国出口精油之冠——山苍子[J].生命世界,2021,48(9):30-31.
[2] 张爱华,唐春艳,胡楠,等.我国山苍子产业发展现状及对策[J].生物质化学工程,2020,54(6):25-32.
[3] 向育君,王海华,孙远东.山苍子油应用研究进展[J].中国粮油学报,2020,35(8):186-195.
[4] 李红盛,汪阳东,陈益存,等.山苍子生长经济性状遗传变异分析及优良家系选择[J].经济林研究,2017,35(4):64-71.
[5] 高暝,陈益存,吴立文,等.不同种源/家系山鸡椒苗期生长性状遗传变异[J].热带亚热带植物学报,2018,26(1):47-55.
[6] 翁小婷,邓力维,陈尚钘,等.植物生长调节剂对山苍子茎段扦插的影响[J].经济林研究,2021,39(1):111-120.
[7] 张志伟.基于主成分分析法的5种棕榈科苗木抗寒性评价[J].种子,2019,38(12):72-76.
[8] 陈国德,杜尚嘉,吴海霞,等.主成分分析法在枝花木奶果优树选择中的应用[J].福建林业科技,2019,46(2):39-42,54.
[9] 张毅,敖妍,刘觉非,等.文冠果种实性状变异规律及优良单株选择[J].东北林业大学学报,2019,47(9):1-5.
[10] 王碧芳,邹锋,袁德义,等.海南油茶优良单株果实经济性状综合评价与筛选[J].福建农林大学学报(自然科学版),2016,45(2):156-161.
[11] 周福平,史红梅,张海燕,等.应用模糊隶属函数法对高粱种质资源的农艺性状和品质性状进行综合评价[J].种子,2022,41(1):94-98.
[12] 董乐,李田,黄文印,等.浙江红花油茶优株筛选与综合评价[J].中南林业科技大学学报,2021,41(11):35-45.
[13] 李灵聪.德昌县花椒优异种质资源调查与评价[D].雅安:四川农业大学,2020.
[14] 詹世鹏.千年桐材用人工林优树选择[J].北华大学学报(自然科学版),2020,21(1):99-104.
[15] 薛睿,柴春山,王三英,等.文冠果优树选择[J].甘肃林业科技,2017,42(2):18-20,6.
[16] 詹林星.闽西南光皮桦人工林优树选择研究[J].安徽农学通报,2020,26(5):69-70.
[17] 曹永庆,任华东,王开良,等.油茶叶片氮磷钾含量与经济性状的关联分析[J].林业科学研究,2021,34(1):165-172.
[18] 赵姣.柠檬醛型樟枝叶氮磷钾含量生长季动态变化特征[J].中南林业科技大学学报,2022,42(1):20-26.
[19] 覃华勇,黄承标,莫土法,等.桂西北八角林分果实产量及其优良类型的初步选择[J].广西林业科学,2004,33(1):39-41.
[20] 张丽,陈尚钘,范国荣,等.山苍子精油的化学成分和功能活性及其应用研究进展[J].江西农业大学学报,2021,43(2):355-363.
[21] 邹丽婷,王文婷,杨辉祥,等.新鲜广西柠檬草精油成分的GC-MS分析[J].种子科技,2020,38(18):13-14,17.
[22] 岳季林,徐文彬,罗运春.贵州省山苍子品种(类型)及良种选择初步研究[J].经济林研究,1997,15(3):9-11.
[23] 田胜平,汪阳东,陈益存,等.不同居群山苍子果实精油和柠檬醛含量及其与地理-气候因子的相关性[J].植物资源与环境学报,2012,21(3):57-62.
[24] 周永丽,吴晓明,万军,等.毛叶木姜子优良单株选择初报[J].四川林业科技,2008,29(4):46-48,55.
[25] 吴昌龙,李安定.木姜子优良单株选择研究[J].民营科技,2015(1):220.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.004

不同基质及播种方式对白花树苗木生长的影响

黄毅杰,朱正斌,李嘉庆,谢德俊,代测枫,黄秋敏,莫明锋*
(百色市林业科学研究所,广西 百色 533000)

摘 要:【目的】为掌握纸材两用树种白花树的容器育苗技术,探索出高效的种苗繁育方法。【方法】采用隶属函数法综合评价种源地原质土(T1)、沙土(T2)、干热河谷黄土(T3)、蘑菇菌棒枯渣(T4)、种源地原质土+蘑菇菌棒枯渣1∶1(T5)、干热河谷黄土+蘑菇菌棒枯渣1∶1(T6)6种不同基质对苗木发芽生长的影响,并采用单因素方差分析法分析种尖向下(X1)、种尖横向(X2)、种尖向上(X3)3种不同播种方式对苗木发芽生长的影响。【结果】(1)不同基质组成处理的综合得分由大到小排序为T4(0.84)、T5(0.59)、T6(0.51)、T1(0.46)、T2(0.33)、T3(0.19),T4处理的综合表现最好。其中,T4处理的出芽率为83.3%;地上部分苗高、地径、叶片量分别为7.3 cm、1.95 mm、4.7片;根系部分根径、主根长、一级根数量、二级根数量均值分别为2.12 mm、9.9 cm、31.3条、6.5条。(2)不同播种方式中,各项测量指标均表现为X3处理大于X1、X2处理。其中,X3处理的出芽率、叶片量、根径、二级根数量分别为93.7%、5.0片、2.39 mm、6.4条,与X1、X2处理存在极显著差异($P<0.01$);X3处理的主根长、一级根数量为8.2 cm、34.3条,与X1、X2处理存在显著差异($P<0.05$);X3处理的苗高、地径分别为7.1 cm、1.62 mm,与X1、X2处理之间的差异不显著。【结论】蘑菇菌棒枯渣基质和种尖向上播种方式更有利于苗木正常生长,可采用种尖向上播种于蘑菇菌棒枯渣基质方法,高效繁育白花树。

关键词:白花树;育苗基质;播种方式;生长差异
中图分类号:S791.27∶S714 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0022-05

Effects of different substrates and seeding methods on seedling growth of *Styrax tonkinensis*

HUANG Yijie, ZHU Zhengbin, LI Jiaqing, XIE Dejun, DAI Cefeng, HUANG Qiumin, MO Mingfeng*
(Baise Forestry Research Institute, Baise Guangxi 533000, China)

Abstract:【Objective】In order to master the container seedling rearing technology of *Styrax tonkinensis*, which was a tree for both paper and wood purposes, and explore an efficient method of seedling breeding.【Method】The membership function method was used to comprehensively evaluate the effects of 6 different substrates of provenance soil (T1), sandy soil (T2), dry hot valley loess (T3), mushroom fungus residue (T4), provenance soil+mushroom fungus residue (T5), dry hot valley loess+mushroom fungus residue (T6) on the *S. tonkinensis* germination and growth of seedlings. Single factor analysis of variance was used to analyze the effects of 3 seed tip orientation of downward (X1), lateral (X2) and upward (X3) seeding on the *S. tonkinensis* germination and growth of seedlings.【Result】(1) The overall scores of different matrix composition treatments were ranked from largest to smallest: T4(0.84), T5(0.59), T6(0.51), T1(0.46), T2(0.33), T3(0.19). Among them, T4 treatment showed the best performance. The germination rate of T4 treatment was 83.3%, the seedling height, ground diameter and leaf amount of above-ground part were: 7.3 cm, 1.95 mm, 4.7 pieces. The partial root diameter, taproot length, primary root number and secondary root number of X4 treatment were 2.12 mm, 9.9 cm, 31.3 pieces and 6.5 pieces, respectively. (2) In different seeding methods, all indexes of X3 treatment were greater than X1 and X2 treament. The germination rate, leaf amount, root diameter and secondary roots number of X3 treatment were 93.7%, 5.0 pieces, 2.39 mm and 6.4 pieces, respectively, with extremely significant differences to X1 and X2 treatment($P<0.01$). The main root length and primary root number of X3 treatment were 8.2 cm and 34.3 pieces, with significant differences to X1 and X2 treatment($P<0.05$). The seedling height and ground diameter of

收稿日期:2024-07-28;2025-01-14修回
基金项目:白花树生物学特征与材性研究项目(BLKY20240301)
第一作者:黄毅杰,男,工程师,硕士,主要从事林业科研工作。E-mail: 782316722@qq.com
***通信作者:**莫明锋,男,工程师,硕士,主要从事森林培育相关研究。E-mail: 915197790@qq.com
引文格式:黄毅杰,朱正斌,李嘉庆,等.不同基质及播种方式对白花树育苗生长的影响[J].南方林业科学,2025,53(1):22-26,49.
HUANG Y J, ZHU Z B, LI J Q, et al. Effects of different substrates and seeding methods on seedling growth of *Styrax tonkinensis*[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 22-26, 49.

X3 treatment were 7.1 cm and 1.62 mm, respectively,with no significant differences to X1 and X2 treatment.【Conclusion】The method of seed tip upward sowing in mushroom fungus residue was more beneficial to the normal growth of seedlings, which can be used to effectively breed *S. tonkinensis*.

Key words: *Styrax tonkinensis*; seedling substrate; sowing method; growth difference

白花树（*Styrax tonkinensis*）为安息香科（Styracaceae）安息香属（*Styrax*）高大乔木，又名东京野茉莉、白花木、大青山安息香、牛油树、滇桂野茉莉等[1]，生长迅速，树干通直[2]，木材为散孔材，结构致密，材质松软，木材纤维长度为1 317～1 657 μm，可作火柴杆、家具、卷材、板材和纸浆材[3-4]；种子油含有多种脂肪酸、矿物质元素、胡萝卜素等物质，被称为“白花油”，营养成分较高，具有治疥疮等药用价值[5-6]，是制作生物柴油的原料[7-8]；树脂含有木脂素类、萜类、芳香类化合物，具有清热解毒、抗菌、保护神经系统等用途，被称为“安息香”，是贵重药材和高级香料[9-10]；花含有异黄酮、儿茶精类，还有叶绿素a、叶绿素b等化学成分[11,13]，带有香气，具有缓解精神紧张，心旷神怡的作用，是化妆品、空气清新剂的理想原料[14]。材用、纸用、药用等诸多用途，展现出了该树种的高经济价值，极具发展前景。

白花树主要分布于中越两国，国内分布于云南、贵州、广西、广东、浙江、福建、湖南、江西、重庆等省（直辖市），萌发能力和耐寒性较强，垂直分布在海拔100～2 000 m[15-16]。当前，国内外学者对白花树的研究多集中在医学药用和生物能源油上，对白花树的花[17-18]、种子[5-6]、根[19]、树脂[9]、木材[4,20]等部位的成分及功能有了相应研究，对其种苗繁育[21-22]和造林技术[23]也取得了一定的研究进展，但目前仅有浙江、福建、江西等省份开展相关研究，广西作为白花树的主要分布区，还未见有栽培选育的相关报道。随着天然林的不断开发，该树种的天然分布面积逐年缩小，在广西主要速生用材以桉树占据主导地位，导致纯林分布过大、树种结构单一、生物多样性面临挑战的背景下，发展新树种，优化树种结构布局，具有十分重要的意义。本研究旨在初步掌握白花树适宜的苗木培育基质和方法，有助于后期的栽培技术推广。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于广西百色市林业科学研究所（简称百色林科所）扩繁圃内，23°58′39″ N，106°37′30″ E，海拔190 m，属右江干热河谷地带，雨热同季，年均气温为22℃，年均日照时数1 600～1 900 h，年均降水量1 071 mm。

1.2　试验设计

2023年11月9日，开展育苗播种试验，采用砖砌苗床，移动遮阴棚。设置种源地原质土（T1）、沙土（T2）、干热河谷黄土（T3）、蘑菇菌棒枯渣（T4）、种源地原质土+蘑菇菌棒枯渣1∶1（T5）、干热河谷黄土+蘑菇菌棒枯渣1∶1（T6）共6种不同基质配比，随机播种；另外在蘑菇菌棒枯渣基质中，采用种尖向下（X1）、种尖横向（X2）、种尖向上（X3）3种不同播种方式对比白花树生长差异。采用50孔的苗盘，每个处理播种3盘，各150颗种子，具体见表1。

1.3　试验材料

试验所需的种子和原质土采集于广西田林县平塘乡渭各村渭海山屯（24°27′16″ N，105°38′56″ E）的白花树天然林中，海拔1 196.96 m，北面阴坡。干热河谷黄土为苗圃周边的黄土，沙土为购置的喀斯特地貌岩石沙；蘑菇菌棒枯渣为百色林科所蘑菇菌工厂的菌种、菌棒腐烂混合物，基质均经过堆积发酵。所有基质穴盘深为8.5 cm。

1.4　数据调查

2024年2月27日起，对6种基质组成处理和3种播种方式处理对比的生长数据进行测定。定期调查发芽

表1　不同基质组成及播种方式设置

Tab. 1　Different matrix composition and sowing ways

处理	基质组成	播种方式
T1	种源地原质土	随机播种
T2	沙土	随机播种
T3	干热河谷黄土	随机播种
T4	蘑菇菌棒枯渣	随机播种
T5	种源地原质土+蘑菇菌棒枯渣1∶1	随机播种
T6	干热河谷黄土+蘑菇菌棒枯渣1∶1	随机播种
X1	蘑菇菌棒枯渣	种尖向下
X2	蘑菇菌棒枯渣	种尖横向
X3	蘑菇菌棒枯渣	种尖向上

率，测定苗高、地径、主根根径、主根长数据，记录叶片、一级根、二级根的数量。

1.5 数据分析

采用Excel 2010进行数据整理和图表绘制，SPSS 26.0统计软件进行单因素方差分析、Duncan多重比较，通过隶属函数法进行综合评价。公式为[24]：

$$F(X_i) = (X_i - X_{i\min}) / (X_{i\max} - X_{i\min}) \quad (1)$$

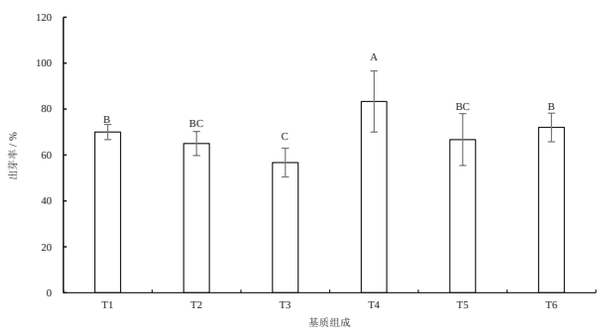
式(1)中，$F(X_i)$为试验处理的第i指标的隶属函数值，X_i为第i指标的测定值，$X_{i\max}$和$X_{i\min}$分别为所有试验处理中i指标对应的最大值和最小值。

2 结果与分析

2.1 不同基质组成对白花树种子出芽及生长的影响

2.1.1 不同基质组成对白花树种子出芽率的影响

图1显示，6种基质组成处理的白花树种子平均出芽率为68.95%，出芽率由高到低依次为T4、T6、T1、T5、T2、T3，说明白花树种子均能在基质中破壳出芽，可进行播种繁育。但不同基质之间白花树的出芽率存在极显著差异(P<0.01)，其中T4处理的出芽率最高，为83.3%；T3出芽率最低，为56.7%。说明T4处理的种子发芽表现最好，更能提高出芽率。



不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)。

Different capital letters indicated significant differences at 0.01 level.

图1 不同基质组成出芽率的差异

Fig. 1 The difference of germination rate of different matrix composition

2.1.2 不同基质组成对白花树苗木地上生长的影响

表2显示，不同基质组成的地上部分苗高、地径、叶片量均值分别为6.6 cm、1.70 mm、4.4片。不同基质处理间的苗高、叶片量均存在极显著差异(P<0.01)，地径存在显著差异(P<0.05)。就苗高而言，T4处理的均值最大，T3处理的苗高最小且极显著小于其他处理，其他处理间苗高差异均不显著；就地径而言，T5处理显著大于T1、T2、T3、T6处理，其次是T4处理，T2显著小于其他处理，T1、T3、T4、T6处理间差异不显著；就叶片量而言，T1、T4、T6处理极显著大于T3、T5处理，T3处理最少，极显著小于除T5处理之外的其他处理。

根系部分根径、主根长、一级根数量、二级根数量均值分别为：2.01 mm、8.7 cm、24.1条、8.2条，不同基质处理间的主根长、一级根数量存在显著差异(P<0.05)，其中T4处理的主根最长，为9.9 cm，T1处理的主根最短，为7.6 cm；T4处理的一级根数量最多，为31.3条，T3处理的一级根数量最少，为20.6条；不同基质处理二级根数量之间存在极显著差异(P<0.01)，T1处理的二级根数量最多，为10.8条，T6处理的二级根数量最少，为6.1条。

表2 不同基质组成对白花树苗木生长的影响

Tab. 2 Effects of different matrix composition on seedling growth of *Styrax tokinenstis*

基质	苗高/ cm	地径/ mm	叶片量/ 片	根径/ mm	主根长/ cm	一级根数量/ 条	二级根数量/ 条
T1	7.1±0.1A	1.60±0.05b	4.5±0.2A	1.98±0.04a	7.6±0.4c	21.8±1.2b	10.8±0.7A
T2	6.4±0.2A	1.46±0.04c	4.3±0.2AB	1.94±0.05a	9.1±0.5abc	23.6±1.1b	7.2±0.6BC
T3	5.2±0.3B	1.61±0.07b	3.8±0.2C	2.05±0.05a	7.9±0.4bc	20.6±1.8b	8.9±0.6AB
T4	7.3±0.4A	1.95±0.06ab	4.7±0.2A	2.12±0.11a	9.9±0.5abc	31.3±2.9a	6.5±0.8C
T5	6.5±0.3A	2.20±0.46a	4.0±0.2BC	2.07±0.07a	9.4±0.9ab	22.9±3.2b	9.9±1.1A
T6	7.2±0.3A	1.53±0.04b	4.7±0.1A	2.00±0.06a	9.5±0.3a	23.4±2.8b	6.1±0.3C
均值	6.6	1.7	4.4	2.01	8.7	24.1	8.2

注：不同大写字母表示差异极显著(P<0.01)，不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: different uppercase letters indicated significant differences at 0.01 level, and different lowercase letters indicated significant differencs at 0.05 level.

2.1.3 综合评价

通过隶属函数法对不同基质处理的苗木生长性状进行综合评价，结果如表3所示，得分从高到低依次为：T4（0.84）、T5（0.59）、T6（0.51）、T1（0.46）、T2（0.33）、T3（0.19），其中T4处理培育的苗木各生长指标隶属函数平均值最高，比T5高0.25，比T6高0.33，是比较适合白花树生长需求的育苗基质。

表3 不同基质组成对白花树苗木生长综合评价

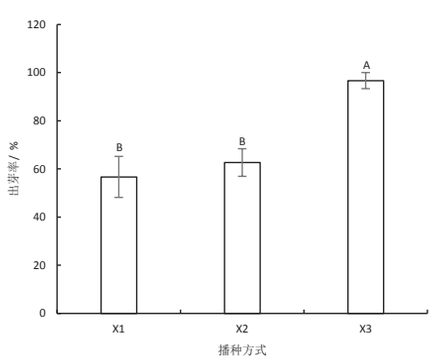
Tab. 3 Comprehensive evaluation of growth of *S. tokinenstis* seedlings by different matrix composition

指标	处理					
	T1	T2	T3	T4	T5	T6
出芽率/ %	0.50	0.31	0.00	1.00	0.38	0.58
苗高/ cm	0.90	0.57	0.00	1.00	0.62	0.95
地径/ mm	0.19	0.00	0.20	0.66	1.00	0.09
根径/ mm	0.22	0.00	0.61	1.00	0.72	0.33
叶片量/ 片	0.78	0.56	0.00	1.00	0.22	1.00
主根长/ cm	0.00	0.65	0.13	1.00	0.78	0.83
一级根数量/ 条	0.11	0.28	0.00	1.00	0.21	0.26
二级根数量/ 条	1.00	0.23	0.60	0.09	0.81	0.00
得分	0.46	0.33	0.19	0.84	0.59	0.51
排名	4	5	6	1	2	3

2.2 不同播种方式对白花树出芽及生长的影响

2.2.1 不同播种方式对白花树出芽率的影响

图2显示，不同播种方式白花树的出芽率之间存在极显著差异（$P<0.01$），各处理出芽率由高到低依次为：X3、X2、X1；X3处理的出芽率最高，为93.7%；X1处理的出芽率最低，为56.67%。说明X3处理即种尖向上最有利于白花树种子出芽。



不同大写字母表示差异极显著（$P<0.01$）。

Different uppercase letters indicated significant differences at 0.01 level.

图2 不同播种方式出芽率差异

Fig. 2 Difference of germination rate among different seeding methods

2.2.2 不同播种方式对白花树苗木地上部分生长的影响

由表4可知，白花树苗木的地上部分苗高、地径、叶片量均值分别为6.8 cm、1.59 mm、4.7片。不同播种方式的苗高和地径生长差异不显著，但均表现为X3处理的最大。不同播种方式的叶片量表现为X3处理极显著大于X1和X2处理（$P<0.01$），说明X3处理的幼苗生长总体上占有优势。

不同播种方式白花树苗木的地下部分根径、二级根数量存在极显著差异（$P<0.01$），其中X3处理的根径（2.39 mm）及二级根数量（6.4条）均极显著大于X1和X2处理。不同播种方式的主根长、一级根数量存在显著差异（$P<0.05$），均表现为X3处理显著大于X1和X2处理。说明X3处理的根系生长占有绝对优势。

表4 不同播种方式对白花树苗木生长差异

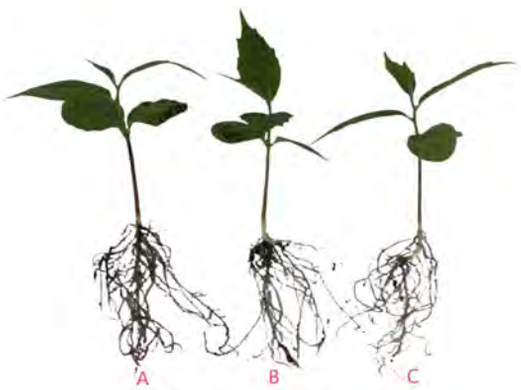
Tab. 4 Growth difference of white flower seedlings with different seeding methods

播种方式	苗高/ cm	地径/ mm	叶片量/ 片	根径/ mm	主根长/ cm	一级根数量/ 条	二级根数量/ 条
X1	6.9±0.2a	1.53±0.05a	4.6±0.2B	2.12±0.04B	7.8±0.2b	29.9±2.5b	4.0±0.3B
X2	6.5±0.2a	1.60±0.04a	4.4±0.2B	2.15±0.04B	7.7±0.3b	29.6±2.0b	4.1±0.3B
X3	7.1±0.2a	1.62±0.04a	5.0±0.1A	2.39±0.04A	8.2±0.2a	34.3±2.1a	6.4±0.4A
均值	6.8±0.1	1.59±0.03	4.7±0.1	2.22±0.04	7.9±0.1	31.3±1.3	4.8±0.2

注：不同大写字母表示差异极显著（$P<0.01$），不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Note: different uppercase letters indicated significant differences at 0.01 level, different lowercase letters indicated significant differences at 0.05 level.

由图3可知，3种不同播种方式下根系生长差异较明显，种尖向上时，根系最为茂密发达，主根和苗干均生长直立、较长；种尖横向时，根系发达程度下降，根系与地上部分之间出现了一点弯曲，主根通直度也下降；种尖向下时，根系分布量下降，且主根明显弯曲。说明种尖向下播种影响了苗木根系正常生长，种尖向上更有利于苗木生长。



A. 种尖向上；B. 种尖横向；C. 种尖向下。

A. seed tip upwards; B. seed tip transverse; C. seed tip downward.

图3 不同播种方式苗木的生长特征

Fig. 3 Growth characteristics of seedlings with different seeding methods

3 结论与讨论

综合白花树6项地上生长指标，不同基质组成处理的隶属函数综合得分由大到小排序为：蘑菇菌棒枯渣（T4，0.84）、种源地原质土+蘑菇菌棒枯渣1∶1（T5，0.59）、干热河谷黄土+蘑菇菌棒枯渣1∶1（T6，0.51）、种源地原质土（T1，0.46）、沙土（T2，0.33）、干热河谷黄土（T3，0.19），T4（蘑菇菌棒枯渣）的综合得分最高，是白花树育苗的高效基质。

不同播种方式中，种尖向上（X3）处理的地上部分苗高、地径、叶片量均值分别为7.1 cm、1.62 mm、5.0片，苗高与地径均值大于X1和X2处理，但未达到显著差异；叶片量表现为X3处理极显著大于X1和X2处理（$P<0.01$）。X3处理的地下部分根径、主根长、一级根数量、二级根数量均值分别为2.39 mm、8.2 cm、34.3条、6.4条，根茎与二级根数量均值极显著大于X1和X2处理（$P<0.01$），主根长与一级根数量均值显著大于X1和X2处理（$P<0.05$）。说明种尖向上播种更有利于苗木生长。

不同基质组成中，各生长指标单因素方差显示的最优值对应的基质组成不完全一致，因此选择隶属函数法进行综合评价；而3种不同播种方式的各项生长指标最优值均为相同的基质处理，以单因素方差分析即可评价。土壤养分影响植物的生长发育[25-26]，6种基质组成中的氮磷钾养分含量、保水率、通透性均有一定差异。本研究结果表明蘑菇菌棒枯渣基质处理下白花树的出芽率及苗木生长指标均为最好，其次是种源地原质土+蘑菇菌棒枯渣1∶1基质和干热河谷黄土+蘑菇菌棒枯渣1∶1基质，说明混合基质也可有效改变苗木的生长环境。因此，在不考虑基质成本时，可直接采用蘑菇菌棒枯渣基质育苗；在考虑基质成本时，建议采用当地的土壤进行配比调控开展育苗，在有效节约成本的同时也可相应提高生产效率。

种胚主要包含胚芽、子叶、胚轴和胚根等部位[27]，播种时种尖的朝向，会影响种胚在土壤横向、倒立或者直立生长。本研究不同种尖朝向播种方式试验结果得出，种尖向上（X3）处理的地上部分苗高、地径生长均值最大，但差异不显著，根系生长均达到差异显著水平，可能是由于蘑菇菌棒枯渣基质的养分较为充足，仅有根系因逆向生长产生显著差异，但同样能为植株汲取养分，因此地上部分生长差异不明显，下一步还可进行种胚形态结构及离体培养相关研究[28]，探析种胚生长规律。

参考文献：

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,1993.

[2] 李因刚,周小平,柳新红,等. 越南安息香人工林生长与优树选择的初步研究[J]. 浙江林业科技,2010,30(3):24-28.

[3] 胡淑萍,陈永伶. 越南的森林、人工造林和树木引种驯化[J]. 江西林业科技,2001(1):40-42.

[4] 骆昱春,杨桦,曾志光,等. 东京野茉莉木材性质分析与利用[J]. 江西农业大学学报,2007(1):77-80.

[5] 顾雁蕾. 越南安息香种子成分分析及超声波提油研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.

[6] FENG J, HE Q, XIE A, et al. Successful identification of the species of the semipetrified amber medicinal resin benzoin using molecular diagnostic technology. Sci Rep. 2023, 13(1): 2943.

[7] 刘光斌,黄长干,刘苑秋,等. 东京野茉莉油的提取及其制备生物柴油的初步研究[J]. 江西农业大学学报,2007,29(4):685-689.

[8] 陈俊娜,王晓宇,陈晨,等. BR对东京野茉莉种子中脂肪酸合成相关酶活性及油脂积累的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(6):35-41.

[9] WU Q, CAO Y, CHEN C, et al. Transcriptome analysis of metabolic pathways associated with oil accumulation in （下转第49页）

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.005

杉木幼苗土壤磷组分对氮磷添加的响应

杨博涵[1],哀建国[1]★,董 达[2],邹鹏程[1]
(1.浙江农林大学林业与生物技术学院,浙江 临安 311300;2.浙江农林大学环境与资源学院,浙江 临安 311300)

摘 要:【目的】探究亚热带地区杉木幼苗土壤磷组分对氮磷添加的响应。【方法】以2年生杉木幼苗为研究对象,基于不同水平氮、磷及复合添加试验,测定杉木幼苗土壤磷组分及磷转化酶活性。【结果】单独施氮显著提高了土壤中等活性磷的含量,随着施氮浓度升高,土壤中Conc.HCl-Pi的含量显著降低($P<0.05$);磷处理及氮磷复合处理下的土壤Resin-P(含量为25.73~27.08 mg/kg)、$NaHCO_3$-Pi(含量为79.91~83.95 mg/kg)及NaOH-Pi(含量为81.71~90.39 mg/kg)显著高于CK($P<0.05$),而Residual-P(含量为27.49~30.58 mg/kg)在各处理间无显著变化;磷处理和氮磷复合处理后的土壤植酸酶活性(含量为31.50~34.52 mg/(kg·h),显著高于CK和单独氮处理($P<0.05$),但磷酸酶活性(含量为6.14~6.66 mg/(kg·h)在各处理间均无显著变化。【结论】氮磷复合添加可显著提高土壤中不同活性磷的含量,且随着施氮浓度的升高,土壤中难利用的磷向更高活性磷转化。氮磷添加量在120 kg/(hm^2·a)及20 mg/kg处理后的土壤养分条件更有助于杉木幼苗生长。

关键词:氮磷添加;杉木幼苗;磷组分;土壤酶
中图分类号:S791.27 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0027-06

Response of soil phosphorus fractions in Chinese fir seedlings to nitrogen and phosphorus addition

YANG Bohan[1], AI Jianguo[1]★, DONG Da[2], ZOU Pengcheng[1]
(1.College of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Zhejiang Lin′an 311300, China; 2. College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A&F University, Zhejiang Lin′an 311300, China)

Abstract:【Objective】Exploring the response of soil phosphorus fractions in subtropical *Cunninghamia lanceolata* seedlings to nitrogen and phosphorus additions.【Method】A two-year-old *C. lanceolata* seedling was used as the research object. Based on different levels of nitrogen, phosphorus, and combined addition experiments, the soil physicochemical properties, soil phosphorus fractions, and phosphorus-transforming enzyme activities of *C. lanceolata* seedlings were determined.【Result】The application of nitrogen fertilizer alone significantly increased the content of moderately active phosphorus in the soil. With the increase of nitrogen application rate, the content of Conc.HCl-Pi significantly decreased ($P<0.05$). The soil Resin-P (contents were from 25.73 to 27.08 mg/kg), $NaHCO_3$-Pi (contents were from 79.91 to 83.95 mg/kg), and NaOH-Pi (contents were from 81.71 to 90.39 mg/kg) under phosphorus treatment and combined nitrogen and phosphorus treatment were significantly higher than those of CK ($P<0.05$). However, the Residual-P content (from 27.49 to 30.58 mg/kg) showed no significant changes among treatments. The soil phytase contents after phosphorus treatment and combined nitrogen and phosphorus treatment were 31.50 to 34.52 mg/(kg·h), which were significantly higher than those of CK ($P<0.05$). But phosphatase (contents were from 6.14 to 6.66 mg/(kg·h)) showed no significant changes among treatments.【Conclusion】Combined nitrogen and phosphorus addition could significantly increase the content of different labile phosphorus in the soil. And with the increase of nitrogen application concentration, the difficult to utilize phosphorus in the soil was transformed into higher activity phosphorus. The soil nutrient conditions after nitrogen and phosphorus additions of 120 kg/(hm^2·a) and 20 mg/kg, respectively, were more conducive to the growth of *C. lanceolata* seedlings.

收稿日期:2024-08-23;2024-09-09修回
基金项目:"十三五"国家重点研发计划项目(2016YFD0600201)
第一作者:杨博涵,男,硕士在读,研究方向:植物资源利用。E-mail: 1328313358@qq.com
***通信作者:**哀建国,男,副教授,博士,研究方向:植物资源利用。E-mail: 18750127886@163.com
引文格式:杨博涵,哀建国,董达,等.杉木幼苗土壤磷组分对氮磷添加的响应[J].南方林业科学,2025,53(1):27-32.
YANG B H, AI J G, DONG D, et al. Response of soil phosphorus fractions in Chinese fir seedlings to nitrogen and phosphorus addition[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):27-32.

Key words: nitrogen and phosphorus addition; *Cunninghamia lanceolata* seedlings; phosphorus fractions; soil enzyme

磷(P)是自然界中的基本元素,也是一种不可再生的矿物资源;磷元素直接参与生物组织的合成、酶的活化以及信号的传导,是植物生长的重要养分之一[1]。然而,土壤中的磷元素极易被土壤矿物所吸附和固定,使植物可直接吸收利用的有效磷含量下降,尤其是在亚热带地区,土壤风化严重,大量的磷被铁铝氧化物固定,从而导致该区域陆地生态系统普遍受到磷限制[2]。此外,大气氮沉降速率随着人类活动迅速升高,而亚热带地区是全球氮沉降影响最严重的区域之一[3-4]。大量的氮在陆地生态系统中累积,打破了生态系统的氮磷平衡,并增加了植物和微生物对磷的需求,从而进一步加剧了亚热带地区陆地生态系统的磷限制[5]。目前,外源施加磷肥可显著提高土壤中有效磷的含量,是缓解磷限制的有效措施之一。

土壤中磷元素的存在形式较为复杂,通常按形态可分为有机磷和无机磷[6],也可根据植物和微生物对其吸收利用的有效性不同,分为树脂磷、易利用磷、中等活性磷和难利用磷。不同磷组分在土壤中的状态和生物可利用程度存在较大差异[7]。其中,树脂磷和易利用磷作为容易被植物和微生物吸收利用的磷组分,虽然在土壤中含量较低,但这部分磷可以在复杂的自然过程中从其他磷组分中得到补充[8]。中等活性磷一般为次生矿物磷,在自然状态下,经数周至数月可转化成供植物和微生物利用的磷,因此是生物可利用磷的重要潜在来源[9]。相比之下,难利用磷通常很难被植物和微生物利用。有机磷可在一系列酶(磷酸酶,植酸酶等)的催化作用下转化为无机磷[10]。土壤微生物是调控土壤磷循环和转化的重要影响因素,尤其在有机磷转化的过程中起关键作用[11]。氮、磷添加对土壤磷组分的转化也会产生影响,不同添加浓度下,各磷组分的响应也有所不同。目前,关于氮、磷添加对土壤磷组分的研究多集中于单一的氮沉降或磷肥添加。例如,GRESS等[12]发现,氮沉降导致了土壤中的磷元素受限。也有研究表明氮沉降对土壤各磷组分均无显著影响[13]。可见,氮沉降对土壤磷组分的影响研究结论尚不一致。有关施磷肥对土壤磷组分的影响研究主要集中在农业方向,如曲均峰等[14]研究发现,土壤中易利用磷的含量会随着施磷量的增加而显著升高,但同时也导致了低活性磷的大量积累。目前,关于氮沉降背景下添加磷肥对亚热带地区森林土壤磷组分的影响相关研究鲜有报道。因此,深入研究氮磷添加对土壤各磷组分的影响,对于进一步认识亚热带地区土壤磷组分的周转及植物和微生物对磷的利用状况具有重要意义。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)在我国有着悠久的人工栽培历史,因其具有极高的经济价值及生态价值,被广泛栽种于我国南方地区,是我国重要的乡土树种[15]。第九次全国森林资源清查数据显示,我国杉木人工林面积和蓄积量均位列全国第一[16]。然而,由于南方土壤多为酸性红壤质地,风化程度较高,提供的有效磷不足,大部分杉木林的生长受到限制[17]。基于此,本研究选择亚热带杉木为研究对象,通过大棚盆栽氮磷添加控制试验,研究氮、磷添加对杉木土壤磷组分的影响,并进一步探索氮、磷添加通过影响土壤理化性质、土壤酸性磷酸酶活性及土壤植酸酶活性等路径对磷组分的影响过程及其特征。本项研究可为未来氮沉降背景下杉木林养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验区位于浙江省杭州市临安区浙江农林大学校东湖校区智能温室大棚(30°23′ N,119°52′ E)。该地区海拔约为50 m,属中亚热带季风气候区,年均气温约16℃,年均降水量为1 613.9 mm,全年无霜期超过237 d,地形地貌为低山丘陵,土壤类型为黄壤。试验材料为2年生杉木苗,来源于浙江天目山苗圃基地。试验土壤采自于杭州临安区高坎村杉木林的表层土壤,过2 mm筛网筛选后再备用。

1.2 试验设计

氮、磷添加物分别为NH_4NO_3和NaH_2PO_4,试验共设置5个处理。如表1所示,低氮处理T1(NH_4NO_3 60 kg/(hm^2·a),简称N_{60})和高氮处理T2(NH_4NO_3 120 kg/(hm^2·a),简称N_{120});磷处理T3(NaH_2PO_4 20 mg/kg,简称P_{20});低氮磷复合处理T4(N_{60} + P_{20})和高氮磷复合处理T5(N_{120} + P_{20}),每个处理重复4次,对照组(CK)为不添加氮磷的纯净水处理。

挑选苗高和地径生长相近的2年生杉木幼苗，移栽至容积为10 L的容器盆中，每盆装土8 kg，种植1株幼苗。炼苗处理10 d后，于2022年10月－2023年10月，根据各处理要求用纯净水配制相应的NH_4NO_3和NaH_2PO_4溶液。用容量为1 500 mL的手持式喷雾器定期向杉木幼苗全株及土壤均匀喷洒NH_4NO_3溶液，喷施量为每盆100 mL，每10 d喷施1次；喷施磷肥的频率为1年1次；对照组用等量纯净水喷施。

表1 试验设计

Tab. 1 Experimental design

处理	添加N（kg/(hm²·a)）	添加P（mg/ kg）
CK	0	0
T1	60	0
T2	120	0
T3	0	20
T4	60	20
T5	120	20

1.3 样品采集与测定

采用五点取样法采集每盆0～10 cm层土壤样品，混合均匀后，用干冰冷藏并迅速带回实验室。剔除根系及杂物后，土样过2 mm筛，并分成两部分，一部分土样经自然风干后保存，用于磷组分的测定，另一部分保存于4℃冰箱中并及时测定土壤酶活性。

1.3.1 土壤酶活性测定

土壤酸性磷酸酶（ACP）活性采用96微孔板荧光光谱法测定[18]，土壤植酸酶（PHY）活性采用偏钒酸铵钼黄法测定[19]。

1.3.2 土壤磷组分测定

分别采用改进的连续浸提法[20-21]测定土壤磷组分。具体方法为：称取0.5 g风干土壤过0.15 mm筛置于离心管中，依次加入2 cm×3 cm的阴离子树脂条、0.5 mol/ L $NaHCO_3$、0.1 mol/ L NaOH、1 mol/ L HCl。每次加入提取剂后，土壤样液经震荡、离心后，将上清液过0.45 μm滤膜过滤后进行检测分析，残留在土壤中的磷则利用浓盐酸、浓硫酸-高氯酸浸提。所有磷组分均通钼酸盐-抗坏血酸法过连续流动分析仪测定。共得到9种磷组分，根据FAN等[7]和魏经纬等[22]的研究，将9种磷组分按生物可吸收利用的难易程度分为4类，分别为：树脂磷（树脂态磷Resin-P）、易利用磷（碳酸氢钠态无机磷$NaHCO_3$-Pi、碳酸氢钠态有机磷$NaHCO_3$-Po）、中等活性磷（氢氧化钠态无机磷NaOH-Pi、氢氧化钠态有机磷NaOH-Po）、难利用磷（稀盐酸态无机磷HCl-P、浓盐酸浸提态无机磷Conc.HCl-Pi、浓盐酸浸提态有机磷Conc.HCl-Po、稳定态磷Residual-P）。

1.4 数据处理与分析

使用SPSS 26.0和Excel 2019软件进行数据处理，采用单因素方差分析法及邓肯（Duncan）多重比较法对各处理之间土壤磷组分含量、磷转化酶活性进行显著性分析。采用斯皮尔曼法（Spearman）分析土壤磷组分与环境因子之间的相关性，采用Origin 2021软件作图。

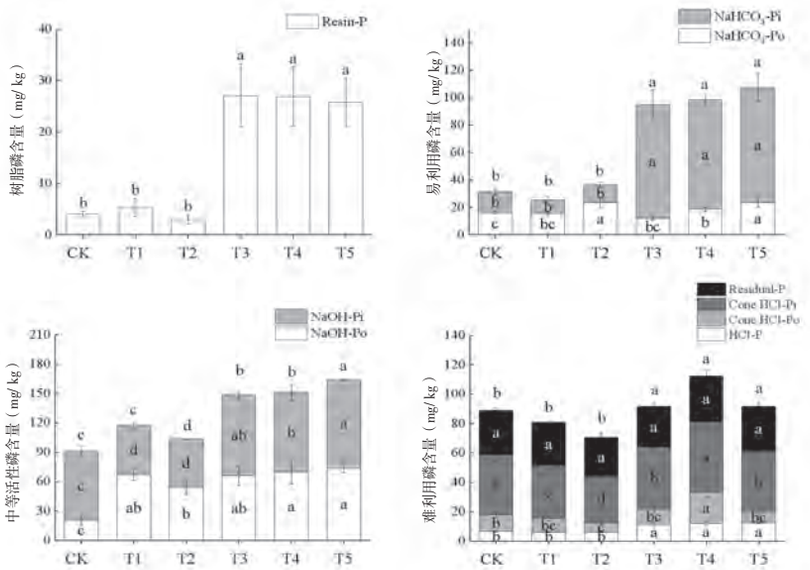
2 结果与分析

2.1 氮磷添加对土壤磷组分的影响

由图1可知，氮、磷及复合添加处理对部分土壤磷组分及活性磷有显著影响。其中，T3、T4和T5处理下的树脂磷（含量分别为27.08、26.85、25.73 mg/kg）、易利用磷（含量分别为94.92、98.39、107.42 mg/kg））、中等活性磷（含量分别为148.74、151.57、160.07 mg/kg）及难利用磷（含量分别为91.61、112.45、91.77 mg/kg）含量均显著高于CK（4类磷含量分别为4.04、31.42、90.77、88.93 mg/kg）、T1（4类磷含量分别为5.62、25.41、117.33、80.94 mg/kg）和T2（4类磷含量分别为3.02、36.42、103.51、70.67 mg/kg）处理（P<0.05）。

与CK相比，T1和T2处理显著提高了土壤中等活性磷的含量，其中，T2和T1处理下的NaOH-Po含量为54.03、67.31 mg/kg，分别比CK增加了166.03%和231.41%。

随着施氮的浓度升高，土壤Conc. HCl-Pi显著降低（P<0.05），与CK相比下降了12.10%～23.15%。Residual-P在各处理之间无显著变化。在T4和T5处理中，除了T5处理下的中等活性磷含量（164.68 mg/kg）最高，其余各活性磷组分均无显著差异。T5处理下的易利用磷（107.42 mg/kg)和中等活性磷含量（164.68 mg/kg)最高，而T4处理的难利用磷含量（112.45 mg/kg)最高。



柱状图中不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。

Different lowercase letters in the bar chart indicated significant differences between different treatments (P<0.05).

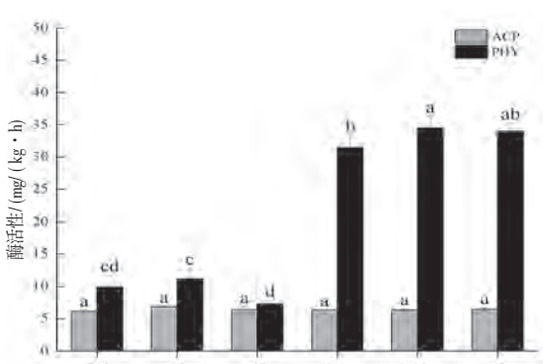
图1 不同水平氮磷添加下土壤土壤磷组分含量

Fig. 1 Soil phosphorus component content at different levels of nitrogen and phosphorus addition

2.2 氮磷添加对土壤磷转换酶活性的影响

由图2可知，各处理对土壤ACP活性含量为6.14～6.66 mg/（kg·h），均无显著影响。T3、T4和T5处理下的土壤PHY活性（含量分别为31.50、34.52、33.99 mg/（kg·h））显著高于CK、T1和T2处理（PHY活性含量分别为9.95、11.19、7.33 mg/（kg·h），P<0.05），而相较于T3处理，T4、T5处理下的土壤PHY活性分别增加了9.59%及7.90%。在T1和T2处理中，随着施氮浓度的升高，土壤PHY活性呈现出先升高后降低的趋势。

相关性分析图3表明，除了$NaHCO_3$-Po、Conc.HCl-Po以及Residual-P外，其余各形态和各活性的磷组分均与土壤PHY活性呈显著正相关，而土壤ACP活性则与各磷组分无显著相关性。

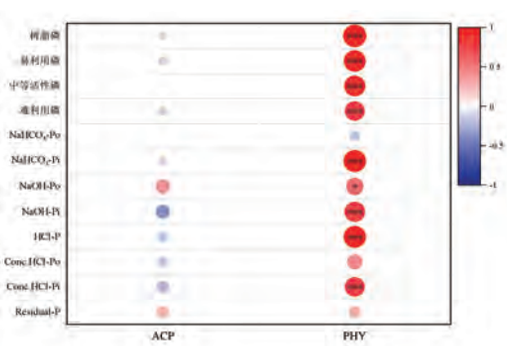


不同小写字母表示不同处理间差异显著（P<0.05）。

Different lowercase letters in the bar chart indicated significant differences between different treatments (P<0.05).

图2 不同水平氮磷添加对磷转化酶活性的影响

Fig. 2 The effect of different levels of nitrogen and phosphorus addition on the activity of phosphorus converting enzyme



*、**和***分别表示在P<0.05、P<0.01和P<0.001下显著相关。

*,** and *** indicated significant correlations at P<0.05, P<0.01, and P<0.001, respectively.

图3 环境因子和土壤磷组分之间的相关性

Fig. 3 The correlations between the environmental factors and soil phosphorus fractions

3 结论与讨论

氮、磷的添加对土壤磷组分的转化产生了显著影响，尤其促进了土壤难利用磷向高活性磷的转化。本试验结果表明，氮磷添加量在120 kg/（hm·a）及20 mg/kg土壤养分条件更有助于杉木幼苗的生长。

本研究发现，相较于CK，T1和T2处理下的土壤Conc.HCl-Pi含量随着施氮浓度增加而逐渐降低，但NaOH-Pi的含量显著提高(P<0.05)。Conc.HCl-Pi是土壤中主要的原生矿物磷，在自然条件下，其主要通过缓慢的风化作用转化为可供植物吸收利用的有效磷[23-24]。在本研究中，氮沉降还会刺激土壤中交换性Fe和Al离子的积累[25]，而NaOH-Pi则是与Fe/Al氧化物相关的磷组分[26]。土壤中增加的交换性Al和Fe离子可以通过一系列反应（如沉淀）迅速与释放到土壤中的无机磷结合，从而导致NaOH-Pi含量提高[27]。本研究还发现，在T1～T5处理下，土壤中的NaOH-Po含量显著增加。这与ZHANG等[28]研究发现氮添加显著提高了土壤中NaOH-Po的含量的研究结果相似。郑慧等[29]研究表明，微生物生物量是土壤磷转化的关键调控因素。

植物和微生物能产生磷转化胞外酶，这些酶对土壤磷组分的转化发挥着重要作用[30]。本研究发现，与CK、T1和T2处理相比，T3～T5处理显著提高了土壤中PHY的含量，PHY主要由土壤微生物分泌产生，能够将土壤中低活性有机磷转化为高活性有机磷[31]。在本研究中，施用磷肥导致土壤中各磷组分含量增加，同时土壤微生物活性增强，促使微生物分泌更多的PHY，将难利用的磷转化为较高活性的磷组分。最后，本研究发现，各处理对土壤ACP的影响并不显著。这与一些研究结果不同，一项关于氮添加对土壤酶活性影响的分析表明，氮添加可以增强土壤ACP的活性[5]。沈开勤等[32]的研究显示，ACP的活性随磷肥施用量的增加而降低。然而，也有一些研究结果与本研究结果相似[33]。土壤ACP主要由植物根系和土壤微生物共同产生，能促进有机磷矿化，加快有机磷向无机磷的转化[34-35]，本研究使用的材料为两年生杉木苗，其根系可能尚未完全发育，对氮磷添加的响应不敏感，因此分泌出的ACP变化不显著[36]。土壤中ACP的含量未显著变化，这也解释了中高活性有机磷持续增加的原因。

参考文献：

[1] LIN V S, ROSNOW J J, MCGRADY M Y, et al. Non-destructive spatial analysis of phosphatase activity and total protein distribution in the rhizosphere using a root blotting method[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 146: 107820.

[2] DU E Z, TERRER C, PELLEGRINI A F A, et al. Global patterns of terrestrial nitrogen and phosphorus limitation[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(3): 221-226.

[3] GALLOWAY J N , TOWNSEND A R , ERISMAN J W ,et al.Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions[J].Science, 2008, 320(5878):889-892.

[4] PENUELAS J, JANSSENS I A, CIAIS P, et al. Anthropogenic global shifts in biospheric N and P concentrations and ratios and their impacts on biodiversity, ecosystem productivity, food security, and human health[J]. Global Change Biology, 2020, 26(4): 1962-1985.

[5] DENG Q, HUI D F, DENNIS S, et al. Responses of terrestrial ecosystem phosphorus cycling to nitrogen addition: A meta-analysis[J]. Global Ecology and Biogeography, 2017, 26(6): 713-728.

[6] YANG X , POST W M .Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: A synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method[J].Biogeosciences, 2011, 8(10):2907-2916.

[7] FAN Y X, ZHONG X J, LIN F, et al.Responses of soil phosphorus fractions after nitrogen addition in a subtropical forest ecosystem: Insights from decreased Fe and Al oxides and increased plant roots[J].Geoderma, 2019, 337:246-255.

[8] HELFENSTEIN J, JEGMINAT J, MCLAREN T I, et al.Soil solution phosphorus turnover: derivation, interpretation, and insights from a global compilation of isotope exchange kinetic studies[J].Biogeosciences, 2018 ,15(1):105-114.

[9] HELFENSTEIN J, TAMBURINI F, VON SPERBER C, et al. Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 3226.

[10] LAMBERS H , RAVEN J A , SHAVER G R ,et al.Plant nutrient-acquisition strategies change with soil age[J].Trends in Ecology & Evolution, 2008, 23(2):95-103.

[11] RICHARDSON E, RICHARDSON A. Soil microorganisms and phosphorus availability[M]. Canberra: Divisiong of Plant Industry , Csiro ,GPO Box 1600 ACT 2601 Australia, 1994.

[12] GRESS S E, NICHOLS T D, NORTHCRAFT C C ,et al.Nutrient limitation in soils exhibiting differing nitrogen availabilities: what lies beyond nitrogen saturation?[J].Ecology, 2007, 88(1):119-130.

[13] 陈雨芩,陈冠陶,梁政,等.10年氮添加未显著影响苦竹林土壤磷组分[J].生态环境学报,2018,27(4):677-684.

[14] 曲均峰,李菊梅,徐明岗,等.长期不施肥条件下几种典型土壤全磷和Olsen-P的变化[J].植物营养与肥料学报,2008,14(1):90-98.

[15] 陈幸良,巨茜,林昆仑,等.中国人工林发展现状、问题与对策[J].世界林业研究,2014,27(6):54-59.

[16] 国家林业和草原局编制.中国森林资源报告(2014-2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.

[17] 周霆,盛炜彤.关于我国人工林可持续问题[J].世界林业研究,2008,21(3):49-53.
[18] DEFOREST J L. The influence of time, storage temperature, and substrate age on potential soil enzyme activity in acidic forest soils using MUB-linked substrates and L-DOPA[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1180-1186.
[19] 朱芸芸,李敏,曲博,等.湿地植物根际土壤磷酸酶活性变化规律研究[J].环境科学与技术,2016,39(10):106-112.
[20] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in Inorganic and Organic Soil Phosphorus Fractions Induced by Cultivation Practices and by Laboratory Incubations 1[J]. Journal of the Soil Science Society of America, 1982, 46(5):970- 976.
[21] TIESSEN H , STEWART J W B , COLE C V .Pathways of Phosphorus Transformations in Soils of Differing Pedogenesis1[J].Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(4):853-858.
[22] 魏经纬,肖向前,卓寿佳,等.林冠氮沉降对毛竹林土壤磷组分的影响(9)[J/OL].土壤学报,1-14[2024-08-10].http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20240301.1322.002.html.
[23] WALKER T W , SYERS J K .The fate of phosphorus during pedogenesis[J].Geoderma, 1976, 15(1):1-19.
[24] HELFENSTEIN J, TAMBURINI F, VON SPERBER C, et al. Combining spectroscopic and isotopic techniques gives a dynamic view of phosphorus cycling in soil[J]. Nature communications, 2018, 9(1): 3226.
[25] LUCAS R W, KLAMINDER J, FUTTER M N, et al. A meta-analysis of the effects of nitrogen additions on base cations: Implications for plants, soils, and streams[J].Forest Ecology and Management, 2011, 262(2):95-104.
[26] TIESSEN H. Characterization of available P by sequential extraction[J]. Soil sampling and methods of analysis, 1993.
[27] VITOUSEK P M , PORDER S , HOULTON B Z ,et al.Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen - phosphorus interactions[J].Ecological Applications, 2010, 20(1):5-15.
[28] ZHANG H Z, SHI L L, FU S L. Effects of nitrogen deposition and increased precipitation on soil phosphorus dynamics in a temperate forest[J]. Geoderma, 2020, 380: 114650.
[29] 郑慧,薛江博,郝杰,等.短期不同水平氮添加对华北盐渍化草地土壤磷组分的影响[J].草地学报,2022,30(3):712-720.
[30] JUMA N G, TABATABAI M A .Distribution of Phosphomonoesterases in Soils[J].Soil Science, 1978, 126(2):101-108.
[31] 丁锐,陈旭辉,李炳学.植酸酶研究进展及土壤植酸酶应用展望[J].生物技术通报,2019,35(7):190-195.
[32] 沈开勤,刘倩,杨国涛,等.减量施磷对土壤磷库组成及解磷微生物的影响[J].中国农业科学,2023,56(15):2941-2953.
[33] WEI K, SUN T, TIAN J H, et al. Soil microbial biomass, phosphatase and their relationships with phosphorus turnover under mixed inorganic and organic nitrogen addition in a Larix gmelinii plantation[J]. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 313-322.
[34] Krämer S, GREEN D M. Acid and alkaline phosphatase dynamics and their relationship to soil microclimate in a semiarid woodland[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2000, 32(2): 179-188.
[35] TURNER B L, HAYGARTH P M. Phosphatase activity in temperate pasture soils: Potential regulation of labile organic phosphorus turnover by phosphodiesterase activity[J]. Science of The Total Environment, 2005, 344(1-3): 27-36.
[36] CHENG H Y, ZHU X Z, SUN R X, et al. Effects of different mulching and fertilization on phosphorus transformation in upland farmland [J]. Journal of Environmental Management, 2020, 253: 109717.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.006

雪灾后间伐保留密度对杉木林的影响研究

石冠旗[1,2],杨模华[1*]

(1.中南林业科技大学林学院、水土保持学院,湖南 长沙 410000;2.永州市零陵区林业局,湖南 永州 425000)

摘 要:【目的】探明冰雪灾害后杉木中龄林的适宜间伐保留密度,为杉木林的经营质量提升提供参考。【方法】以湖南省大庙头林场31年生杉木成熟林为研究对象,分析不同间伐保留密度(850株/hm^2、575株/hm^2、425株/hm^2)对杉木生长、林下物种多样性和土壤理化性质的影响差异。【结果】(1)不同间伐保留密度杉木林分的单位面积蓄积量和单位面积年均材积生长量存在显著差异(P<0.05),仅高密度单位面积年均材积生长量(9.84 m^3/hm^2)达到杉木林速生丰产林水平。(2)不同间伐保留密度杉木林下植物物种数及物种多样性差异均不大,受冰雪灾害及杉木连栽影响,林下植物仅有20~23种。(3)不同间伐保留密度杉木林分的土壤理化性质差异基本不显著。土壤肥力整体较好,其中土壤有机质(62.6~84.6 g/kg)含量均处于极高水平,铵态氮(26.44~36.91 mg/kg)处于中等水平,有效磷(7.06~11.79 mg/kg)、速效钾(130.6~166.6 mg/kg)含量处于较高以上水平,但土壤pH值仅为3.88~4.08,酸化较严重;土壤物理性质良好,容重为1.064~1.165 g/cm^3,毛管孔隙度为0.569~0.599。【结论】冰雪灾害及连栽均不利于杉木林生长,依靠自然恢复难以形成高质量的森林群落,需人工干预改良,建议在清杂间伐抚育时,适当提高保留密度,同时适地适树补植阔叶树,提升经营价值。

关键词:杉木林;间伐保留密度;植物多样性;土壤理化性质;森林质量提升

中图分类号:S791.27:S750 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0033-06

Study on the effect of thinning retention density on *Cunninghamia lanceolata* forest after snow disaster

SHI Guanqi[1,2], YANG Mohua[1*]

(1.College of Forestry, Central South University of Forestry & Technology, Changsha Hu′nan 410000, China; 2.Forestry Bureau of Lingling District, Yongzhou Hu′nan 425000, China)

Abstract:【Objective】To investigate the suitable thinning retention density of middle-aged *Cunninghamia lanceolata* forest after snow and ice disaster, and to provide reference for improving the management quality of *C. lanceolata* forest.【Method】The 31-year-old mature *C. lanceolata* forest in Damiaotou Forest Farm in Hu′nan Province was selected as the research object, and the effects of different thinning retention densities (850 trees/hm^2, 575 trees/hm^2, 425 trees/hm^2) on the growth of *C. lanceolata*, understory species diversity and soil physicochemical properties were analyzed.【Result】(1) There were significant differences in the stock volume per unit area and annual growth volume per unit area of *C. lanceolata* stand with different thinning retention densities (P<0.05), and only the annual growth volume per unit area of high density (9.84 m^3/hm^2) reached the level of rapid growth and high yield. (2) There was little differences in the number of species and species diversity of *C. lanceolata* understory under different thinning retention densities. There were only 20~23 species of *C. lanceolata* understory under the influence of snow and ice disaster and continuous planting. (3) The difference of soil physical and chemical properties of *C. lanceolata* stands with different thinning retention densities was basically not significant. Soil fertility was good on the whole, and the contents of soil organic matter (62.6~84.6 g/kg) were at a very high level, and ammonium nitrogen (26.44~36.91 mg/kg) was at a medium level. The contents of available phosphorus (7.06~11.79 mg/kg) and available potassium (130.6~166.6 mg/kg) were above the high level, but the soil pH value was only 3.88~4.08, and acidification was serious. The soil physical properties were good, the bulk density was 1.064~1.165 g/cm^3, and the capillary porosity was 0.569~0.599.【Conclusion】Snow and ice disaster and serialization were not beneficial to the growth of *C. lanceolata* forest, and it was difficult to form high-quality forest

收稿日期:2024-09-29;2024-11-18修回

第一作者:石冠旗,男,副研究员,硕士在读,主要从事森林培育和林木遗传育种工作。E-mail: shiguanqi2011@163.com

***通信作者:**杨模华,女,教授,博士,主要从事林学学科 森林培育方向与林木遗传育种方向研究。E-mail: ymh163@163.com

引文格式:石冠旗,杨模华.雪灾后间伐保留密度对杉木林的影响研究[J].南方林业科学,2025,53(1):33-38.

SHI G Q, YANG M H. Study on the effect of thinning retention density on *Cunninghamia lanceolata* forest after snow disaster[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):33-38.

community by natural restoration, which needs manual intervention and improvement. It was suggested that the retention density should be appropriately increased during clearing and thinning. At the same time, supplement broad-leaved trees to adapt the land and trees, so as to enhance the management value.

Key words: *Cunninghamia lanceolata* forest; stand density; plant diversity; soil physical and chemical properties; forest quality enhancement

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国重要的乡土针叶用材树种,生长遍及中国整个亚热带气候区,涵盖19个省区。相当长一段时间,为实现经济效益,以追求杉木的木材产量作为经营的主要目标,但森林树种过于单一,导致土壤衰退严重、生物多样性低、病虫害增加、生产力下降[1-3]。当前我国杉木纯林依然是普遍现状,森林质量及产量的精准提升仍是一个重要的经营课题,目前已有相当多的研究发现适宜的间伐保留密度对于纯林的改良有一定的正向效果。如许冠军等[4]对34年生不同密度杉木林研究结果表现为,林分密度对胸径和树高均产生显著影响。张勇强等[5]研究得出,杉木林与林下植物存在既相互竞争又相互依存的关系,密度过低或过高均对土壤理化性质有一定不利影响。宋晓琛等[6]研究得出,立地条件及林分密度均会对大径材杉木培育有影响,林分的建议控制密度需随林龄进行调整。但是,目前针对冰雪灾害后的杉木林分的密度研究还鲜有报道。

2008年,我国南方遭遇了历史上罕见的冰雪灾害,雨雪在树木枝叶上形成的冰条和冰片超负荷积压导致大面积的林木断干残枝,对森林生态系统造成了严重的破坏。杉木作为湖南地区重要的造林和用材树种之一,在那次冰雪灾害中也深受影响。面对受损的林木以及狼藉的林下环境,湖南永州大庙头国有林场对16年生的杉木中龄林进行了清杂及间伐抚育,根据杉木受灾情况形成了3种间伐保留密度。本研究基于这3种间伐保留密度,对杉木成熟林(31年)的生长指标、林下植被、土壤理化性质等进行调查分析,探索遭受冰雪灾害后,杉木中龄林的适宜间伐保留密度,并为受灾林分的恢复经营措施提出建议。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

试验地设置在湖南省永州市零陵区大庙头林场(26°00′21″～26°04′50″ N,111°31′32″～111°35′34″ E),林场建于1958年,主要栽植经营杉木林,现有杉木林仍占林场乔木林的94%以上,且以纯林为主。林场海拔162～814 m,属亚热带季风性湿润气候,年均气温17.8℃,极端最低温(-6)～0℃,极端最高温36.0～40.0℃;年均降水量1 495.8 mm,年均无霜期349～365 d。

1.2 样地设置

1992年以前,林场的杉木林一直采用轮伐、补植的经营模式,并产生了不错的经济效益,杉木林分生长良好,但是在经过多代连栽轮伐后,林分普遍经营质量低下,单位面积蓄积量仅81 m^3/hm^2,低于全国平均水平(95 m^3/hm^2),不到世界平均水平的60%。1992年3月,在该林场营造初植密度为约2 500株/hm^2的杉木纯林,林地上的林分自郁闭后,均采取封山育林粗放式管理,2008年受到冰雪灾害,抚育间伐后形成当前3种保留密度(850株/hm^2、575株/hm^2、425株/hm^2)。

在3种间伐保留密度的杉木成熟林内分别设置3块20 m×20 m的试验样地:密度850株/ hm^2(T1)、密度575株/ hm^2(T2)、密度425株/ hm^2(T3),各样地坡度、坡向基本一致,管理方式一致,海拔400～500 m。

1.3 杉木和林下植物调查

2023年8月,对各样地内杉木进行每木检尺,并估算杉木树高、林分郁闭度、林下植物盖度。在每块样地四周和中心位置分别设置5个1 m×1 m的样方,记录样方内的植物种类、盖度、优势灌木、优势草本,对每种植物分别拍照记录。

根据《湖南省森林资源调查常用数表》[7],查阅湖南省杉木二元立木形高表,测得杉木形高(*FH*),计算平均单株蓄积(*sv*)、单位面积蓄积量(*SV*)、单位面积年均材积生长量(*vh*)。

参考HJ 710.1－2014《生物多样性观测技术导则 陆生维管植物》[8]计算灌草植物的重要值(*IV*)、物种丰富度指数(*R*)、辛普森多样性指数(*D*)、香农-维纳多样性指数(*H′*)、均匀度指数(J_{sw})。

1.4 土壤样品采集与测定

用环切刀在每块样地内分随机选择5个点,在土壤表层0～10 cm、10～20 cm范围分别取土样,同一深度的土样混合均匀,将土壤用透明塑料袋装好,贴好标签封口带回实验室,标签记录土样所在地块杉木密度、树龄、编号。在前次取土点附近,用环刀再次取土,在保持土壤自然状态不变形的情况下带回实验室。

土壤在室内自然烘干后,用紫外分光光度计法[9]测定铵态氮含量、有效磷含量、速效钾含量;用电位法[10]测定pH值;用环刀法[11]测定土壤毛管孔隙度、容重、非毛管孔隙度等物理性质指标;采用灼烧减量法测定土壤有机质含量[12]。

1.5 数据处理

对不同密度杉木林胸径、材积、蓄积、郁闭度、胸径、林下植物种类、盖度、多样性指数及土壤理化性质比较分析,运用SPSS 17.0单因素方差分析(AVOVA)和Duncan多重比较判断差异性显著水平。

2 结果与分析

2.1 杉木生长情况

如表1示,3种间伐保留密度的杉木平均胸径在同一径级20 cm,均无显著差异。不同间伐保留密度的杉木平均单株蓄积差异均不显著。单位面积蓄积量和单位面积年均材积生长量均随间伐保留密度增大呈上升趋势,高密度单位面积蓄积量分别是中密度、低密度的1.57倍、2.20倍。高密度单位面积年均材积生长量分别是中密度、低密度的1.57倍、2.20倍。

表1 杉木林生长指标

Tab. 1 Growth indicators of the *Cunninghamia lanceolata* forest

样地	间伐保留密度/(株/hm²)	平均胸径/cm	平均树高/m	平均单株蓄积*sv*/m³	单位面积蓄积量*SV*/(m³/hm²)	单位面积年均材积生长量vh/(m³/(hm²·年))
T1	425	20.9±4.1a	18.679±0.308a	0.311 8±0.018 9a	138.48±7.18c	4.47±0.23c
T2	575	21.1±4.5a	18.443±0.372a	0.324 3±0.023 6a	193.79±12.81b	6.25±0.41b
T3	850	21.7±6.7a	18.070±0.426a	0.336 3±0.011 2a	304.92±9.52a	9.84±0.31a

注:不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

Note: different lowercase letters meant significant differences at 0.05 level.

2.2 林下植物及重要值

如表2所示,林下植物种类全样地仅调查到20～23种,林下植物种类数量随林分密度的增大而增大。灌木的生长较旺盛,生物量、盖度明显大于草本植物,但物种数较少。

表2 林下植物物种数及郁闭度

Tab. 2 Understory plants′ species richness and canopy cover

样地	植物盖度/%	灌木/种	草本/种	林分郁闭度/%
T1	60	6	14	45
T2	60	5	16	50
T3	60	5	18	55

根据样方调查的林下植物分析物种重要值(调查的物种数少于全样地调查物种数,但优势种均有包含),结果如表3所示,不同密度林下植物调查中排名前3位的优势物种,低密度为杜茎山、山莓、蕨,中密度为杜茎山、蕨、沿阶草,高密度为杜茎山、蕨、沿阶草;物种组成相似。其中杜茎山在3种间伐保留密度的林下植物中均占绝对优势。

如表4示,低密度林下灌木D值、草本D值显著低于其他2种密度,低密度林下灌木H'值显著低于其他2种密度。不同密度间其余林下灌木、草本植物的多样性指数无显著差异。说明低密度林下植物多样性指数最低。高密度与中密度林下灌草植物各项多样性指数S值、D值、H'值、J_{sw}值均无显著差异,其中

灌草植物S值、D值、J_{sw}值基本一致，高密度林下灌草植物H'值略高于中密度。说明高密度林下植物多样性略高于中密度。林下植物多样性由高到低依次排序为高密度、中密度、低密度，但相互间整体差异较小。

表3 林下植物重要值

Tab. 3 The important values of understory plants

样地	物种	重要值
T1	杜茎山 *Maesa japonica*	0.437 7
	山莓 *Rubus corchorifolius*	0.248 3
	蕨 *Pteridium aquilinum*	0.094 2
	求米草 *Oplismenus undulatifolius*	0.073 8
	檫木 *Sassafras tzumu*	0.048 4
	芒 *Miscanthus sinensis*	0.029 6
	大齿牛果藤 *Nekemias grossedentata*	0.026 8
	沿阶草 *Ophiopogon bodinieri*	0.023 8
	野茼蒿 *Crassocephalum crepidioides*	0.017 5
T2	杜茎山	0.629 5
	蕨	0.072 8
	沿阶草	0.065 6
	大齿牛果藤	0.054 5
	求米草	0.047 3
	海金沙 *Lygodium japonicum*	0.043 9
	地桮 *Melastoma dodecandrum*	0.039 9
	野茼蒿 *Crassocephalum crepidioides*	0.028 1
	山莓	0.018 3
T3	杜茎山	0.503 4
	蕨	0.139 2
	沿阶草	0.090 7
	野茼蒿	0.089 3
	求米草	0.089 3
	山莓	0.055 5
	油茶 *Camellia oleifera*	0.032 6

表4 林下植物多样性指数

Tab. 4 Understory plant diversity index

样地	灌草丰富度指数-S	辛普森多样性指数-D		香农-维纳多样性指数-H'		均匀度指数-J_{sw}	
		草本	灌木	草本	灌木	草本	灌木
T1	4.0±0.34a	0.95±0.003a	0.92±0.04a	0.70±0.22a	0.31±0.12ab	0.52±0.07a	0.22±0.03a
T2	3.6±0.27a	0.95±0.004a	0.93±0.02a	0.66±0.19a	0.26±0.04b	0.53±0.04a	0.22±0.05a
T3	4.0±0.17a	0.84±0.180b	0.89±0.04b	0.78±0.22a	0.42±0.23a	0.56±0.10a	0.33±0.23a

注：不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$）。

Note: different lowercase letters meant significant differences at 0.05 level.

2.3 土壤理化性质

如表5示，0～10 cm土壤理化性质，除有效磷外，其余指标随密度变化差异均不显著；有效磷含量表现为中密度显著高于高密度，低密度与其他2种密度无显著差异，变化趋势为中密度>低密度>高密度。10～20 cm土壤理化性质，除毛管孔隙度外，其余土壤理化性质指标随密度变化均无显著差异；毛管孔隙度表现为中密度显著高于其他2种密度，高密度与低密度无显著差异。0～20 cm土壤理化性质随土壤深度变化，低密度0～10 cm土壤速效钾含量显著高于10～20 cm土壤，中密度0～10 cm土壤自然含水率显著低于10～20 cm土壤，高密度0～10 cm土壤pH值显著低于10～20 cm土壤，其余土壤理化性质指标随深度变化差异均不显著。

表5 林分土壤理化性质

Tab. 5 The physicochemical properties of forest soil

处理	土壤深度/ cm	容重/ (g/cm³)	自然含水率/ %	毛管孔隙度/ %	非毛管孔隙度/ %	总孔隙度/ %
T1	0 ~ 10	1.105±0.044Aa	23.5±2.35Aa	57.0±1.20Aa	4.7 9±0.8 5Aa	61.87±0.69Aa
	10 ~ 20	1.064±0.054Aa	24.1±1.21Aa	57.2±0.84Ba	4.3 1±0.4 3Aa	61.50±1.08Aa
T2	0 ~ 10	1.165±0.011Aa	23.4±2.17Ab	57.9±0.57Aa	4.5 3±0.4 9Aa	62.43±0.58Aa
	10 ~ 20	1.080±0.014Aa	26.7±0.47Aa	59.9±0.28Aa	4.2 1±0.3 2Aa	64.10±0.54Aa
T3	0 ~ 10	1.097±0.032Aa	26.5±2.20Aa	57.2±3.40Aa	4.0 6±0.8 1Aa	61.26±3.93Aa
	10 ~ 20	1.091±0.018Aa	25.3±0.51Aa	57.8±0.01Ba	5.1 3±0.6 2Aa	62.90±0.61Aa
处理	土壤深度/ cm	pH	铵态氮/ (mg/kg)	有效磷/ (mg/kg)	速效钾/ (mg/kg)	有机质/ %
T1	0 ~ 10	3.96±0.09Aa	30.82±1.26Aa	10.36±1.58ABa	160.97±33.60Aa	8.46±0.32Aa
	10 ~ 20	4.08±0.08Aa	35.96±1.27Aa	7.06±0.52Aa	130.60±4.62Ab	7.32±0.43Aa
T2	0 ~ 10	3.96±0.03Aa	26.44±2.66Aa	11.79±0.68Aa	166.60±11.59Aa	8.45±0.37Aa
	10 ~ 20	3.96±0.05Aa	36.91±0.99Aa	9.07±1.31Aa	145.43±10.60Aa	6.86±0.58Aa
T3	0 ~ 10	3.88±0.04Ab	36.15±3.72Aa	7.72±0.41Ba	151.13±5.68Aa	7.70±0.20Aa
	10 ~ 20	4.03±0.01Aa	36.19±2.78Aa	8.96±1.84Aa	146.13±8.93Aa	6.26±0.36Aa

注:同列不同小写字母表示相同密度、不同土壤深度间差异显著(P<0.05),同列不同大写字母表示相同土壤深度、不同密度间差异显著(P<0.05)。

Note: different lowercase letters in the same column indicated the same density and different soil depths have significant differences (P< 0.05), and different uppercase letters in the same column indicated the same soil depth and different density have significant differences (P <0.05).

3 结论与讨论

3.1 对杉木林生长的影响

杉木林3种间伐保留密度成熟林的胸径、树高和单株蓄积量均无显著差异,但单位面积蓄积量和单位面积年均材积生长量均存在显著差异,表现为随着间伐保留密度升高而增大。根据《杉木速生丰产林》地方标准[13],本研究样地为I类区域,3种间伐保留密度的树高和胸径均达到速生丰产林水平,但单位面积年均材积生长量,仅高密度(9.84 m³/hm²)达到了I类区域低限生长指标(9.43 m³/hm²)。分析原因,可能是中、低间伐保留密度均过低,导致林地面积利用率不高,虽然3种间伐保留密度下杉木林单株生长良好,但是最终整体林分蓄积量偏低[14]。

3.2 对林下植物多样性的影响

本研究杉木林下植物种类全样地仅调查到20～23种,生物多样性水平较低。张勇强等[5]对江西省分宜县38年生杉木林调查发现,林下灌草植物多达121种。刘佳哲等[15]调查广西壮族自治区融水县3～17年生杉木林下植物为60种。大庙头林场处于植被丰富的南岭山脉地区,本研究调查的样地植物多样性水平明显低于周边地区植物多样性水平。

通常情况下较低林分密度,竞争小,林下植物会获得更多生长机会,但本研究杉木林下植物多样性水平均不高,甚至有反向变化趋势,分析原因,可能有三点,一是由于受2008年冰雪灾害影响,林下植被及土壤微生物环境均受到了破坏,影响林下植物更新生长;二是间伐量过大,林分郁闭度过低会破坏林下植被稳定性,而较高的林分密度对林下植物具有一定的保护作用,有利于维持原有森林植物群落结构[16];三是由于此前林场杉木纯林采取多代轮伐连栽的经营方式,导致林下土壤微生物环境不利于林下植被生长。因此,当杉木林受到冰雪灾害后,中龄林间伐时适当保留较高密度有利于维持植物群落稳定及恢复,同时面对杉木轮伐连栽带来的不利经营后果,需要采取一定的经营措施来改变土壤条件。

3.3 对土壤理化性质的影响

林分密度主要通过调节林间微环境及林分植物组成,进而影响土壤理化性质,是影响土壤理化性质主要因子[17]。本研究除中密度0～10 cm土壤有效磷、10～20 cm土壤毛管孔隙度外,其余土壤理化性质随密度变化无显著差异;可能是杉木处于成熟期且密度低,林下植被盖度和物种组成差异小,导致土壤理化性质整体差异

小[18]。

于文睿南等[19]对中国南部6省22个林场的杉木林地土壤特征研究发现，有机质含量按土壤类型排名，山地红壤排名前2；按地区排名，湖南排名第一；本研究各样地0～20 cm土壤有机质（62.6～84.6 g/kg）均处于极高水平（>50 g/kg），符合湖南省山地红壤土肥力特征。铵态氮（26.44～36.91 mg/kg）处于中等水平，有效磷（7.06～11.79 mg/kg）处于富级水平，速效钾（130.6～160.79 mg/kg）处于较高水平，土壤容重为1.06～1.17 g/cm^3、毛管孔隙度为57.0%～59.9%，土壤理化性质良好。有机质是土壤铵态氮、有效磷、速效钾的重要来源，在极高土壤有机质条件下，铵态氮（26.44～36.91 mg/kg）整体水平低，说明土壤有机质没有充分释放铵态氮，土壤有机质的质量不高[20]。另外，土壤pH值为3.88～4.08，属于强酸性[9]，主要原因是受淋溶作用和杉木枯落物影响，杉木枯落物分解产生酸性物质，降低了土壤pH值，而大多数微生物，包括固氮菌，适宜在pH值6～8的土壤中活动。土壤酸化、有机质质量下降等均导致适宜林下生长的植物逐渐减少，多样性指数降低。

综上，中龄林杉木林在遭受冰雪灾害后，采取封山育林粗放管理的方式，依靠自然恢复难以形成高质量的森林群落，需人工干预改良，建议采取间伐抚育措施，可适当提高保留密度，同时采取近自然经营的方式，适地适树补植阔叶树，提升经营价值[21-24]。目前，已有较多学者针对杉木纯林开展了低质低效林改造提升研究，也取得了一定的进展，但是杉木纯林低效林改造是一个长期过程，需解决的技术难点如补植阔叶树种选择、阔叶树与杉木的密度动态调控，以及不同生长区域和立地条件下的经营方案等等均需要开展深入研究。

参考文献：

[1] LINDGREN P M F, SULLIVAN T P. Influence of stand thinning and repeated fertilization on plant community abundance and diversity in young lodgepole pine stands: 15-year results[J]. Forest Ecology and Management, 2013(308): 17-30.
[2] 耿丹,夏朝宗,张国斌,等.杉木人工林灌木层生物量模型构建[J].北京林业大学学报,2018,40(3):34-41.
[3] 夏丽丹,于姣妲,邓玲玲,等.杉木人工林地力衰退研究进展[J].世界林业研究,2018,31(2):37-42.
[4] 许冠军,郑宏,林开敏,等.间伐密度管理模式对杉木大径材生长的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2019,48(6):753-759.
[5] 张勇强,李智超,厚凌宇,等.林分密度对杉木人工林下物种多样性和土壤养分的影响[J].土壤学报,2020,57(1):239-250.
[6] 宋晓琛,娄永峰,黄金金,等.江西杉木大径材培育立地选择与密度控制技术研究[J].江西农业大学学报,2024,46(6):1498-1508.
[7] 湖南省林业调查规划设计院 湖南省林业厅资源林政处.湖南省森林资源调查常用数表[M].长沙:[出版者不详],2013.
[8] 环境保护部.生物多样性观测技术导则 陆生维管植物:HJ 710.1—2014[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
[9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].第3版.北京:中国农业出版社,2000.
[10] 生态环境部.土壤 pH值的测定 电位法:HJ 962—2018[S].北京:中国环境科学出版社,2019.
[11] 中华人民共和国农业部.土壤检测 第22部分：土壤田间持水量的测定 环刀法:NY/T 1121.22—2010[S].北京:中国农业出版社,2010.
[12] 中华人民共和国环境保护部.固体废物 有机质的测定 灼烧减量法:HJ 761—2015[S].北京:中国环境科学出版社,2015.
[13] 张勰,徐清乾,许忠坤,等.杉木速生丰产林:DB43/T 2542—2023[S].长沙:湖南省市场监督管理局,2023.
[14] 王翰琛,张雄清,张建国,等.杉木人工林不同密度间伐林分生长优势的变化规律分析[J].林业科学研究,2021,34(5):32-38.
[15] 刘佳哲,谭长强,申文辉,等.不同林龄杉木人工林林下灌木和草本物种组成及多样性分析[J].林业与环境科学,2021,37(3):104-110.
[16] 郭光智,段爱国,张建国,等.南亚热带杉木人工林材种结构长期立地与密度效应[J].林业科学研究,2020,33(1):35-43.
[17] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J].林业科学,2018,54(10):20-30.
[18] 于洋,邹莉,孙婷婷,等.天然红松林植被多样性与土壤功能多样性的关系[J].草业科学,2014,31(7):1241-1247.
[19] 于文睿南,潘畅,郭佳欢,等.杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响[J].中国生态农业学报,2021,29(11):1931-1939.
[20] 杨承栋.我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J].林业科学,2016,52(12):1-12.
[21] 刘志龙,蔡道雄,贾宏炎,等.我国南方人工林近自然化改造模式和效益分析:基于中国林科院热林中心实践研究[J].林业科技通讯,2016,(10):3-7.
[23] 王秋丽,MATTHIAS Albert.近自然森林经营在德国的应用成效分析[J].林业科学研究,2019,32(3):127-134.
[24] 黄凯璇,汤新艺,秦欢,等.近自然经营对杉木人工林地被物和土壤碳氮积累的影响[J].生态环境学报,2020,29(8):1556-1565.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.007

^{60}Co-γ射线辐照对不同薄壳山核桃品种的嫁接效应分析

邓立宝[1],万 雯[2],何新华[2],田荣雄[3],时德举[2],苏方贵[3],苏天明[1]*
(1.广西壮族自治区农业科学院,广西 南宁 530007;2.广西大学,广西 南宁 530004;3.凤山县核桃科研开发中心,广西 河池 547600)

摘 要:【目的】探明^{60}Co-γ射线辐照对不同薄壳山核桃品种的嫁接效应。【方法】采用不同辐照剂量的^{60}Co-γ射线对'金华''巴顿'和'肖尼'3个薄壳山核桃品种的一年生休眠枝条进行辐射处理后嫁接到原品种砧木,研究不同辐照剂量处理对薄壳山核桃嫁接成活率、新梢长度、新梢粗度、叶长、叶宽、叶面积等指标的影响,并通过最优回归方程求出不同薄壳山核桃品种的半致死辐照剂量。【结果】随着^{60}Co-γ射线辐照剂量的增加,不同薄壳山核桃品种的嫁接成活率、新梢长度、新梢粗度、叶长、叶宽和叶面积等指标均呈现下降的趋势;不同薄壳山核桃品种对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性不同,供试的3个薄壳山核桃品种对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性由高到低依次为:'肖尼''巴顿''金华',对应的半致死辐照剂量分别为16.77、21.69、23.31 Gy。【结论】薄壳山核桃对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性较高,低剂量辐照可以使薄壳山核桃枝条产生生物损伤的同时维持较高的嫁接成活率。

关键词:薄壳山核桃;^{60}Co-γ;辐照;嫁接;诱变育种
中图分类号:S723.2∶S664.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0039-04

Effect of ^{60}Co-γ irradiation on grafting of different *Carya illinoensis* cultivars

DENG Libao[1], WAN Wen[2], HE Xinhua[2], TIAN Rongxiong[3], SHI Deju[2], SU Fanggui[3], SU Tianming[1]*
(1. Guangxi Academy of Agriculture Science, Nanning Guangxi 530007, China; 2. Guangxi University, Nanning Guangxi 530004, China; 3. Walnut Research Center of Fengshan County, Hechi Guangxi 547600, China)

Abstract:【Objective】Exploring the effect of ^{60}Co-γ irradiation on the grafting of different *Carya illinoensis* cultivars.【Method】The annual dormant branches of *C. illinoensis* cultivars 'Jinhua', 'Barton' and 'Shawnee' were irradiated by different doses of ^{60}Co-γ ray and grafted onto the stock of the original cultivars, and then the differences of grafting survival rate, shoot length, shoot thickness, leaf length, leaf width and leaf area of the *C. illinoensis* were studied.【Result】The grafting survival rate, shoot length, shoot thickness, leaf length, leaf width and leaf area of different *C. illinoensis* cultivars decreased gradually with the increase of ^{60}Co-γ irradiation dose, the sensitivity of different *C. illinoensis* cultivars to ^{60}Co-γ irradiation was different. The sensitivity of the three *C. illinoensis* cultivars from high to low was 'Shawnee' 'Patton' and 'Jinhua', and their semi-lethal doses of ^{60}Co-γ irradiation were 16.77, 21.69, 23.31 Gy.【Conclusion】*C. illinoensis* was sensitive to ^{60}Co-γ radiation and low dose irradiation of ^{60}Co-γ could cause biological damage to the shoots of *C. illinoensis* while maintaining a high survival grafting rate.
Key words: *Carya illinoensis*; ^{60}Co-γ; irradiation; grafting; mutation breeding

薄壳山核桃(*Carya illinoensis*)又名美国山核桃、长山核桃、碧根果,为胡桃科(Juglandaceae)山核桃属(*Carya*)植物,是世界重要的油料干果树种之一[1]。薄壳山核桃原产于美国南部及墨西哥北部,集中分布于30°～38° N,86°～100° W,其坚果个大、壳薄、出仁率高、储藏性好,果仁富含不饱和脂肪酸、蛋白质、矿物质、多酚和黄酮等天然抗氧化物质,具有很好的营养和保健价值[2-4]。我国自19世纪90年代开始引种栽培薄壳山核桃,

收稿日期:2024-08-26;2024-09-20修回
基金项目:广西创新驱动发展专项(桂科AA17204058);广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科2021YT048);科技先锋队专项行动(桂农科盟202304)
第一作者:邓立宝,男,副研究员,博士,研究方向为果树种质资源与种质创新。E-mail: denglibao2000@126.com
***通信作者:**苏天明,男,研究员,博士,研究方向为土壤与肥料和植物营养。E-mail: 2451210146qq@.com
引文格式:邓立宝,万雯,何新华,等.^{60}Co-γ射线辐照对不同薄壳山核桃品种的嫁接效应分析[J].南方林业科学,2025,53(1):39-42,74.
DENG L B, WAN W, HE X H et al. Effect of ^{60}Co-γ irradiation on grafting of different *Carya illinoensis* cultivars[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):39-42,74.

目前在浙江、安徽、云南、江西等地已进行规模化种植[5-6]。由于育种进程缓慢、优良品种资源匮乏和配套栽培技术不完善等，国内薄壳山核桃产业化水平不高，每年薄壳山核桃产品的进口量仍很大[7-9]。

辐射诱变育种利用物理辐射能源处理植物材料，诱发植物基因突变和染色体畸变，从而获得有价值的新突变体，培育优良品种[10-11]。^{60}Co-γ是辐射诱变育种中最常用的辐射源之一，被广泛应用于苹果[12]（*Malus pumila*）、杜梨[13]（*Pyrus betulifolia*）、长果猕猴桃[14]（*Actinidia longicarpa*）、甜橙[15]（*Citrus sinensis*）等园艺植物育种研究，创制出很多具有优良性状的新种质。漆巨容等[15]采用^{60}Co-γ射线辐照地方实生甜橙桐子柑，选育出优良的鲜食和制汁加工早熟甜橙新品种—渝早橙。YUE等[16]利用^{60}Co-γ射线辐射梨品种‘红安久’自然实生种子，选育出红梨新品种—香红梨，该品种具有花芽多，早熟，抗寒性和抗病性强等优点。周维等[17]对引进香蕉品系GCTCV-217-1不定芽进行^{60}Co-γ辐射诱变，再经病原菌高压筛选，选育出抗枯萎病香蕉新品种—桂蕉8号。因不同植物的遗传背景及育种目标不同，不同植物经^{60}Co-γ射线辐射所获得的变异类型也不同[18]。目前关于^{60}Co-γ射线辐照诱导薄壳山核桃变异的研究未见报道。本研究拟采用不同辐照剂量的^{60}Co-γ射线辐照不同薄壳山核桃品种的接穗并进行高位嫁接，探讨^{60}Co-γ射线辐照对薄壳山核桃嫁接成活率的影响及枝梢生长的效应，为薄壳山核桃诱变育种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

薄壳山核桃嫁接试验在南宁市武鸣区广西农业科学院内科研试验基地进行，以‘金华’‘肖尼’和‘巴顿’3个薄壳山核桃品种为试材，选取一年生且芽眼饱满的枝条作为接穗。砧木为与对应接穗相同品种的薄壳山核桃植株，树龄均为3年，不同砧木嫁接口粗度较为一致。

1.2 试验方法

于2022年2月25日，剪取薄壳山核桃接穗，每根接穗留8～12个芽，每10根接穗绑为一捆，用湿毛巾保湿后立即送到广西南翔环保有限公司进行辐照处理。设置5个不同剂量的^{60}Co-γ辐照处理：T1（30 Gy，1 Gy = 100 RAD）、T2（60 Gy）、T3（90 Gy）、T4（120 Gy）、T5（150 Gy），以不辐照（T0）作为对照。2022年2月27日利用枝接法将不同处理的薄壳山核桃接穗高位嫁接到相同品种的植株上，每个处理嫁接60个接穗。接穗萌芽60 d后，统计接穗成活率和新梢生长情况，用卷尺测量新梢长度（精确到0.01 cm），用游标卡尺测量新梢粗度（精确到0.01 mm）；每个枝条选取中部复叶的第3至第6片小叶，用直尺测量叶片长度和叶片宽度（精确到0.01 cm），用方格法测定小叶面积[19]。采用Excel及DPSV3.0软件分析数据，并根据辐照剂量和薄壳山核桃嫁接成活率数据进行多项式回归分析，求出最优回归方程$y = ax^3+bx^2+cx+d$（x为辐射剂量，y为嫁接成活率）和相关系数R^2，计算当$y = 50\%$时的半致死剂量（x）。

2 结果与分析

2.1 不同辐照处理对薄壳山核桃嫁接成活率的影响

不同^{60}Co-γ辐照处理对薄壳山核桃嫁接成活率影响较大（表1）。在0～150 Gy范围，‘金华’的嫁接成活率随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少；不同^{60}Co-γ辐照处理的‘金华’嫁接成活率都显著低于对照。在0～120 Gy范围，‘巴顿’的嫁接成活率也随着^{60}Co-γ辐照剂量的升高而减少；T4和T5处理的‘巴顿’嫁接成活率差异不显著，它们都显著低于处理。在0～90 Gy范围，‘肖尼’的嫁接成活率随着^{60}Co-γ辐照剂量的升高而减少；T2和T3处理的‘肖尼’嫁接成活率差异不显著，它们都显著低于T1处理和对照；T4

表1 不同辐照处理下薄壳山核桃的嫁接成活率

Tab. 1 Grafting survival rate of *C. illinoensis* under different irradiation treatments

处理	嫁接成活率/%		
	‘金华’	‘巴顿’	‘肖尼’
T0	83.30±7.64a	86.67±7.64a	80.00±10.00a
T1	41.67±7.64b	36.67±2.89b	30.00±5.00b
T2	23.33±5.77c	20.00±5.00c	15.00±5.00c
T3	15.00±5.00cd	11.67±2.89c	13.33±2.89c
T4	10.00±5.00de	5.00±5.00d	0.00
T5	6.67±2.89e	5.00±5.00d	0.00

注：表中同列不同小写字母表示显著差异（$P<0.05$）。

Note: different lowercase letters in the same column indicated significant differences（$P<0.05$）.

和T5处理的嫁接成活率均为0。不同薄壳山核桃品种对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性不同，供试的3个薄壳山核桃品种对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性由高到低依次为：‘肖尼’‘巴顿’‘金华’。

将不同^{60}Co-γ辐照处理下3个薄壳山核桃品种的嫁接成活率数据进行多项式回归分析，得到最优回归方程和相关系数R^2（图1）。‘金华’‘巴顿’‘肖尼’三个薄壳山核桃品种的最优回归方程分别为：y= −0.000 04x^3+0.014 7x^2−1.7339x+82.879（R^2=0.998 8）、y=−0.000 05x^3+0.017 6x^2−11.998 8x+85.572（R^2= 0.993 4）、y=−0.000 04x^3+0.019 2x^2−2.007 3x+78.545（R^2= 0.980 3）。当y=50%时，得出‘肖尼’‘巴顿’‘金华’3个薄壳山核桃品种的^{60}Co-γ辐照半致死剂量分别为16.77、21.69、23.31 Gy。

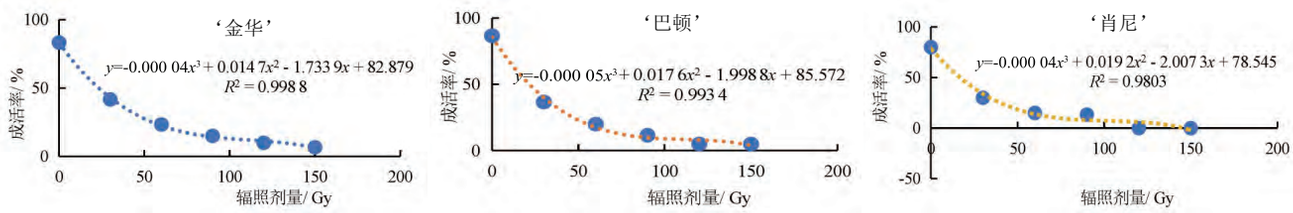


图1　薄壳山核桃不同品种辐照剂量与嫁接成活率的关系

Fig. 1　The relationship between irradiation dose and grafting survival rate of different varieties of *C. illinoensis*

2.2　不同辐照处理对薄壳山核桃新梢生长的影响

不同^{60}Co-γ辐照处理对薄壳山核桃新梢生长影响较大（表2）。在0～150 Gy范围，‘金华’的新梢长度和粗度随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少；不同^{60}Co-γ辐照处理间的‘金华’新梢长度都存在显著差异，各处理都显著低于对照。T4和T5处理的‘金华’新梢粗度差异不显著，但都显著低于其他处理。‘巴顿’的新梢长度和粗度也随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少；T5处理的‘巴顿’新梢长度显著低于其他处理；T3和T4处理的‘巴顿’新梢长度差异不显著，但显著低于T1、T2处理和对照。T5处理的‘巴顿’新梢粗度显著低于其他处理，不同处理间的‘巴顿’新梢粗度均存在显著差异。在0～90 Gy范围，‘肖尼’的新梢长度和粗度随着^{60}Co-γ辐照剂量的升高而减少；T1、T2、T3处理的‘肖尼’新梢长度都显著低于对照，不同处理间的‘肖尼’新梢长度均存在显著差异。T2和T3处理的‘肖尼’新梢粗度差异不显著，T1和T2处理的‘肖尼’新梢粗度也差异不显著，而显著低于对照。

表2　不同辐射处理薄壳山核桃新梢生长情况

Tab. 2　New shoot growth of *C. illinoensis* under different irradiation treatments

处理	‘金华’		‘巴顿’		‘肖尼’	
	枝长/ cm	枝粗/ mm	枝长/ cm	枝粗/ mm	枝长/ cm	枝粗/ mm
T0	128.67±2.04a	18.26±0.62a	123.00±2.50a	15.42±0.37a	97.68±2.17a	16.66±1.83a
T1	109.70±2.05b	15.56±0.80b	89.29±2.52b	14.32±0.29b	74.26±2.73b	11.17±1.05b
T2	85.55±2.99c	13.67±0.73c	69.40±2.63c	11.25±0.36c	39.30±2.61c	10.54±1.31bc
T3	33.62±2.77d	9.32±0.73d	42.00±2.04d	9.76±0.39d	18.15±2.24d	9.03±0.72c
T4	22.30±2.04e	7.26±0.43e	40.00±1.66d	8.79±0.33e	–	–
T5	10.60±1.71f	6.32±0.37e	22.00±1.77e	5.76±0.29f	–	–

2.3　不同辐照处理对薄壳山核桃叶片生长的影响

不同^{60}Co-γ辐照处理对薄壳山核桃叶片长度、叶片宽度和叶面积影响较大（表3）。在0～150 Gy范围，‘金华’的叶片长度、叶片宽度和叶面积随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少；T5处理的‘金华’叶片长度显著小于其他处理；T3和T4处理的‘金华’叶片长度差异不显著，但显著小于T1、T2处理和对照。T4和T5处理的‘金华’叶片宽度差异不显著，但显著小于其他处理；T2和T3处理的‘金华’叶片宽度差异不显著；T1和T2处理的‘金华’叶片长度差异也不显著。T5处理的‘金华’叶面积显著小于其他处理，不同处理间的‘金华’叶面积均存在显著差异。

在0～150 Gy范围，‘巴顿’的叶片长度、叶片宽度和叶面积随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少；T5处理的‘巴顿’叶片长度显著小于其他处理；T2和T3处理的‘巴顿’叶片长度差异不显著，而显著小于T1处理和对照；T1处理的‘巴顿’叶片长度与对照差异不显著。不同^{60}Co-γ辐照处理的‘巴顿’叶片宽度都显著小于对照；T3、T4和T5处理的‘巴顿’叶片宽度差异不显著；T1和T2处理的‘巴顿’叶片宽度也差异不显著。T4和T5处理的

‘巴顿’叶片面积差异不显著，但都显著小于其他处理；T1、T2、T3处理的‘巴顿’叶片面积都显著小于对照。

在0～90 Gy范围，‘肖尼’的叶片长度、叶片宽度和叶面积随着^{60}Co-γ辐照剂量升高而逐渐减少。T2和T3处理的‘肖尼’叶片长度差异不显著，但显著小于T1处理和对照；T1处理的‘肖尼’叶片长度显著小于对照。T1、T2、T3处理的‘肖尼’叶片宽度差异不显著，而显著小于对照。T3处理的‘肖尼’叶片面积都显著小于其他处理；T1、T2处理的‘肖尼’叶片面积都显著小于对照。

表3 不同处理薄壳山核桃叶片长生情况

Tab. 3 Leaf growth of *C. illinoensis* under different irradiation treatments

处理	‘金华’			‘巴顿’			‘肖尼’		
	叶长/ cm	叶宽/ cm	叶面积/ cm^2	叶长/ cm	叶宽/ cm	叶面积/ cm^2	叶长/ cm	叶宽/ cm	叶面积/ cm^2
T0	14.17±0.85a	4.38±0.35a	42.59±2.17a	11.32±0.69a	3.33±0.32a	29.94±2.94a	12.12±1.33a	3.97±0.59a	37.23±1.58a
T1	12.50±0.63b	4.21±0.40ab	33.21±1.97b	10.87±0.68a	2.93±0.28b	22.34±1.49b	10.54±1.34b	2.86±0.30b	24.46±1.37b
T2	11.06±0.65c	3.75±0.34bc	29.16±1.26c	9.12±0.51b	2.77±0.31bc	19.74±1.58c	8.79±0.88c	2.59±0.40b	19.85±1.13c
T3	9.72±0.61d	3.82±0.34c	25.14±1.15d	8.46±0.42b	2.52±0.29cd	13.69±1.37d	8.16±0.65c	2.31±0.29b	11.27±0.84d
T4	8.91±0.59d	3.26±0.19d	20.98±1.30e	6.51±0.50c	2.45±0.30cd	11.22±1.24e	–	–	–
T5	6.54±0.57e	2.90±0.8d	15.52±1.25f	5.24±0.42d	2.27±0.24d	10.07±0.78e	–	–	–

3 结论和讨论

本研究通过^{60}Co-γ射线辐照不同品种薄壳山核桃接穗发现，在一定的辐照剂量范围，随着^{60}Co-γ射线辐照剂量的增加，不同薄壳山核桃品种的嫁接成活率、新梢长度、新梢粗度、叶长、叶宽和叶面积均呈现下降的趋势。3个薄壳山核桃品种对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性由高到低依次为：‘肖尼’‘巴顿’‘金华’，对应的半致死辐照剂量分别为16.77、21.69、23.31 Gy。表明薄壳山核桃对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性较高，低剂量辐照可以使薄壳山核桃枝条产生生物损伤的同时维持较高的嫁接成活率，高剂量辐照使薄壳山核桃枝条产生较大生物损伤从而导致嫁接成活率较低。

不同植物品种及组织器官对^{60}Co-γ射线辐照的敏感性不同，适宜的辐照剂量可提高辐照材料的突变率，得到更多的突变体，增加育成新品种的比率[20-21]。半致死剂量是植物细胞容易发生诱变而又不会致死的临界点，是辐射育种剂量的临界值[22]。在诱变育种中半致死剂量或低于半致死剂量的^{60}Co-γ射线辐照易引起植物材料的突变，且对植物材料伤害轻，易获得优良的变异性状[10]。林文欢等[23]采用不同剂量的^{60}Co-γ射线辐照处理余甘子穗条，发现随着^{60}Co-γ辐照剂量的增加，余甘子穗条嫁接成活率呈现下降的趋势，成活时间延迟；余甘子穗条对^{60}Co-γ射线辐照非常敏感，最适合的辐照剂量为0～30 Gy。柳觐等[24]对不同品种澳洲坚果萌动种子进行辐照，结果表明供试品种云澳41、云澳57、云澳51和云澳58的半致死剂量分别为81.14、62.22、81.81、57.55 Gy。石新杰等[25]利用^{60}Co-γ射线对翠冠和玉露香梨的枝条进行辐射处理，结果表明翠冠和玉露香梨枝条嫁接成活率随辐射剂量的增加而降低，辐射处理导致梨枝条和叶片变异，且不同辐射剂量处理及不同品种响应辐射变异的生物损伤效应存在差异，梨枝条物理诱变育种适宜的辐射剂量高于50 Gy。

本研究中不同薄壳山核桃品种的半致死剂量均小于设置的^{60}Co-γ辐照最低剂量（30 Gy），但研究结果揭示了较大辐射剂量对薄壳山核桃的嫁接效应，如150 Gy辐照条件下‘肖尼’接穗均不能成活，‘金华’和‘巴顿’接穗的嫁接成活率也仅为6.67%和5.00%，高剂量辐照对薄壳山核桃枝梢生长的抑制作用更强。本研究揭示了^{60}Co-γ照射对薄壳山核桃嫁接和新梢生长效应，为薄壳山核桃辐照育种提供理论依据，但由于薄壳山核桃生长年限较长，关于辐射后薄壳山核桃开花结果物候期、果实性状、遗传稳定性、新品种选育等方面的研究仍有待深化，这是今后薄壳山核桃辐射诱变研究的一个重要方向。

参考文献：

[1] 彭方仁,李永荣,郝明灼,等.我国薄壳山核桃生产现状与产业化发展策略[J].林业科技开发,2012,26(4):1-4.

[2] 张日清,吕芳德.美国山核桃在原产地分布、引种栽培区划及主要栽培品种分类研究概述[J].经济林研究,2002,20(3):53-55.

[3] WANG T, HICKS K B, MOREAU R. Antioxidant activity of phytosterols, oryzanol, and other phytosterol conjugates[J]. Journal of the American Oil Chemists'Society, 2002, 79(12): 1201-1206.

（下转第72页）

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.008

黄龙岩省级自然保护区药用植物资源调查与分析

何 遥[1],黄秋淋[2],林青青[1]*
(1.福建中医药大学药学院,福建 福州 350122;2.福州市闽江公园管理处,福建 福州 350001)

摘 要:【目的】深入探究黄龙岩省级自然保护区内的药用植物资源现状,为药用植物的研究和保护工作提供基础数据和理论支持。【方法】通过野外实地调查并结合文献资料,对保护区现有药用植物资源汇总分析。【结果】(1)保护区内共记录到药用植物1 156种,隶属171科632属,其中被子植物占比最大,高达88.67%;在科水平上,以中型科物种为主,占总物种数量的37.28%,单种科占比最少,仅占3.55%;(2)药用植物的生活型以多年生草本为主,占比40.57%;药用部位以全草或全株入药的植物最多,有499种,占比43.17%;药用功效以清热类为主,占比47.32%;(3)列入国家重点保护植物名录的药用植物有26种,另有104种药用植物收录于《中国药典》2020年版一部。【结论】保护区的药用植物资源丰富且分布相对集中,建议在维护保护区良好资源状况的基础上,可加强对保护区内药用植物的药用特性、功效以及人工繁育的相关研究,以实现对该保护区药用植物资源的合理利用和可持续发展。

关键词:药用植物;黄龙岩省级自然保护区;物种多样性;野外调查
中图分类号:S727.34:S757.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0043-07

Investigation and research on medicinal plant resources in Huanglongyan Provincial Nature Reserve

HE Yao[1], HUANG Qiulin[2], LIN Qingqing[1]*
(1. School of Pharmacy, Fujian University of Traditional Chinese Medicine, Fuzhou Fujian 350122, China; 2. Fuzhou Minjiang Park Management Office, Fuzhou Fujian 350001, China)

Abstract:【Objective】To deeply explore the current situation of medicinal plant resources in Huanglongyan Provincial Nature Reserve, and provide basic data and theoretical support for further research and protection in related fields.【Method】Through field investigation and combined with literature, the existing medicinal plant resources in the reserve were summarized and analyzed.【Result】(1) A total of 1 156 species of medicinal plants were recorded in the reserve, belonging to 171 families and 632 genera, of which angiosperms accounted for the largest proportion, up to 88.67%. At the family level, the main family was the medium-sized family, accounting for 37.28% of the total number of species, and the single family accounts for the least, accounting for only 3.55%. (2) The life form of medicinal plants in the reserve is dominated by perennial herbs, accounting for 40.57%. The medicinal parts of the whole grass or the whole plant were the most, with 499 species, accounting for 43.17%. The medicinal efficacy was mainly heat-clearing, accounting for 47.32%. (3) There were 26 species of medicinal plants included in the list of national key protected plants in the reserve, and 104 species of medicinal plants were included in the *'Chinese Pharmacopoeia'* (2020 edition).【Conclusion】The medicinal plant resources in the reserve were rich and their distribution was relatively concentrated. On the basis of maintaining the good resource status of the reserve, the relevant research on the medicinal characteristics, efficacy and artificial breeding of the medicinal plants can be strengthened, so as to realize the rational utilization and sustainable development of the medicinal plant resources in the reserve.

Key words: medicinal plants; Huanglongyan Provincial Nature Reserve; species diversity; field investigation

收稿日期:2024-08-28;2024-11-28修回
基金项目:国家中医药管理局"全国中药资源普查项目"(财社〔2019〕39号)
第一作者:何遥,女,本科在读,主要从事食品科学与工程研究工作。E-mail: 1499541584 @qq.com
***通信作者:**林青青,女,硕士,讲师,主要从事中药资源及品种品质鉴定研究工作。E-mail: Linqq597@126.com
引文格式:何遥,黄秋淋,林青青.黄龙岩省级自然保护区药用植物资源调查与分析[J].南方林业科学,2025,53(1):43-49.
HE Y, HUANG Q L, LIN Q Q. Investigation and research on medicinal plant resources in Huanglongyan Provincial Nature Reserve[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):43-49.

我国的药用植物资源丰富多样，作为国家的战略资源之一，中药资源为我国中医药事业的可持续发展奠定了坚实的基础[1]，近年来，我国的中医药行业正处于高速发展阶段，伴随着对传统中药材需求的激增，国内的药用植物资源也面临着挑战，其物种多样性以及种群规模均会受到一定程度的影响，因此仍需对药用植物进行系统性的深入调查并加强保护。

黄龙岩省级自然保护区坐落于福建省南平市武夷山脉黄冈山东北侧，有保存较为完好且稳定的中亚热带中山森林生态系统、国家重点保护的珍稀野生动植物资源，也是闽江上游水源发源地[2]，区内地势峰谷连绵、险峻陡峭，武夷山脉阻挡了冷空气，使该地区冬季平均气温稍高于同纬度其他地区，在逆温作用下形成“暖带”，减轻冻害。保护区凭借各种特殊区域生境孕育出了丰富的生态系统，使区内植物类型呈现显著的物种多样性，具有较高的利用和保护价值。在生态可持续发展的状况下，构建“保护促利用，利用助保护”的双向增益机制是当前保护区的发展趋势。目前黄龙岩保护区内有关药用植物方面的研究相对匮乏，可供查阅的资料少，大部分研究资料的发表时间距今已久，其数据和结论或难以完全适用于当下情形。因此，本研究对该保护区进行深入调查并统计分析其药用植物资源现状，以期为实现保护区药用植物的资源利用与保护和谐统一提供参考依据[3]。

1 研究区概况

黄龙岩省级自然保护区地理坐标为27°57′49.1″～28°03′56.1″ N，118°05′3.9″～118°11′42.3″ E；面积4 765.16 hm²，涵盖了武夷山岚谷乡横源、岭阳、樟村三个行政村[4-5]。黄龙岩省级自然保护区的山脉由东北向西南延伸，主峰黄龙岩海拔1 528.4 m，最低处海拔459.0 m，以山地地形为主，中低山广布，土壤类型主要是红壤。保护区地处中亚热带季风湿润气候区[6]，最冷月（1月）的月均温5.2℃，最热月（7月）的月均温26.1℃，年均气温16.4℃，年均日照时数4 424.5 h（闰年4 435.7 h），年均降水量1 787.3 mm，年均相对湿度78%。

2 研究方法

2022年3月至2024年2月，根据保护区的地形地貌设置55条植物调查样线，样线布设以均匀分布并涵盖保护区大部分生境类型为标准，对黄龙岩省级自然保护区的药用植物进行多次野外实地调查，拍摄植物的个体形态、群落及生境照[7]，记录种名、采集点、经纬度、海拔等相关地理信息；采集凭证标本，记录行走轨迹。通过查阅文献资料，参照《国家重点保护野生植物名录》《中国植物志》《福建省中药资源名录》《中国药典》[8-11]等著作鉴定植物，将保护区内的药用植物资源进行归类和统计分析，并记录归档。

3 结果与分析

3.1 药用植物物种组成

经调查统计可知，调查区域内共记录到药用植物1 156种，隶属171科632属（表1），物种数≥10种的属共有9属，其中悬钩子属含种类最多，有18种，占比为1.56%；其次是冬青属、蓼属，分别含14种、13种（表2）。

表1 黄龙岩自然保护区药用植物资源的种类组成

Tab. 1 Species composition of medicinal plant resources in Huanglongyan Nature Reserve

植物分类	科数/科	比例/%	属数/属	比例/%	种数/种	比例/%
蕨类植物	21	12.28	60	9.49	123	10.64
裸子植物	3	1.75	7	1.11	8	0.69
被子植物	147	85.96	565	89.40	1 025	88.67
总计	171	100.00	632	100.00	1 156	100.00

其中被子植物最多，有1 025种，占比高达88.67%；其次，蕨类植物有123种，占比10.64%；裸子植物仅有8种，占比不足研究区药用植物资源种数的1%。

表2 黄龙岩自然保护区药用植物物种数为10种及以上的属统计

Tab. 2 Statistics of genera with and more than 10 species of medicinal plants in Huanglongyan Nature Reserve

属名	种数/种	占总物种数比例/%	属名	种数/种	占总物种数比例/%
悬钩子属 *Rubus*	18	1.56	凤尾蕨属 *Pteris*	10	0.87
冬青属 *Ilex*	14	1.21	卷柏属 *Selaginella*	10	0.87
蓼属 *Persicaria*	13	1.12	榕属 *Ficus*	10	0.87
堇菜属 *Viola*	11	0.95	紫金牛属 *Ardisia*	10	0.87
紫珠属 *Callicarpa*	11	0.95			

根据每个科包含的物种数量不同将该保护区的药用植物划分为5个等级,如表3所示,分别为优势科(≥31种)、大型科(16～30种)、中型科(6～15种)、小型科(2～5种)、单种科(1种),其中中型科物种数最多,有431种,占比37.28%;单种科物种数最少,仅占3.55%;优势科虽仅有5科(菊科Asteraceae、豆科Fabaceae、禾本科Poaceae、蔷薇科Rosaceae和唇形科Lamiaceae),物种却有258种,占比达22.32%,说明该保护区药用植物资源种对于科的分布存在相对集聚现象。

表3 黄龙岩自然保护区药用植物资源物种组成

Tab. 3 Species composition of medicinal plant resources in Huanglongyan Nature Reserve

类别(种数)	科数/科	科占比/%	属数/属	属占比/%	种数/种	种占比/%
优势科(≥31种)	5	2.92	147	23.26	258	22.32
大型科(16～30种)	10	5.85	79	12.50	200	17.30
中型科(6～15种)	47	27.49	220	34.81	431	37.28
小型科(2～5种)	68	39.77	145	22.94	226	19.55
单种科(1种)	41	23.98	41	6.49	41	3.55

3.2 药用植物生活型

为适应长期的生长环境,药用植物会形成与环境相适应的形态特征(生活型)[12]。对保护区内的药用植物生活型分类,可分为常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木、落叶灌木、藤本、多年生草本、一二年生草本植物7种类型(表4)。其中多年生草本植物最多,有469种,占总物种数的40.57%;其次是一二年生草本植物,占比为13.75%;常绿乔木最少,仅占6.92%。在木本植物中,常绿灌木的种数最多,占总物种数的11.33%。

表4 黄龙岩自然保护区药用植物的生活型构成

Tab. 4 The life form composition of medicinal plants in Huanglongyan Nature Reserve

生活型	种数/种	比例/%
多年生草本	469	40.57
一二年生草本	159	13.75
常绿灌木	131	11.33
落叶灌木	120	10.38
落叶乔木	100	8.65
藤本	97	8.39
常绿乔木	80	6.92

3.3 药用部位

不同植物有不同的药用部位,同一株植物的多个部位都可药用[13],参考《中华本草》[14]《福建省中药资源名录》[10]等著作,保护区内药用植物的药用部位可划分为12类。以全草或全株入药的植物最多,共499种,占总种数的43.17%,常见物种线蕨(*Leptochilus ellipticus*)、垂穗石松(*Palhinhaea cernua*)等;以根及根茎入药的位居第二,占比达35.55%,常见物种华南舌蕨(*Elaphoglossum yoshinagae*)、万年青(*Rohdea japonica*)等;保护区内药用资源丰富,还分布着以珠芽、成熟孢子为入药部位的落葵薯(*Anredera cordifolia*)、海金沙(*Lygodium japonicum*)等特殊物种(表5)。

表5 黄龙岩自然保护区药用植物药用部位

Tab. 5 Medicinal parts of medicinal plants in Huanglongyan Nature Reserve

入药部位	种数/种	占比/%	举例
全草或全株	499	43.17	垂穗石松*Palhinhaea cernua*、庐山瓦韦*Lepisorus lewisii*、芒萁*Dicranopteris pedata*、金丝草*Pogonatherum crinitum*、过路惊*Tashiroea quadrangularis*、金剑草*Rubia alata*
根及根茎	411	35.55	华南舌蕨*Elaphoglossum yoshinagae*、万年青*Rohdea japonica*、紫萁*Osmunda japonica*、薯蓣*Dioscorea polystachya*、菝葜*Smilax china*、山橿*Lindera reflexa*
叶	230	19.90	清风藤*Sabia japonica*、乌蕨*Odontosoria chinensis*、红背山麻秆*Alchornea trewioides*、蝴蝶花*Iris japonica*、萱草*Hemerocallis fulva*、茅莓*Rubus parvifolius*
茎	129	11.16	庐山小檗*Berberis virgetorum*、龙须藤*Phanera championii*、天仙果*Ficus erecta*
果实	128	11.07	肥皂荚*Gymnocladus chinensis*、笔罗子*Meliosma rigida*、木姜子*Litsea pungens*
花	62	5.36	毛茛*Ranunculus japonicus*、谷精草*Eriocaulon buergerianum*、棣棠*Kerria japonica*
根皮、树皮	59	5.10	木莲*Manglietia fordiana*、细柱五加*Eleutherococcus nodiflorus*、铁冬青*Ilex rotunda*
种子	52	4.50	海金子*Pittosporum illicioides*、金灯藤*Cuscuta japonica*、青皮木*Schoepfia jasminodora*

表5（续）

入药部位	种数/种	占比/%	举例
成熟孢子	1	0.09	海金沙 *Lygodium japonicum*
种子油	1	0.09	山桐子 *Idesia polycarpa*
珠芽	1	0.09	落葵薯 *Anredera cordifolia*

3.4 药用植物药用功效的多样性

保护区内药用植物药用功效包括清热类、消肿类、活血化瘀类、止血类、利湿类等18种。其中，清热类占绝对优势，有547种，占总种数的47.32%，清热类包括清热泻火、清热燥湿、清热凉血、清热解毒及清虚热5种功效[15]；其次是消肿类药用植物，共计326种，占总种数的28.20%；化湿类、安神类和泻下类占总种数的比例不足1%，泻下类仅占0.17%（表6）。

表6 黄龙岩自然保护区药用植物药用功效统计

Tab. 6 Medicinal efficacy statistics of medicinal plants in Huanglongyan Nature Reserve

药用功效	科数/科	比例/%	属数/属	比例/%	种数/种	比例/%	药用功效	科数/科	比例/%	属数/属	比例/%	种数/种	比例/%
清热类	122	71.35	340	53.80	547	47.32	解表类	23	13.45	31	4.91	36	3.11
消肿类	99	57.89	227	35.92	326	28.20	收敛类	24	14.04	29	4.59	35	3.03
祛风湿类	93	54.39	170	26.90	260	22.49	补益类	21	12.28	29	4.59	34	2.94
活血化瘀类	83	48.54	154	24.37	236	20.42	理气类	21	12.28	28	4.43	32	2.77
止血类	78	45.61	127	20.09	198	17.13	消食类	18	10.53	22	3.48	22	1.90
利湿类	72	42.11	116	18.35	149	12.89	拔毒生肌类	17	9.94	19	3.01	21	1.82
化痰止咳平喘类	74	43.27	119	18.83	142	12.28	化湿类	9	5.26	9	1.42	11	0.95
舒筋活络类	36	21.05	56	8.86	62	5.36	安神类	9	5.26	11	1.74	11	0.95
杀虫类	33	19.30	48	7.59	54	4.67	泻下类	2	1.17	2	0.32	2	0.17

注：因同一药用植物有多种功效，因此表中数据存在重复统计。

Note : because the same medicinal plant has multiple effects, so there were duplicate statistics in the table .

3.5 国家重点保护野生药用植物

根据《国家重点保护野生植物名录》（2020年），保护区内分布有国家重点保护野生药用植物26种，隶属14科19属；其中国家一级重点保护野生药用植物仅有1种，为南方红豆杉，国家二级保护野生药用植物25种，如铁皮石斛（*Dendrobium officinale*）、野大豆（*Glycine soja*）、红豆树（*Ormosia hosiei*）、龙舌草（*Ottelia alismoides*）等，见表7。

表7 黄龙岩自然保护区国家重点保护野生药用植物

Tab. 7 National key protected wild medicinal plants in Huanglongyan Nature Reserve

保护级别	物种
一级	南方红豆杉 *Taxus wallichiana* var. *mairei*
二级	闽浙马尾杉 *Phlegmariurus mingcheensis*，寒兰 *Cymbidium kanran*，狭叶重楼 *Paris polyphylla* var. *stenophylla*，茶 *Camellia sinensis*，短萼黄连 *Coptis chinensis* var. *brevisepala*，野大豆 *Glycine soja*，华重楼 *P. polyphylla* var. *chinensis*，红豆树 *Ormosia hosiei*，荞麦叶大百合 *Cardiocrinum cathayanum*，花榈木 *O. henryi*，金线兰 *Anoectochilus roxburghii*，春兰 *C. goeringii*，伯乐树 *Bretschneidera sinensis*，软枣猕猴桃 *Actinidia arguta*，建兰 *C. ensifolium*，金荞麦 *Fagopyrum dibotrys*，铁皮石斛 *Dendrobium officinale*，六角莲 *Dysosma pleiantha*，中华猕猴桃 *A. chinensis*，台湾独蒜兰 *Pleione formosana*，长柄石杉 *Huperzia javanica*，多花兰 *C. floribundum*，龙舌草 *Ottelia alismoides*，香果树 *Emmenopterys henryi*，七叶一枝花 *P. polyphylla*

本研究还统计了濒危野生动植物种国际贸易公约附录(简称：CITES)和世界自然保护联盟濒危物种红色名录(简称：IUCN)的保护级别和收录情况。经统计，黄龙岩保护区内共有25种药用植物收录于CITES，且均属于Ⅱ类（目前无灭绝危机，管制其国际贸易的物种）。IUCN中共收录了242种药用植物，有233种无危物种；3种近危物种：侧柏（*Platycladus orientalis*）、石仙桃（*Pholidota chinensis*）、红豆树（*Ormosia hosiei*）；3种易危物种：七叶一枝花（*Paris polyphylla*）、台湾独蒜兰（*Pleione formosana*）、少花海桐（*Pittosporum pauciflorum*）；1种高危物种：伯乐树

(*Bretschneidera sinensis*);2种极危物种:铁皮石斛、台湾泡桐(*Paulownia kawakamii*)。

3.6《中国药典》收载情况统计

参考《中华人民共和国药典》2020年版一部,统计可得,黄龙岩省级自然保护区共计104种药用植物收录于药典,隶属于58科94属,详见表8。

表8 黄龙岩自然保护区药用植物药典收录名录

Tab. 8 Huanglongyan Nature Reserve Medicinal Plants Pharmacopoeia included list

序号	植物名称	药材名	序号	植物名称	药材名
1	石松 *Lycopodium japonicum*	伸筋草	41	野木瓜 *Stauntonia chinensis*	野木瓜
2	卷柏 *Selaginella tamariscina*	卷柏	42	阔叶十大功劳 *Mahonia bealei*	功劳木
3	紫萁 *Osmunda japonica*	紫萁贯众	43	小木通 *Clematis armandii*	川木通
4	海金沙 *Lygodium japonicum*	海金沙	44	威灵仙 *C. chinensis*	威灵仙
5	狗脊 *Woodwardia japonica*	狗脊	45	垂盆草 *Sedum sarmentosum*	垂盆草
6	石韦 *Pyrrosia lingua*	石韦	46	地锦 *Parthenocissus tricuspidata*	地锦草
7	庐山石韦 *P. sheareri*	石韦	47	山槐 *Albizia kalkora*	合欢皮
8	槲蕨 *Drynaria roosii*	骨碎补	48	苦参 *Sophora flavescens*	苦参
9	马尾松 *Pinus massoniana*	松花粉	49	刀豆 *Canavalia gladiata*	刀豆
10	侧柏 *Platycladus orientalis*	侧柏叶	50	扁豆 *Lablab purpureus*	白扁豆
11	南五味子 *Kadsura longipedunculata*	滇鸡血藤	51	金樱子 *Rosa laevigata*	金樱子
12	华中五味子 *Schisandra sphenanthera*	南五味子	52	积雪草 *Centella asiatica*	积雪草
13	草珊瑚 *Sarcandra glabra*	肿节风	53	梅 *Prunus mume*	乌梅
14	蕺菜 *Houttuynia cordata*	鱼腥草	54	桃 *P. persica*	桃仁
15	厚朴 *Houpoea officinalis*	厚朴	55	枇杷 *Eriobotrya japonica*	枇杷叶
16	玉兰 *Yulania denudata*	辛夷	56	枣 *Ziziphus jujuba*	大枣
17	乌药 *Lindera aggregata*	乌药	57	栝楼 *Trichosanthes kirilowii*	瓜蒌
18	半夏 *Pinellia ternata*	半夏	58	锐尖山香圆 *Turpinia arguta*	山香圆叶
19	天南星 *Arisaema heterophyllum*	天南星	59	柚 *Citrus maxima*	化橘红
20	福州薯蓣 *Dioscorea futschauensis*	绵萆薢	60	青花椒 *Zanthoxylum schinifolium*	花椒
21	薯蓣 *D. polystachya*	山药	61	吴茱萸 *Tetradium ruticarpum*	吴茱萸
22	大百部 *Stemona tuberosa*	百部	62	苦木 *Picrasma quassioides*	苦木
23	七叶一枝花 *Paris polyphylla*	重楼	63	臭椿 *Ailanthus altissima*	椿皮
24	菝葜 *Smilax china*	菝葜	64	楝 *Melia azedarach*	苦楝皮
25	土茯苓 *S. glabra*	土茯苓	65	虎杖 *Reynoutria japonica*	虎杖
26	独蒜兰 *Pleione bulbocodioides*	山慈菇	66	牛膝 *Achyranthes bidentata*	牛膝
27	铁皮石斛 *Dendrobium officinale*	铁皮石斛	67	商陆 *Phytolacca acinosa*	商陆
28	薤白 *Allium macrostemon*	薤白	68	马齿苋 *Portulaca oleracea*	马齿苋
29	天门冬 *Asparagus cochinchinensis*	天冬	69	凤仙花 *Impatiens balsamina*	急性子
30	麦冬 *Ophiopogon japonicus*	麦冬	70	柿 *Diospyros kaki*	柿蒂
31	多花黄精 *Polygonatum cyrtonema*	黄精	71	过路黄 *Lysimachia christinae*	金钱草
32	棕榈 *Trachycarpus fortunei*	棕榈	72	朱砂根 *Ardisia crenata*	朱砂根
33	鸭跖草 *Commelina communis*	鸭跖草	73	钩藤 *Uncaria rhynchophylla*	钩藤
34	淡竹叶 *Lophatherum gracile*	淡竹叶	74	栀子 *Gardenia jasminoides*	栀子
35	薏苡 *Coix lacrymajobi*	薏苡仁	75	络石 *Trachelospermum jasminoides*	络石藤
36	白茅 *Imperata cylindrica*	白茅根	76	菟丝子 *Cuscuta chinensis*	菟丝子
37	大血藤 *Sargentodoxa cuneata*	大血藤	77	女贞 *Ligustrum lucidum*	女贞子
38	木通 *Akebia quinata*	木通	78	车前 *Plantago asiatica*	车前草
39	三叶木通 *A. trifoliata*	木通	79	广东紫珠 *Callicarpa kwangtungensis*	广东紫珠
40	白木通 *A. trifoliata* subsp. *australis*	木通	80	杜虹花 *C. pedunculata*	紫珠叶

表8（续）

序号	植物名称	药材名	序号	植物名称	药材名
81	牡荆 *Vitex negundo* var. *cannabifolia*	牡荆叶	93	半边莲 *Lobelia chinensis*	半边莲
82	夏枯草 *Prunella vulgaris*	夏枯草	94	蓟 *Cirsium japonicum*	大蓟
83	活血丹 *Glechoma longituba*	连钱草	95	千里光 *Senecio scandens*	千里光
84	风轮菜 *Clinopodium chinense*	断血流	96	野菊 *Chrysanthemum indicum*	野菊花
85	紫苏 *Perilla frutescens*	紫苏梗	97	黄花蒿 *Artemisia annua*	青蒿
86	石香薷 *Mosla chinensis*	香薷	98	艾纳香 *Blumea balsamifera*	鹤虱
87	半枝莲 *Scutellaria barbata*	半枝莲	99	苍耳 *Xanthium strumarium*	苍耳子
88	益母草 *Leonurus japonicus*	益母草	100	鳢肠 *Eclipta prostrata*	墨旱莲
89	凌霄 *Campsis grandiflora*	凌霄花	101	豨莶 *Sigesbeckia orientalis*	豨莶草
90	马鞭草 *Verbena officinalis*	马鞭草	102	菰腺忍冬 *Lonicera hypoglauca*	山银花
91	冬青 *Ilex chinensis*	四季青	103	忍冬 *L. japonica*	金银花
92	铁冬青 *I. rotunda*	救必应	104	海金子 *Pittosporum illicioides*	海金子

4 结论与讨论

此次调查区域内共记录到1 156种药用植物，隶属171科632属；其中，悬钩子属、冬青属和蓼属含物种数量较多，分别有18种、14种和13种。在科水平上，以中型科为主，占总物种数量的37.28%，单种科占比最少，仅占3.55%，优势科虽仅有5科，但物种数量却达258种。药用植物的生活型以草本为主。入药部位主要为全草或全株入药、根及根茎，功效以清热类为主。收载于《中国药典》（2020年版一部）的药用植物有58科94属104种。此次调查记录到的药用植物中有26种属于国家重点保护野生植物，其中，国家一级保护物种1种，国家二级保护物种25种。

已有文献记载保护区周边药用植物资源现状：武夷山国家公园有190科758属1 262种[16]；南平茫荡山自然保护区有141科370属528种[17]。武夷山国家公园的面积为1 280 hm^2，远大于黄龙岩省级自然保护区，而两地的药用植物种数相差不大；南平茫荡山自然保护区的面积为9 442.3 hm^2[18]，将近黄龙岩保护区的两倍，但是黄龙岩保护区的药用植物种类却远多于茫荡山自然保护区，可见黄龙岩保护区的药用植物资源丰富且分布相对集中的特点。

综合此次实地调查情况和文献资料记录，发现该保护区内具有丰富的药用植物资源，还构建了智慧保护区平台，设立监控中心、路口监控及防火云台，并接入了福建省林业局系统联网监控，同时结合“林长制”组建专职巡查队，落实网格化管理，目前尚无资料表明武夷山黄龙岩保护区有大规模破坏的情况，现状保护较好。保护区已建成武夷山黄龙岩省级自然保护区宣教中心标本馆，包含森林植被、生态系统等内容，为公众开展寓教于乐的宣传；武夷山市人民政府于2018年发布了《关于印发福建省武夷山黄龙岩省级自然保护区管理办法（暂行）》的通知，规定对保护区定期进行自然资源调查，建立自然资源档案，促进与当地经济社会发展、居民生活诉求的良性互构；因此，当地政府和保护区要继续增强法纪管理力度，向群众普及药用植物的相关知识，制定有关政策并采取保护措施，以维护保护区良好的资源状况，坚持以保护为主，开发为辅。保护区内无村落和常住人口，外围行政村内多为农业人口，他们利用周边资源将采集的药用植物制成中药饮片、中成药、植物提取物，用于医疗、保健等领域，可能间接影响保护区的生态平衡。因此，要继续加强对该保护区内药用植物生态环境和种群状况的动态监测和保护，防止其受到过度采伐或生境破坏的影响。对属于国家重点保护的药用植物资源仍需加强保护力度，保护其种群和生境，以确保它们的生存和繁衍。深入研究该保护区内野生药用植物培育的核心技术，以缓解开发利用与资源保护之间的矛盾，拯救濒危植物。黄龙岩自然保护区已经与生态环境部南京环境科学研究所、福建省武夷山生物研究所建立起合作关系，科学布局监测点和监测样地。保护区应继续与国内外的各大高校、科研院所积极开展联合科学研究，对保护区内的珍稀物种引种栽培、迁地保护。同时，可加强对保护区内药用植物的药用特性和功效的研究，挖掘其潜在的药用价值，以实现对该保护区药用植物资源的合理利用和可持续发展。

参考文献:

[1] 陈士林,魏建和,韩建萍,等.中药农业与中药资源可持续发展[J].世界科学技术-中医药现代化,2007(4):1-7.
[2] 武夷山黄龙岩省级自然保护区[J].福建林业,2024,39(6):49.
[3] 邓群,郎涛,夏建新.药用植物资源开发利用现状及其发展[J].中央民族大学学报(自然科学版),2016,25(1):55-59.
[4] 陈亚令.武夷山黄龙岩省级自然保护区植被现状及其演替总体趋势初探[J].安徽农学通报,2017,23(16):119-121.
[5] 鲁洋.福建黄龙岩自然保护区综合评价与分析[D].南京:南京林业大学,2017.
[6] 聂森,周冬良,乐通潮,等.福建省新建2处省级自然保护区[J].福建林业,2015(3):8.
[7] 上官海平.福建君子峰国家级自然保护区野生药用植物多样性分析[J].福建林业,2023(5):27-30.
[8] 国家重点保护野生植物名录[M].武汉:湖北科学技术出版社,2021.
[9] 中国科学院中国植物志编纂委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,2010.
[10] 杨成梓,林羽.福建省中药资源名录[M].福州:福建科学技术出版社,2021.
[11] 国家药典委员会.中国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2020.
[12] 储亦婷,杨学军,唐东芹.从群落生活型结构探讨近自然植物景观设计[J].上海交通大学学报(农业科学版),2004(2):176-180.
[13] 胡纯,韦宝婧,胡希军等.南雄丹霞梧桐自然保护区药用植物资源多样性研究[J].中国野生植物资源,2020,39(11):70-75.
[14] 国家中医药管理局《中华本草》编委会.中华本草[M].上海:上海科学技术出版社,1999.
[15] 黄秀珍,邹秀红.福建泉州具有清热功效的野生药用植物种类的调查与研究[J].中国农学通报,2015,31(29):104-112.
[16] 廖静怡,柳明珠,马良,等.武夷山国家公园野生药用植物资源调查[J].福建林业,2022(3):46-48.
[17] 董喜明.南平茫荡山自然保护区药用植物资源研究[J].安徽农学通报(下半月刊),2011,17(18):146-148.
[18] 吴良栋.充分发挥基层林业站在森林生态保护与修复中作用[J].福建林业,2015(3):17-18.

(上接第26页)

developing seed kernels of *Styrax tonkinensis*, a woody biodiesel species[J]. BMC Plant Biology, 2020, 20(1):121.
[10] 方振峰,房辉,王峰.越南安息香中1个新的苯丙素类化合物[J].中草药,2021,52(21):6455-6459.
[11] 徐丽萍,喻方圆.东京野茉莉花色成分的初步研究[J].江西农业大学学报,2016,38(5):935-939.
[12] 单银丽.ICP-AES测定越南安息香花中的8种矿质元素[J].光谱实验室,2013,30(6):3309-3311.
[13] 李莉,马冬雪,刘仁林.东京野茉莉(*Styrax tonkinensis*)花的芳香油成分特征分析[J].赣南师范大学学报,2020,41(3):68-72.
[14] 李莉.阳岭种子植物多样性及越南安息香花的芳香油成分研究[D].赣州:赣南师范大学,2019.
[15] 李楠,柳新红,李因刚,等.白花树天然群体的遗传多样性[J].林业科学,2012,48(11):49-56.
[16] 李因刚,柳新红,赵勋,等.越南安息香不同分布区的群落特征[J].林业科学研究,2011,24(4):500-504.
[17] 李因刚,柳新红,赵勋,等.我国越南安息香的地理分布及其气候特征[J].西南林业大学学报,2011,31(1):5-10.
[18] 吴君,李因刚,罗修宝,等.白花树种子生物学特性[J].浙江农林大学学报,2014,31(1):9-13.
[19] 王小敏,许婂婂,詹若挺,等.基于转录组测序的越南安息香根、茎和叶基因表达分析[J].中草药,2021,52(8):2392-2399.
[20] PHUONG T T ,朱一辛,潘彪.热处理条件对越南安息香木材耐软腐性的影响[J].安徽农业大学学报,2014,41(4):609-613.
[21] 赵勋.越南安息香不同种源苗期光合特性研究[D].杭州:浙江农林大学,2011.
[22] 吴亚丽.不同家系东京野茉莉种子营养成分和苗期生长差异研究[D].南京:南京林业大学,2016.
[23] 江香梅,肖复明,刘志开,等.优良生物质能源树种东京野茉莉及其培育技术[J].生物质化学工程,2006,(S1):341-344.
[24] 王湘莹,魏溧姣,王晓明,等.育苗容器对紫叶紫薇容器苗生长、开花及生理的影响[J].西北植物学报,2024,44(7):1064-1072.
[25] 常瑾,陶贵荣,郭玉林.西安郊区育苗大棚土壤养分状况研究[J].西北林学院学报,2010,25(6):52-54.
[26] 姚形成,王军.可降解育苗筒的降解及其对土壤养分和橡胶苗木生长的影响[J].热带农业科学,2019,39(1):1-4.
[27] 王娟,普甜.滇东南珍稀古老植物蒜头果种子结构及子叶多样性研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2023,43(3):1-9,213.
[28] 周琪,吕享,林冰,等.朱砂根种胚繁育技术研究[J].种子,2022,41(8):104-109,115.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.009

广东平远县野生林木种质资源调查分析

王 沉[1,2],谢石杨[3],钟泳林[2],严法麟[3],连辉明[2],谢日芬[3],殷祚云[1],谢佩吾[2]*
(1.仲恺农业工程学院,广东 广州 510225;2.广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院,广东 广州 510520;
3.梅州市平远县林业局,广东 梅州 514600)

摘 要:【目的】摸清广东省梅州市平远县野生林木种质资源情况,为资源的保护与利用提供参考。【方法】通过设置样线,对平远县野生林木种质资源进行摸底调查,并在此基础上对其区系组成、物种多样性和主要利用方式进行分析。【结果】(1)此次调查发现平远县有野生林木种质资源337种,隶属于78科181属,区系组成以热带成为主,呈热带-温带过渡型分布。(2)平远县野生林木种质资源多样性较高,同时呈现出明显的科、属优势特征。(3)平远县野生林木种质资源的利用类型主要有药用(72.40%)、观赏(31.75%)、材用(27.00%)、油料(21.66%)、食用(19.58%)、纤维(10.98%)等13种类型,其中乔木利用程度最高,灌木、藤本次之,竹类的开发利用最少。(4)本次调研发现3种国家二级保护植物(软荚红豆、木荚红豆和软枣猕猴桃),但缺乏有效的保护措施。【结论】建议平远县进一步科学有效地开发利用野生林木种质资源,同时着重加强重点植物资源的保护,以促进林业生产体系和林业产业的健康可持续发展。

关键词:种质资源调查;野生林木;区系特征;物种多样性;资源利用
中图分类号:S757.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0050-06

Investigation and analysis of wild forest tree germplasm resources in Pingyuan County, Guangdong Province

WANG Chen[1,2], XIE Shiyang[3], ZHONG Yonglin[2], YAN Falin[3], LIAN Huiming[2], XIE Rifen[3], YIN Zuoyun[1], XIE Peiwu[2]*
(1. Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou Guangdong 510225, China; 2. Guangdong Academy of Forestry/Guangdong Provincial Key Laboratory of Forest Pest Control, Guangzhou Guangdong 510520, China; 3. Pingyuan County forestry Bureau, Meizhou Guangdong 514600, China)

Abstract:【Objective】To find out the germplasm resources of wild forest in Pingyuan County, Meizhou City, Guangdong Province, and provide reference for the protection and utilization of resources.【Method】The germplasm resources of wild forest in Pingyuan County were investigated by setting translines, and the floristic composition, species diversity and main utilization methods were analyzed on this basis.【Result】(1) 337 species of wild forest germplasm resources were found in Pingyuan County, belonging to 78 families and 181 genera. The analysis showed that their floristic composition was mainly tropical, and their distribution was tropical-temperate transitional type. (2) The diversity of wild forest germplasm resources in Pingyuan County was high, and it also showed obvious family and genus advantages. (3) The utilization types of wild forest germplasm resources in Pingyuan County mainly included 13 types, including medicinal (72.40%), ornamental (31.75%), timber (27.00%), oil (21.66%), edible (19.58%) and fiber (10.98%), among which the utilization degree of trees was the highest, followed by shrub and vine. Bamboo was the least exploited type. (4) In this survey, three species of national second-class protected plants were found (*Ormosia semicastrata*, *Ormosia xylocarpa*, *Actinidia arguta*), but there was a lack of effective protection measures.【Conclusion】It was suggested that Pingyuan County should further develop and utilize wild forest germplasm resources scientifically and effectively, and at the same time strengthen the protection of key plant resources, so as to promote the healthy and sustainable development of forestry production system and forestry industry.

Key words: germplasm resources investigation; wild trees; floristic characteristics; species diversity; resource utilization

收稿日期:2024-09-23;2024-11-28修回
基金项目:广东省林业局自然资源事务专项资金项目"广东省林木种质资源调查"(GDZZDC20228701)
第一作者:王沉,女,硕士在读,主要研究方向林木遗传育种。E-mail: 6717303@qq.com
***通信作者:**谢佩吾,女,副研究员,博士,主要从事林木遗传育种研究。E-mail: xiepeiwu@sinogaf.cn
引文格式:王沉,谢石杨,钟泳林,等.广东平远县野生林木种质资源调查分析[J].南方林业科学,2025,53(1):50-55,60.
WANG C, XIE S Y, ZHONG Y L, et al. Status of wild forest tree germplasm resources in Pingyuan County, Guangdong Province[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 50-55, 60.

林木种质资源是维护生态系统多样性的基础资源,也是国家重要的自然战略资源[1]。2019年,国家林草局正式部署开展第一次全国林草种质资源普查,计划用5年左右的时间基本摸清我国林草种质资源家底,并结合普查,对重要的种质资源进行收集保存。此后各省市开始有序推该项工作,其中四川省和福建省走在了全国前列,目前两省有多个县区已结束外业调查和内业整理,普查成果通过了市级验收和省级核查。林草种质资源普查工作的开展,使得各地区摸清了区域内乔木、灌木、竹类和木质藤本的种类、数量、分布及生长保存情况等家底,并对名古木和珍稀濒危物种的保护起到了极大的推动作用[2-4]。平远县位于广东省东北部,是粤闽赣三省交界之地,三面环山,地形极为复杂,山地主要为武夷山脉的延伸;境内森林面积大、林木资源丰富,是粤东动植物资源保存最好的县域之一。对平远县开展野生林木资源的现状进行调查和分析,是制定该县乃至粤东地区野生林木种质资源保护与开发利用策略的科学基础。

1　研究区概况

广东省梅州市平远县总面积1 381 km^2,24°23′～24°56′ N,115°40′～116°8′ E。山地丘陵占平远县总面积的80%,北部与江西省交界的项山甄为该县最高峰,海拔1 529.5 m;平远县地处南亚热带与中亚热带过渡的气候区,年平均气温20.7℃;年平均降水量为1 683.6 mm。地带性的自然土壤为红壤和山地黄壤。平远县土地资源丰富,且土地肥沃,森林资源丰富,是粤东动植物资源保护得最好的县之一[5]。

2　调查方法与数据分析

在2022年7月－8月对平远县野生林木种质资源展开野外调查,调查以镇为单位,根据不同镇的面积,对平远县的12个镇分别选取1～3条宽度为20 m长度为300 m的样线进行调查,当宽度不满足20 m时,适当延长长度,以保证调研样线面积为6 000 m^2,沿样线记载木本植物(乔木、灌木和木质藤本),拍摄植物照片,并采枝条、叶子、果实、花制作标本。利用《广东植物图鉴》[6]、《广东植物志》[7]等植物学著作及植物智(http://www.iplant.cn/frps)对植物进行鉴定,其中被子植物按照APGIV系统分类,裸子植物按照郑万钧系统(1975)分类。

参照吴征镒等对中国种子植物科属分布区类型的划分方法[8-11],可将平远县野生林木种质资源78科、179属划分为12个分布区类型,如表1所示。

采用WPS中的Excel表格对调查数据进行处理,计算基于信息论的Shannon-Wiener物种多样性指数(D_{SW})和均匀度指数(E_{SW})、基于概率论的Simpson物种多样性指数(D_{Sim})和均匀度指数(E_{Sim})的计算公式如下[12]:

$$D_{SW} = -\sum_{i=1}^{S} Pi \log_2 Pi \tag{1}$$

$$E_{SW} = \frac{D_{SW}}{\log_2 S} \tag{2}$$

$$D_{Sim} = 1 - \sum_{i=1}^{S} Pi^2 \tag{3}$$

$$E_{Sim} = \frac{D_{Sim}}{1 - 1/S} \tag{4}$$

式中,S为样地中科或属的总数,Pi是指第i个高级分类单位的低级分类单位数量占比,如第i个科的属数占比、或第i个科的种数占比。

对该地植物种类进行种-科序、属-科序、种-属序进行绘制比较,并将该反J型曲线进行非线性回归分析,得出以下幂函数模型。

$$y = kx^a \tag{5}$$

其中,x表示科属或属数的排序,y表示属数或种数,k和a是参数,其中k相当于陡度,陡度越小,则该地样方植物种类分布越不均匀。

3　结果与分析

3.1　平远县野生林木种质资源和植物区系组成

调查结果(表1)表明,平远县野生木本植物共337种,隶属78科181属,其中被子植物334种,隶属75科

178属，科、属、种分别占广东省野生植物被子植物的36.97%、12.78%和6.33%，同时调查记录到裸子植物3科3属3种，科、属、种分别占广东省野生植物裸子植物的42.86%、17.65%和8.57%[13]，以下科属区系分布中，不包含马缨丹（*Lantana camara*）、银合欢（*Leucaena leucocephala*）、光荚含羞草（*Mimosa bimucronata*）、牛茄子（*Solanum capsicoides*）四个外来入侵植物及肉桂（*Cinnamomum cassia*）和枳（*Citrus trifoliata*）2个栽培种，共331种，隶属76科176属。

从科的分布区类型来看，除蔷薇科（Rosaceae）、茜草科（Rubiaceae）、桑科（Moraceae）等17科为世界分布类型外，热带（2～7型）共有40科，占66.67%。其中，大戟科（Euphorbiaceae）、夹竹桃科（Apocynaceae）、无患子科（Sapindaceae）等28科为泛热带分布型（2型），占46.67%，是科级的优势分布区类型；松科（Pinaceae）、柏科（Cupressaceae）、猕猴桃科（Actinidiaceae）等20个科为温带分布类型（8～15型），占33.33%。

从属的分布区类型来看，除乌桕属（T*riadica*）、勾儿茶属（*Berchemia*）、云实属（*Biancaea*）等9个属为世界分布类型（1型）外，有113属为2～7型的热带分布类型，占67.26%，其中，紫金牛属（*Ardisia*）、榕属（*Ficus*）、红豆属（*Ormosia*）等42个属为泛热带分布型（2型），占总属数的25.00%，是属级的优势分布区类型；杉木属（*Cunninghamia*）、梧桐属（*Firmiana*）、梨属（*Pyrus*）等55个属为温带分布类型（8～15型），占总属数的32.74%。

可见，平远县野生木本植物区系成分多样性较高，科和属的分布区类型均以热带-亚热带成分为主，并呈现出一定的热带-亚热带-温带过渡型植物区系特征。

表1 野生林木植物科、属分布区类型

Tab. 1 Types of family and genus distribution areas of wild forest germplasm resources

分布类型	科数量/科	占比/%	科名（示例）	属数量/属	占比/%	属名（示例）
1.世界分布	16	–	报春花科Primulaceae、豆科Fabaceae、蔷薇科等	8	–	铁线莲属、悬钩子属、茄属等
2.泛热带分布	30	50.00	山茶科Theaceae、柿科Ebenaceae、樟科Lauraceae、大戟科Euphorbiaceae、漆树科Anacardiaceae等	42	25.00	冬青属*Ilex*、榕属、柿属*Diospyros*、杜英属*Elaeocarpus*、朴属*Celtis*等
3.热带亚洲和热带美洲间断分布	7	11.67	安息香科Styracaceae、冬青科Aquifoliaceae、五加科Araliaceae等	11	6.55	柃属*Eurya*、木姜子属*Litsea*、楠属*Phoebe*等
4.旧世界热带分布	1	1.67	海桐科Pittosporaceae	17	10.12	八角枫属*Alangium*、茜树属*Aidia*、酸藤子属*Embelia*等
5.热带亚洲至热带大洋洲分布	1	1.67	虎皮楠科Daphniphyllaceae	11	6.55	桂属*Cinnamomum*、蜜茱萸属*Melicope*、莞花属*Wikstroemia*等
6.热带亚洲至热带非洲分布	1	1.67	杜鹃花科Ericaceae	6	3.57	豆腐柴属*Premna*、钝果寄生属*Taxillus*、飞龙掌血属*Toddalia*等
7.热带亚洲（印度—马来西亚）分布	2	3.33	清风藤科Sabiaceae、五列木科Pentaphylacaceae	26	15.48	山胡椒属*Lindera*、山茶属*Camellia*、润楠属*Machilus*、清风藤属*Sabia*、含笑属*Michelia*、构属*Broussonetia*等
热带（2～7）合计	42	70.00		113	67.26	
8.北温带分布	12	20.00	柏科、大麻科Cannabaceae、壳斗科Fagaceae、忍冬科Caprifoliaceae、山茱萸科Cornaceae、松科等	16	9.52	杜鹃花属*Rhododendron*、李属*Prunus*、蔷薇属*Rosa*等
9.东亚及北美间断分布	5	8.33	木兰科Magnoliaceae、泡桐科Paulowniaceae、五味子科Schisandraceae等	19	11.31	锥属*Castanopsis*、漆树属*Toxicodendron*、十大功劳属*Mahonia*等
10.旧世界温带分布	–	–		3	1.79	梨属、马甲子属*Paliurus*、女贞属*Ligustrum*
11.温带亚洲分布	–	–		–	–	

表1(续)

分布类型	科数量/科	占比/%	科名（示例）	属数量/属	占比/%	属名（示例）
12.地中海区、西亚至中亚分布	–	–		–	–	
13.中亚分布	–	–		–	–	
14.东亚分布	1	1.67	猕猴桃科	16	9.52	猕猴桃属 *Actinidia*、南酸枣属 *Choerospondias*、枇杷属 *Eriobotrya* 等
15.中国特有	–	–		1	0.60	杉木属
温带（8～15）分布小计	18	30.00		55	32.74	
合计（不含世界分布类型总数）	76（60）	100		176（168）	100	

注:世界分布类型不计算占比。

Note: the world wide spread type does not calculate the scale.

3.2 平远县野生林木种质资源物种多样性

将调查到的337种(78科181属)种质资源进行个体数的记录和分类,并以科-种(图1)、科-属(图2)、属-种(图3)进行多度排列。

平远县野生林木优势科有樟科(8属23种)、蔷薇科(9属23种)、豆科(12属18种)、茜草科(12属15种),这4科的物种数量占本次调查物种总数的23.44%;优势属有榕属(11种)、悬钩子属(9种)、冬青属(8种)、锥属(8种)。棕榈科、榆科、玄参科、松科等26个科在此次调查中仅发现单个物种,棕榈属、云实属、无患子属等共112个属在此次调查中仅发现单个物种。

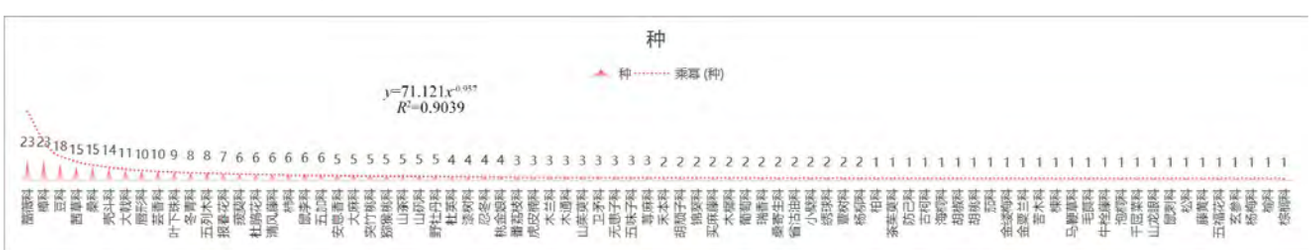


图1 种-科秩多度曲线

Fig. 1 Rank abundance curve of species-family

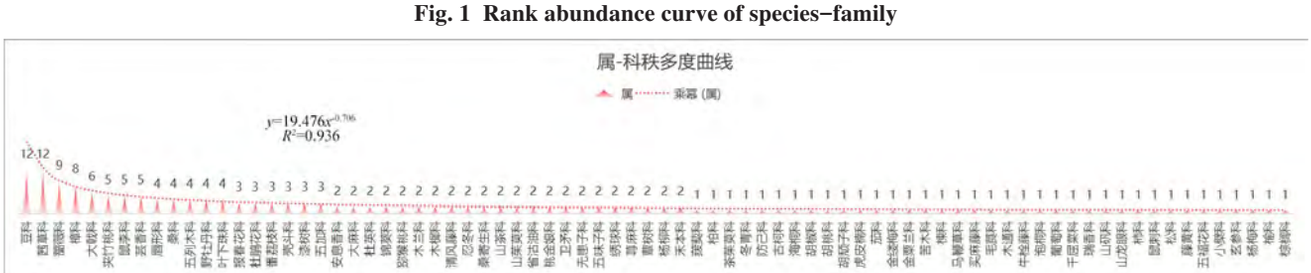


图2 属-科秩多度曲线

Fig. 2 Rank abundance curve of genus-family

图3 种-属秩多度曲线

Fig. 3 Rank abundance curve of species-genus

多样性分析结果如表2,平远县野生林木科-种、属-种的Shannon-Wiener多样性和均匀度指数(D_{SW}、E_{SW})、

Simpson 多样性和均匀度指数(D_{Sim}、E_{Sim})较小,说明该地物种丰富,且分布不均匀,存在明显的优势科、优势种;而科-属 D_{SW}、E_{SW}、D_{Sim}、E_{Sim}较大,即该地优势属较不明显。植物反J型曲线陡度计算结果表明(表2),平远县野生林木种质资源陡度k值表现为科-种 > 科-属 > 属-种。科-种陡度k值最大,说明该地区的木本植物种类在科级分布极其不均,优势科明显,樟科、蔷薇科、豆科和茜草科的树种数量远多于其他科,可见该地区科与属、种之间分布均匀度相差较大[14]。

表2 平远县野生林木种质资源多样性指数、陡度

Tab. 2 Diversity index and steepness of wild forest germplasm resources in Pingyuan County

	D_{SW}	E_{SW}	D_{Sim}	E_{Sim}	k	a
科-种	5.602 994 806	0.891 429 794	0.972 054 842	0.984 678 930	71.121	-0.957
科-属	11.668 902 310	1.856 508 447	0.975 489 149	0.988 157 839	19.474	-0.706
属-种	7.086 878 983	0.944 936 615	0.990 692 042	0.996 226 634	18.022	-0.589

3.3 野生林木种质资源利用方式

将调查到的野生植物科、属、种、乔木、灌木、藤本的总数记为总计,并根据植物智(http://www.iplant.cn/frps)以及中国知网(https://www.cnki.net/)查询到的文献资料,按照以下几种利用类型进行分类,如表3所示。植物生活型反映植物演化和生态学、生物学特性的总特征,是植物生态学者对于有机体的分类,以表示植物生态特性的多样性[12],故将植物生活型与资源利用情况一并统计于表3。

分析发现(表3),平远县野生植物种质资源利用类型中,药用价值的植物占72.40%(244种150属72科),为当地种质资源利用最多的一项,其次为观赏类占31.75%(107种87属55科),用材类植物占27.00%(91种61属36科),油料类植物占21.66%(73种51属36科),可供食用类植物占19.58%(66种49属32科),纤维植物占10.98%(37种31属24科),其余诸如栲胶、鞣料、芳香、有毒、淀粉、染料的利用类型占比低于10%。除此之外,还有一些其他利用类型,占总数的21.96%(74种57属37科),根据其植物特性用于除以上各利用类型其他方面的用途,大概有如下几种类型:杀虫剂、肥料、生态防护功能、食用菌培养皿、手工艺品。

结合植物生态型与利用类型,可见,乔木的利用类型主要以药用为主,其次是用材、观赏、油料、食用、鞣料、纤维、芳香,诸如饲料、有毒、淀粉、蜜源、染料等作用占少数;灌木的主要利用类型为药用,其次是观赏、食用、油料、纤维,如用材、芳香、有毒、饲料、鞣料、蜜源、淀粉、染料等使用价值占比低于10%;藤本科供药用的植物高达91.11%,其次是观赏、食用还有纤维,作为油料、芳香、有毒、淀粉等其他作用占比较少,且无关于用材、鞣料、饲料、蜜源、染料等作用的相关记载;本次调研到的竹类较少,仅2种,均可做观赏、食用且都可加工为工艺品,其次是纤维。

表3 平远县野生林木种质资源的利用

Tab. 3 Types of germplasm resources utilization of wild plants

利用方式	科	属	种	占比/%	生活型							
					乔木	占比/%	灌木	占比/%	藤本	占比/%	禾本	占比/%
药用	72	150	244	72.40	100	59.52	103	84.43	41	91.11	–	0.00
观赏	55	87	107	31.75	57	33.93	36	29.51	12	26.67	2	100.00
材用	36	61	91	27.00	81	48.21	10	8.20	–	0.00	–	0.00
油料	36	51	73	21.66	51	30.36	19	15.57	3	6.67	–	0.00
食用	32	49	66	19.58	26	15.48	27	22.13	11	24.44	2	100.00
纤维	24	31	37	10.98	18	10.71	12	9.84	6	13.33	1	50.00
鞣料	16	21	24	7.12	19	11.31	5	4.10	–	0.00	–	0.00
芳香	12	17	23	6.82	13	7.74	8	6.56	2	4.44	–	0.00
有毒	16	21	21	6.23	11	6.55	8	6.56	2	4.44	–	0.00
饲料	13	18	20	5.93	13	7.74	7	5.74	–	0.00	–	0.00
淀粉	6	8	12	3.56	9	5.36	2	1.64	1	2.22	–	0.00
蜜源	8	10	11	3.26	8	4.76	3	2.46	–	0.00	–	0.00
染料	5	6	6	1.78	4	2.38	2	1.64	–	0.00	–	0.00
其他	37	57	74	21.96	50	29.76	20	16.39	2	4.44	2	100.00

表3(续)

利用方式	科	属	种	占比/%	生活型							
					乔木	占比/%	灌木	占比/%	藤本	占比/%	禾本	占比/%
尚未研究利用	23	30	34	10	20	11.70	12	9.84	2	4.44	0	0.00
总计	76	181	337	–	168	–	122	–	45	–	2	–

注:因同一物种可能有多种功效,因此表中数据存在重复统计。

Note: because the plant may has multiple effects, so there were duplicate statistics in the table.

3.4 国家级保护植物

调研发现3种国家二级保护植物——软枣猕猴桃(*Actinidia arguta*)、木英红豆(*Ormosiaxy locarpa*)和软英红豆(*Ormosiase micastrata*)[15],由于大部分保护植物的群居资源未落到平远县的龙文-黄田省级自然保护区的范围内,没有受到任何保护。为避免非法采集和土地开发等带来的威胁,建议当地林业部门对附近村民开展物种的生态重要性宣传教育,针对面积较大、易受人为活动影响的群落采取具体的保护措施。

4 结论与讨论

平远县处于亚热带地区,气候温和,四季分明,热量丰富,雨量充足,植物分布类型以热带为主,温带为辅,属于过渡型分布类型。平远县物种资源丰富,共有野生林木种质资源337种,隶属78科181属,较之赵幼萍[16]对于粤东海丰县调研到的野生林木种质资源种类更多,更为丰富,说明平远县野生林木种质资源丰富且保存情况良好。这可能是由于平远县地处粤、闽、赣三省交界处,野生动植物资源交流较为丰富,随着鸟类迁徙,人类活动,或者风的带动,促进该地植物的交流。加之该地处于亚热带地区,有热带与温带的气候特点,故热带与温带植物可以在适当的水热条件下生存下来。

调查到的112个单个物种属中,枫香树属(*Liquidambar*)、流苏子属(*Coptosapelta*)、银合欢属(*Leucaena*)、定心藤属(*Mappianthus*)、桃金娘属(*Rhodomyrtus*)这5属在中国均仅有一种;叶底红(*Bredia fordii*)、南蛇藤(*Celastrus orbiculatus*)、三桠苦(*Melicope pteleifolia*)、贵州石楠(*Photinia bodinieri*)、榆(*Ulmus pumila*)、翼核果(*Ventilago leiocarpa*)、柞木(*Xylosma congesta*)这7种原产地非广东地区原生物种,其中有4种原产地为贵州,分别是叶底红、贵州石楠、翼核果和柞木。贵州省的纬度、年均降水量与平均日照时长与平远县较为相近,两地距离不远,可能是自然或人为带来了种子。

从资源的利用类型来看,平远对野生林木种质资源的利用以药用为主,这与我国的中医药文化传统以及客家迁徙历史息息相关。平远以客家人居住为主,在漫长的迁徙过程中,客家人以各种野菜、野果充饥及治疗疾病,积累了丰富的草药利用经验[17],形成了特色鲜明的客家药膳文化。例如,阴香(*Cinnamomum burmanni*)在梅州地区被称为梅片树,其枝叶富含芳香精油,可提取右旋龙脑,即冰片又称梅片,其具有开窍醒神、清热止痛之用,是十分名贵的中药材[18]。此外,平远地区野生林木资源开发利用不均衡,即对乔木开发利用程度最高、类型最丰富,灌木次之,藤本跟竹类开发利用最少。还有黄脉莓(*Rubus xanthoneurus*)、贵州石楠、凤凰润楠(*Machilus phoenicis*)等34个物种尚无资料记载其相关资源利用类型。可见,平远野生林木资源还有待进一步的开发利用。

平远县林木种质资源具备较高的丰富性和多样性,同时呈现出明显的科、属优势特征;由于受到历史、文化等因素的影响,当地林木种质资源的开发利用存在不均衡现象;平远县的国家级保护植物资源的集中分布群落多数分布在保护区之外,这些濒危物种及其生境缺乏有效的保护措施。因此,建议平远县进一步科学有效地开发利用野生林木种质资源,同时着重加强重点植物资源的保护,以促进林业生产体系和林业产业的健康可持续发展。

参考文献:

[1] 郭树杰,毋建军,闫奕心,等.林木种质资源概念及调查方法研究[J].西北林学院学报,2021,36(1):168-172.

[2] 郑焙华.泉州市野生林木种质资源现状分析[J].福建林业科技,2023,50(3):91-95,123.

[3] 赵宝元,叶军,栾玲,等.泰州市林木种质资源调查与保护利用[J].特种经济动植物,2023,26(11):173-179.

[4] 许盈盈,吴焕忠,郑镜明,等.林调70年,助力广东林业高质量发展——广东省林业调查规划院建院70周年纪 (下转第60页)

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.010

城市潜在林木树冠覆盖的区域分布与动态变化
——以南昌市主城区为例

王 华,汤浩藩,迟韵阳,罗坤水,黄文超,狄 岚,唐星林*
(江西省林业科学院 江西南昌城市生态系统定位观测研究站 南昌市城市森林生态重点实验室,江西 南昌 330013)

摘 要:【目的】揭示南昌市潜在林木树冠覆盖(PUTC)的区域分布及动态变化,为未来城市森林建设提供参考依据。【方法】利用ERDAS2014、eCognition Developer 9.0和ArcGIS 10.6等软件解译并分析了南昌市主城区2015—2019年PUTC的空间分布和动态变化情况。【结果】2015—2019年间研究区域PUTC总面积减少了498.4 hm^2,平均斑块面积增大了0.07 hm^2。2015年和2019年新建区PUTC斑块数量和面积最大,青山湖区次之,西湖区最小。2015—2019年间,东湖区和西湖区PUTC平均斑块面积减少,其他区县有不同程度增加。2015年PUTC斑块数量由大到小依次为:中斑块、大斑块、小斑块、特大斑块、巨斑块,而2019年斑块数量由大到小排序为:大斑块、中斑块、小斑块、特大斑块、巨斑块。【结论】研究期间南昌市主城区PUTC明显减少,且越靠近中心城区分布越少,说明可用于城市生态建设的土地面积在变少。

关键词:城市森林;潜在林木树冠覆盖;生态建设;南昌
中图分类号:S731.2 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0056-05

Regional distribution and dynamic change of possible urban tree canopy: a case study of the main urban area of Nanchang City

WANG Hua, TANG Haofan, CHI Yunyang, LUO Kunshui, HUANG Wenchao, DI Lan, TANG Xinglin*
(Jiangxi Academy of Forestry, Jiangxi Nanchang Urban Ecosystem Research Station, Key Laboratory of Nanchang Urban Forest Ecology, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract:【Objective】In order to reveal the regional distribution and dynamic change of Nanchang city, and to provide scientific basis for urban forest construction.【Method】The ERDAS2014、eCognition Developer 9.0 and ArcGIS 10.6 were used to interpret and analyze the changes of the possible urban tree canopy (PUTC) in the main urban area of Nanchang City from 2015 to 2019.【Rusult】The area of PUTC in the study area decreased by 498.4 hm^2, and the average patch area increased by 0.07 hm^2 from 2015 to 2019. The number and area of PUTC in Xinjian County were the largest in 2015 and 2019, followed by Qingshan Lake District, and the smallest in West Lake District. From 2015 to 2019, the average patch area of PUTC in East Lake District and West Lake District decreased, while it increased in different extent in the other districts and counties. The number of PUTC patches decreased by medium patch, large patch, small patch, extra large patch, giant patch in 2015, and it decreased by large patch, medium patch, small patch, extra large patch, giant patch in 2019.【Conclusion】During the research period, the PUTC in the main urban area of Nanchang City decreased significantly, and the distribution showed that the more urban centers had the less PUTC, indicating that the land area available for urban ecological construction decreased.
Key words: urban forest; potential urban tree canopy; ecological construction; Nanchang

城市林木树冠覆盖一般分为现实林木树冠覆盖(EUTC)和潜在林木树冠覆盖(PUTC)两类。现实林木树冠覆盖是指当前状态下被城市森林覆盖的土地面积。潜在林木树冠覆盖是指那些适合种植树木而目前还未实

收稿日期:2024-08-27;2024-11-26修回
基金项目:江西省林业科学院青年人才培养项目(2021520801);江西省林业科学院基础科学研究项目(2023510801)
第一作者:王华,男,工程师,硕士,研究方向为遥感生态学研究。E-mail: 4260926@qq.com
***通信作者:**唐星林,男,副研究员,博士,研究方向为森林生态学。E-mail: txl_insist@126.com
引文格式:王华,汤浩藩,迟韵阳,等.城市潜在林木树冠覆盖的区域分布与动态变化——以南昌市主城区为例[J].南方林业科学,2025,53(1):56-60.
WANG H, TANG H F, CHI Y Y, et al. Regional distribution and dynamic change of possible urban tree canopy: a case study of the main urban area of Nanchang City[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):56-60.

施种植的土地面积[1]。PUTC可以从未来城市森林建设的角度,为城市生态工程建设提供决策参考。潜在林木树冠覆盖对森林城市建设的规划与具体实施具有重大意义,目前,国内外已将其作为城市森林研究中的重要内容[2-3]。研究表明,在城市的不同区域,PUTC的分布不同,比如,厦门市PUTC主要分布在思明区[4];北京市PUTC主要分布在郊区,越靠近中心区域其分布越少[1]。也有研究表明,城市不同绿地类型中PUTC的分布不同[3]。

经历快速城市化后,南昌市环境污染、资源短缺和土地利用矛盾等生态环境问题日益凸显。研究表明,随着城市建设的快速发展,南昌市生态用地与建设用地、农用地等之间的矛盾加深[5]。目前,城市森林覆盖率较低、绿化空间有限是南昌市在城市森林建设中面临的主要问题之一[6]。而城市潜在生态用地分析是城市森林建设中最重要的基础工作。鉴于此,本文通过研究2015—2019年南昌市主城区潜在林木树冠覆盖的区域分布及动态变化,以明确潜在生态用地的现状及其动态,为持续开展城市森林建设、优化城市森林格局提供参考依据。

1　研究区概况

南昌市是江西省省会,地理坐标为28°09′～29°11′ N,115°27′～116°35′ E。全境以平原为主,气候湿润温和,雨量充沛,年均气温17.7 ℃,年均降水量1 600 mm,属亚热带湿润季风气候。根据《2023年南昌市统计年鉴》,南昌市建成区绿化覆盖率达43.15%,建成拥有公园绿地面积4 332.21 hm^2,人均公园绿地面积达13.18 m^2[7]。南昌市城区常见树种有樟树(*Cinnamomum camphora*)、枫杨(*Pterocarya stenoptera*)、榆树(*Ulmus pumila*)、榉树(*Zelkova serrata*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、马褂木(*Liriodendron chinense*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、杜英(*Elaeocarpus decipiens*)、广玉兰(*Magnolia grandiflora*)、木犀(*Osmanthus fragrans*)、无患子(*Sapindus saponaria*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、柚(*Citrus maxima*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、毛竹(*Phyllostachys edulis*)和夹竹桃(*Nerium oleander*)等。

2　材料与方法

2.1　潜在林木树冠覆盖分类

目前,潜在林木树冠覆盖还没有一个受到学术界和政府相关部门共同认可的分类系统,参考国内外相关研究[8-9],本研究将PUTC分为荒草地和裸地两类,其中,荒草地是指目前为土质基质、长有一年生或多年生杂草,植被覆盖度小于10%的区域。裸地为表层无植被覆盖的土质地表。

2.2　影像数据及解译方法

本研究选择南昌城区4条绕城高速围合区域作为研究区域,涵盖南昌市城区面积约97 427.1 hm^2,包括红谷滩区、新建区、东湖区、西湖区、青山湖区、青云谱区和南昌县(见图1)。选取覆盖该区域的2015年7—9月和2019年7—9月高分二号卫星影像(空间分辨率2 m)。采用ERDAS2014软件对卫星影像进行几何校正和正射校正。基于eCognition Developer 9.0对研究区域卫星影像进行多尺度分割并解译,通过检验,2015和2019年影像的分类结果总体精度分别达到了89.00%和87.25%,Kappa系数分别达到了0.842和0.817[10]。采用ArcGIS 10.6软件,在2015和2019年南昌市主城区不同地类(森林、草地、裸地、农田、不透水地表和水体)解译结果的基础上,提取其草地和裸地的矢量图,并参考植被覆盖度信息,通过目视解译方法从草地中区分出荒草地。

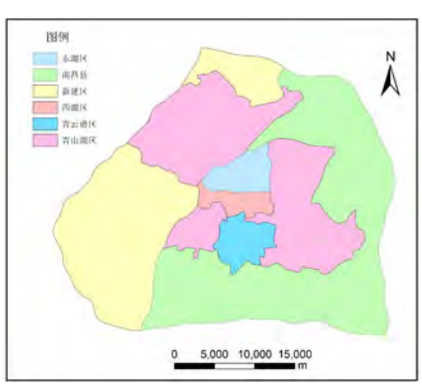


图1　研究区范围

Fig. 1　The study area

2.3　PUTC大小分级

参照吴泽民等[11]提出的标准对潜在林木树冠覆盖斑块进行分级:巨斑块面积>50 000 m^2、10 000 m^2<特大斑块面积≤50 000 m^2、2 000 m^2<大斑块面积≤10 000 m^2、500 m^2<中斑块面积≤2 000 m^2、小斑块面积≤500 m^2。

3　结果与分析

3.1　南昌市主城区潜在林木树冠覆盖的空间分布

2015年和2019年南昌市主城区潜在林木树冠覆盖(PUTC)斑

块分布情况如图2所示。总体来看，2015－2019年南昌市主城区的PUTC减少，PUTC的连续性也在降低。从空间分布来看，2015年PUTC主要分布在西南区域（新建区），而到了2019年，则主要分布在北部区域（青山湖区），其他区域的变化情况不明显。从类型上看，2015和2019年裸地均占绝对优势，且2015－2019年间裸地和荒草地面积均呈现出减少的趋势。

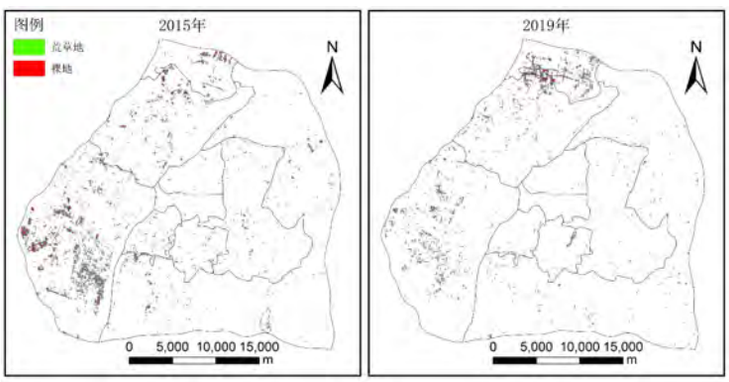


图2 研究区域2015－2019年潜在林木树冠斑块空间分布

Fig. 2 The possible urban tree canopy distribution in the study region from 2015 to 2019

3.2 2015－2019年间潜在林木树冠覆盖的数量变化

从遥感解译结果来看（表1），2019年研究区域PUTC的总面积为953.6 hm^2，与2015年相比减少了498.4 hm^2。从斑块类型来看，2019年裸地总面积为826.3 hm^2，面积占比为86.7%，显著高于荒草地（总面积127.3 hm^2，面积占比13.3%）；2015年裸地和荒草地面积大小也表现出类似的结果。2015－2019年间，荒草地和裸地均大幅减少，减少面积分别为68.9 hm^2和429.5 hm^2。

表1 研究区域2015－2019年潜在林木树冠覆盖面积的总体变化

Tab. 1 The changes of PUTC in the study region from 2015 to 2019

斑块类型	斑块数量/个		数量占比/%		面积/hm^2		面积占比/%		面积变化/hm^2
	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年	
荒草地	253	236	7.5	12.3	196.2	127.3	13.5	13.3	−68.9
裸地	3 105	1 684	92.5	87.7	1 255.8	826.3	86.5	86.7	−429.5
合计	3 358	1 920	100	100	1 452.0	953.6	100	100	−498.4

3.3 南昌市主城区不同区县潜在林木树冠覆盖面积变化

南昌市不同区县PUTC分布及统计结果如表2所示，从斑块数量来看，与2015年相比，2019年研究区域各区县PUTC呈现出减少的趋势。从斑块面积来看，2015－2019年，除青云谱区和青山湖区PUTC面积有少量增加外，其余县区PUTC面积均有所减少。从全区域来看，2015－2019年，PUTC数量和面积都呈现出减少的趋势。

由表2可知，2015年和2019年新建区PUTC斑块数量和面积均为最大，其次为青山湖区，西湖区最小。从占区县面积比例来看，2015年和2019年新建区PUTC占区县面积比例最大，分别为3.77%和2.01%，其次为青山湖区（分别为1.19%和1.22%），西湖区最小（分别为0.13%和0.02%）。

表2 研究区域不同区县2015－2019潜在林木树冠覆盖面积变化

Tab. 2 The changes in area of PUTC of different districts in the study region from 2015 to 2019

斑块类型	斑块数量/个		总斑块面积/hm^2		平均斑块面积/hm^2		占区县面积比例/%	
	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年
东湖区	27	18	5.7	2.4	0.21	0.13	0.19	0.08
西湖区	15	9	2.6	0.4	0.17	0.04	0.13	0.02
青云谱区	83	28	25.2	37.2	0.30	1.33	0.79	1.16
青山湖区	830	566	327.2	335.3	0.39	0.59	1.19	1.22
新建区	1 831	1 028	959.6	512.9	0.52	0.50	3.77	2.01
南昌县	614	291	173.6	102.0	0.28	0.35	0.48	0.28
合计	3 400	1 940	1 493.9	990.2	0.44	0.51	1.53	1.02

3.4 潜在林木树冠覆盖斑块的规模特征变化

斑块大小是一个很重要的景观格局量化参数,它直接影响着斑块内部与斑块之间的物质及能量流动。目前用于描述斑块大小的参数主要有两个:一是平均斑块面积,二是不同规模斑块的数量与空间分布。由表2可知,PUTC平均斑块面积从2015年的0.44 hm^2增长到2019年的0.51 hm^2。2015－2019年间,东湖区和西湖区PUTC平均斑块面积减少,其他区县均有不同程度的增加,其中青云谱区的增幅最大,从2015年的0.30 hm^2增长到2019年的1.33 hm^2,这与青云谱区PUTC斑块数量的大幅减少有关。

2015和2019年研究区域PUTC的斑块分级情况如表3所示。从斑块数量来看,在2015年,中斑块数量最多(1 549个),占当年总斑块数的46.0%;大斑块次之(1 229个),占比为36.6%;巨斑块数量最少(32个),占比为1.0%。而在2019年,大斑块数量最多,占比为47.9%;中斑块次之,占比为35.1%;巨斑块最小,占比为0.9%。从斑块面积来看,2015年和2019年大斑块的面积均为最大,占比分别为35.3%和42.6%;其次为特大斑块,占比分别为30.2%和28.4,巨斑块面积占比都在20%左右,小斑块面积占比最小,均在1%以下。

表3 研究区域潜在林木树冠覆盖不同斑块等级的数量与面积

Tab. 3 The patch number and area in different patch classes of PUTC in the study region from 2015 to 2019

斑块等级	斑块数量/个		斑块数量占比/%		斑块面积/hm^2		斑块面积占比/%	
	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年	2015年	2019年
小斑块	311	163	9.3	8.5	10.4	5.3	0.7	0.6
中斑块	1 549	673	46.0	35.1	183.3	82.9	12.6	8.7
大斑块	1 229	920	36.6	47.9	512.4	406.4	35.3	42.6
特大斑块	237	147	7.1	7.6	438.0	270.5	30.2	28.4
巨斑块	32	17	1.0	0.9	307.9	188.5	21.2	19.7
合计	3 358	1 920	100	100	1452	953.6	100	100

4 结论与讨论

城市森林建设是改善城市生态环境的重要途径[12]。潜在林木树冠覆盖代表城市森林建设可以利用的土地空间,是城市森林发展的潜力指标[4]。东湖区、西湖区、青云谱区等作为南昌市主城区的核心区域,其潜在林木树冠覆盖面积很小,可用于城市森林建设的土地严重不足。这就决定了传统的城市森林面积扩张策略对于这些区域林木树冠覆盖格局的改变有很大的局限性。因此,这些区域未来的城市森林建设必须寻找新的途径。目前,部分国内大城市利用老城区拆迁改造等机遇,充分利用不透水地表来建设城市森林[1]。上海、广州、深圳等城市大力发展屋顶绿化、绿化墙、高架绿化等垂直绿化以增加现实林木树冠覆盖[13-15]。此外,在PUTC短缺的情况下,城市森林建设应充分考虑利用PUTC来建设城市森林来增强斑块间的有效连接,以增加景观连接度[4]。这些城市森林建设案例也为南昌城市森林建设提供了参考。

本研究发现2015－2019年间南昌市主城区PUTC面积减少了34.3%,说明可用于城市建设的土地面积越来越少,这与北京、厦门等城市的研究结果类似[1, 4]。研究表明,云南曲靖市沾益建成区PUTC中裸地面积显著大于荒草地[3],本研究也发现了类似现象。本研究发现,2015－2019年,有429.8 hm^2裸地转化为其他类型,这也进一步说明裸地是PUTC向EUTC转化的主要地类。从PUTC斑块等级来看,南昌市主城区以大斑块、特大斑块和巨斑块为主,这可以为大型郊野公园的建设提供土地条件。北京和上海等地已经在城郊地区建立了多个大型公园或大面积绿化带,以提升城市森林的生态系统服务功能[16-18]。

总体来看,2015年和2019年PUTC面积分别为1 452 hm^2和953.6 hm^2,仅占研究区域面积的1.53%和1.08%,这说明,研究区域土地资源可利用的潜力不高,且随时间的推移呈快速下降趋势。从PUTC的空间分布来看,南昌市主城区PUTC主要分布在城郊区域;从PUTC类型来看,裸地面积显著大于荒草地。2015－2019年PUTC斑块数量减少了1 438个,平均斑块面积增加了0.07 hm^2。从斑块大小分级来看,2015和2019年大斑块占绝对优势,其斑块面积占比分别为35.3%和42.6%。

参考文献：

[1] 贾宝全,张文,李晓婷,等.北京城市潜在林木树冠覆盖的区域分布、动态变化与评价研究[J].生态学报,2020,40(3):1-14.
[2] 朱坤,代继平,彭建松,等.腾冲市建成区树冠覆盖及其树种多样性分析[J].西北林学院学报,2022,37(2):51-59.
[3] 王梦瑶,彭建松,和晓菲,等.沾益区林木树冠覆盖与植物多样性[J].东北林业大学学报,2023,51(2):24-32.
[4] 高美蓉,贾宝全,王成,等.厦门市中心区城市森林树冠覆盖及潜力分析[J].东北林业大学学报,2013,41(9):76-79+126.
[5] 肖圣,多玲花,邹自力.基于"风险-连通性-潜力"的南昌市生态韧性评估[J].应用生态学报,2023,34(3):733-741.
[6] 南昌市林业局.2023年南昌市国土绿化状况公报[R].2024.
[7] 南昌市统计局.2023年南昌市统计年鉴[R].2023.
[8] 和晓菲,陈鑫,王梦瑶,等.基于eCognition影像解译的云南会泽县建成区林木树冠覆盖分析[J].林业资源管理,2022,4:100-108.
[9] Michael F. A report on the city of Baltimore′s existing and possible urban tree canopy[G]. U S Forest Service, 2009.
[10] 唐星林,王华,罗坤水,等.城市森林树冠覆盖特征与景观生态变化——以南昌市为例[J].南方林业科学,2024,52(2):27-31.
[11] 王原,吴泽民,张浩,等.基于RS和GIS的马鞍山市分区城市森林景观格局综合评价[J].北京林业大学学报,2008,30(4):46-52.
[12] 刘常富,李海梅,何兴元,等.城市森林概念探析[J].生态学杂志,2003,22(5):146-149.
[13] 刘莹,王国光.城市新型屋顶绿化的造景要素与美景度研究——以广州地区为例[J].太原城市职业技术学院学报,2018,(9):19-23.
[14] 彭毓.立体绿化在深圳园林绿化中的应用[J].现代园艺,2018,14(7):160.
[15] 骆天庆,刘亦凡和龚修齐.基于局地气候区的上海产业街区屋顶绿化近地降温效果[J].中国城市林业,2023,21(2):58-66.
[16] 贾宝全,仇宽彪.北京市第二道绿化隔离区林木树冠覆盖特征与景观格局变化[J].林业科学,2019,55(2):13-21.
[17] 贾宝全,刘秀萍.北京市第一道绿化隔离区树冠覆盖特征与景观生态变化[J].林业科学,2017,53(9):1-10.
[18] 彭婉婷,刘文倩,蔡文博,等.基于参与式制图的城市保护地生态系统文化服务价值评价——以上海共青森林公园为例[J].应用生态学报,2019,30(2):439-448.

（上接第55页）

实[J].林业与环境科学,2022(S1):3-5.
[5] 李丹玲,梁琛妍,陈蕴琳,等.广东省平远县野生药用植物资源研究[J].农业灾害研究,2023,13(10):46-48.
[6] 叶华谷,邢福武,廖文波,等.广东植物图鉴（上、下册）[M].武汉:华中科技大学出版社,2018.
[7] 中国科学院华南植物所.广东植物志（1～8卷）[M].广州:广东出版社,1987-2007.
[8] 吴征镒.《世界种子植物科的分布区类型系统》的修订[J].云南植物研究,2003(5):535-538.
[9] 吴征镒,周浙昆,李德铢,等.世界种子植物科的分布区类型系统[J].云南植物研究,2003(3):245-257.
[10] 吴征镒.中国种子植物属的分布区类型[J].云南植物研究,1991（增刊Ⅳ）:1-139.
[11] 吴征镒,孙航,周浙昆,等.中国植物区系中的特有性及其起源和分化[J].云南植物研究,2005(6):577-601.
[12] Krebs C J. Ecology: the experimental analysis of distribution and abundance(5th ed)[M]. Sanfrancisco, CA: Benjamin Cummings, 2001.
[13] 宋柱秋,叶文,董仕勇,等.广东省高等植物多样性编目和分布数据集[J].生物多样性,2023,31(9):74-81.
[14] 殷祚云,任海,彭少麟,等.华南退化草坡自然恢复中物种多度分布的动态与模拟[J].生态环境学报,2009,18(1):222-228.
[15] 林草局农业农村部.国家重点保护野生植物名录[R/OL].(2021-09-07)[2024-11-20]: 10-15. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-09/09/content_5636409.htm
[16] 赵幼萍,秦新生.海丰县野生林木种质资源研究[J].中国野生植物资源,2023,42(3):9-14.
[17] 翟明,林大都,李俊芳,等.梅州客家中草药市场调查研究[J].中国民族民间医药,2020,29(19):113-116.
[18] 吴先基,陈一群,陈杰连,等.龙脑型阴香截顶采收技术研究[J].亚热带植物科学,2018,47(4):380-385.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.011

庐山风景名胜区山地湖泊生态系统服务功能价值核算

文 静,谢冬明*
(江西科技师范大学旅游与历史文化学院,江西 南昌 330000)

摘 要:【目的】为建立庐山生态补偿机制,对庐山风景名胜区山地湖泊生态系统服务功能价值进行科学的评估。【方法】基于千年生态系统评估,以2023年为基准年,采用市场价值法、影子工程法等方法对庐山风景名胜区6个重点湖泊的9项子服务功能进行评估与分析。【结果】庐山风景名胜区6个重点湖泊的生态功能总价值约为9 330万元,其中,直接功能价值约为2 294万元,间接功能价值约为6 406万元,间接价值约是直接价值的3倍,差距较大;以CVM法采用问卷调查的方式估算的非使用价值约为638万元,且受教育水平和月收入对存在价值的支付意愿有显著影响;各项子服务功能价值量从大到小的顺序依次为:蓄水、防洪、发电、供水、存在价值、旅游景观、维持生物多样性、气候调节、科研教育;各湖泊提供的价值量从大到小排列依次为:将军河水库、莲花台水库、芦林湖、如琴湖、仰天坪水库、大月山湖。【结论】从估算价值的方法来看,影响庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值的主要因素是经济发展水平、资源禀赋(如面积大小)。

关键词:山地湖泊;生态资产;价值评价
中图分类号:S791.27:S722.5 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0061-06

Value accounting of mountain lake ecosystem service function in Lushan Scenic Area

WEN Jing, XIE Dongming*
(College of Tourism and History Culture, Jiangxi Science and Technology Normal University, Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract:【Objective】In order to establish the ecological compensation mechanism of Lushan Mountain, the service function value of mountain lake ecosystem in Lushan Scenic Area was scientifically evaluated.【Method】Based on the Millennium Ecosystem Assessment, this study evaluated and analyzed the nine sub-service functions of six key lakes in the scenic spot with the year of 2023 as the reference year, using market value method, shadow engineering method and other methods.【Result】The total ecological function value of the six key lakes in Lushan Scenic Area is about 93.3 million yuan, of which the direct function value is about 22.94 million yuan, the indirect function value is about 64.06 million yuan, and the indirect value is about three times the direct value, which is quite different. The non-use value estimated by CVM method by questionnaire survey is about 6.38 million yuan, and the education level and monthly income have significant influence on the willingness to pay for the existing value; The value of each sub-service function in descending order is: water storage, flood control, power generation, water supply, existence value, tourism landscape, biodiversity maintenance, climate regulation, scientific research and education; The order of value provided by each lake is: Jiangjunhe Lake, Lianhuatai Lake, Lulin Lake, Ruqin Lake, Yangtianping Lake and Dayueshan Lake.【Conclusion】According to the formula and method of estimating value, the main factors affecting the value of ecological assets of mountain lakes in Lushan Scenic Area are the level of economic development and resource endowment (such as area size).

Key words: mountain lakes; ecological assets; valuation

生态系统服务功能是自然环境与人类活动之间的重要纽带。作为生态学和生态经济学研究的一

收稿日期:2024-11-15;2024-12-16修回
基金项目:江西省重点研发项目(20151BBG70014)
第一作者:文静,女,硕士在读,主要从事旅游可持续发展研究。E-mail:1914234978@qq.com
***通信作者:**谢冬明,男,教授,博士,主要从事旅游可持续发展研究。E-mail:271540168@qq.com
引文格式:文 静,谢冬明.庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值核算[J].南方林业科学,2025,53(1):61-66,86.
WEN J, XIE D M. Valuation of ecological assets of mountain lakes in Lushan scenic Area[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):61-66,86.

个细分科学，近年来受到越来越多学者的关注。国外早期对生态系统服务功能的评估主要集中在生态系统所产生的直接经济价值[1-5]。Costanza等[6]对全球生态系统服务价值进行评估，将生态系统服务功能分为17类，为全面评价生态系统服务功能提供了参考，掀起了业内学者对生态系统服务价值评估的热潮。国内对生态系统服务功能价值的评估起步较晚，并且大多都以Costanza等[6]的研究为基础展开。其中，谢高地[7-8]、赵同谦等[9]对中国生态系统提供的11种生态服务类型价值进行核算，较为系统地归纳了中国典型的生态系统服务功能价值，为后来的研究提供了参考。庐山风景名胜区作为国家首批重点风景名胜区，其生态服务价值对庐山周边乃至九江市甚至整个江西省生态服务功能的评价以及生态安全的评估都有着重要的现实意义。庐山风景名胜区的湖泊生态系统为当地居民及游客提供了饮水、发电、旅游景观以及维护生物多样性等多项服务功能，然而，高强度的游客活动、全球气候变化正对其脆弱的生态系统构成显著威胁[10]。目前，仍不清楚庐山风景名胜区山地湖泊生态服务功能的价值，影响了庐山生态补偿机制的建立。本研究选取庐山风景名胜区6个重点湖泊对其生态服务功能价值进行评估。

1 研究区域概况

庐山(29°26’～29°41’ N，115°52’～116°8’ E)雄踞于江西省北部，北濒长江，东接鄱阳湖，南靠南昌滕王阁，西邻京九铁路，耸峙于长江中下游平原与鄱阳湖畔。庐山风景名胜区地处亚热带东部季风气候区，具有鲜明的季风气候特征以及典型的山地气候特征，森林资源十分丰富，植被以阔叶林和次生的针叶林为主，有多种国家保护植物。

水库生态学作为湖沼学的一个分支，很多针对水库生态的研究都是以湖沼学的理论为基础开展的[11]。水利部门官网中也明确将水库的定义表述为“人工湖”，这一表述常被相关研究者[12-13]引用。在庐山风景名胜区中，分布着很多湖泊及水库，其中，面积在10 000 m^2以上，海拔在800 m以上的有6个，分别为芦林湖、如琴湖、莲花台水库、将军河水库、仰天坪水库、大月山湖(表1)。这6个重点湖泊在庐山风景名胜区承载了多重生态系统服务功能价值，大月山湖、芦林湖和莲花台水库承担了主要饮用水源区的功能，如琴湖兼具景观和防洪功能，将军河水库承担了发电、防洪功能。

表1 庐山风景名胜区6个重点湖泊的基本情况

Tab. 1 The basic situation of six key lakes in Lushan Scenic Area

湖泊名称	面积/ m^2	库容/ 万 m^3	高程/ m
芦林湖	83 000	112.6	1 000
如琴湖	64 000	116	1 020
莲花台水库	62 000	92	920
将军河水库	35 000	118	830
仰天坪水库	19 000	21.2	1 280
大月山湖	18 000	8.22	1 260

2 评估方法及数据来源

2.1 评估方法

以2023年为基准年，采用学术界内较为权威的MA分类体系(Millennium Ecosystem Assessment)将庐山风景名胜区山地湖泊生态服务功能划分为供给、调节、文化、支持四大类功能，筛选出供水、发电、防洪等9项子服务功能指标，参考已有文献[14-20]对庐山风景名胜区六大山地湖泊生态系统服务功能价值进行估算。

9个子服务功能对应的所属价值类型为：供水、发电、防洪、蓄水、气候调节、旅游景观的价值类型为直接使用价值，维持生物多样性的价值类型为间接使用价值，存在价值的价值类型为非使用价值。存在价值指的是为了确保湖泊各项功能长期持续存在，人们愿意支付的价值。因各个湖泊之间的存在价值难以划分，因此在接下来的研究中将存在价值从文化功能价值中分离出来单独评估，具体操作如下：采用条件价值法(CVM)构建假想市场，基于效用最大化的原理，采取问卷调查的方式来了解受访者对于保护生态环境所愿意支付的最大支付意愿(WTP)，再乘以对应的总人口样本量来估算其存在价值。综合考虑庐山风景名胜区6大重点湖泊的生态系统结构特征、数据的可得性以及评价方法的适用性，并结合实际调查研究结果，采用不同的方法进行估算，各指标的评价方法及参数选取情况见表2。

表2 庐山风景名胜区湖泊生态系统服务功能评价方法及参数

Tab. 2 Evaluation methods and parameters of ecosystem services of lakes in Lushan Scenic Area

服务功能	评价指标	评价方法	计算公式	参数及取值
提供功能	供水	市场价值法	$V_W=\sum A_i P_i$	V_w为湖泊供水功能价值(元),A_i为第i种用途的水量(t),P_i为第i种用途水的市场价格(元/t)
	发电	市场价值法	$V_W=YP_{电价}$	V_e为湖泊发电功能价值(元),Y为电站年发电量(kW·h),$P_{电价}$为电价(元/(kW·h))
调节功能	防洪	影子工程法	$V_P=SLC_{库}$	V_p为湖泊防洪功能价值(元),S为湖泊面积,L为湖泊水位绝对变幅P(m),$C_{库}$为单位蓄水量的库容成本(元/m³)
	蓄水	替代工程法	$V_Y=RC_{库}$	V_r为湖泊蓄水功能价值(元),R为湖泊蓄水量(m³),$C_{库}$为这种潜在水量的获得成本(单位蓄水量的库容成本)
	气候调节	成果参照法	$V_C=S\times W_{a库}$	V_c为湖泊气候调节功能价值(元),W_a为单位面积气候调节功能价值,参照已有成果并根据2023年价格指数修正,取值为444.1元/hm²
	旅游景观	成果参照法	$V_t=S\times W_t$	V_t为湖泊旅游景观价值(元),W_t为单位面积旅游景观功能价值,参照已有成果并根据2023年价格指数修正,取值为4 190.2元/hm²
文化功能	存在价值	条件价值法	$V_f=\sum_{i=1}^{n} WTP_i = XF \times WTP_{mid} \times K_i$	V_f为湖泊存在价值(元),WTP_i为单个受访者的支付意愿;N_F为被调查区域的常住人口数;WTP_{mid}为人均支付意愿值;K_i为支付意愿率
	科研教育	成果参照法	$V_S=S\times W_d$	V_s为湖泊科研教育价值(元),W_d为单位面积科研教育功能价值,参照已有成果并根据2023年价格指数修正,取值为430.5元/hm²
支持功能	维持生物多样性	成果参照法	$V_b=S\times W_b$	V_b为湖泊维护生物多样性功能价值(元),W_b为单位面积维护生物多样性功能价值,参照已有成果并根据2023年价格指数修正,取值为2 404.1元/hm²

2.2 数据来源

主要数据来源如下:

(1)水库库容造价参照GB/T 38582—2020《森林生态系统服务功能评估规范》,再根据2023年价格指数修正,取值为9.17元/t;

(2)城市的居民用水价格的取值为3.07元/t;

(3)居民用电价格数据来自于江西省发展和改革委员会,取值为0.6元/kw·h;

3 结果与分析

3.1 各湖泊生态系统服务功能价值类别比较

各湖泊生态系统服务功能价值总量(表3)相差悬殊,这与湖泊本身的库容、面积以及开发程度有一定的关系。各湖泊提供的价值量从大到小排序依次为:将军河水库、莲花台水库、芦林湖、如琴湖、仰天坪水库、大月山湖。其中,将军河水库所提供的生态系统服务功能价值最高,为2 851万元,莲花台水库、芦林湖、如琴湖、仰天坪水库、大月山湖提供的价值量分别为2 371.8万元、1 796万元、1 068万元、502万元、111.1万元。

表3 庐山风景名胜区6个重点湖泊生态系统服务功能价值

Tab. 3 Comparison of ecosystem service value of six key lakes in Lushan Scenic area

湖泊名称	提供功能		调节功能		文化功能		支持功能		合计	
	价值量/万元	比例/%	价值量/万元	比例/%	价值量/万元	比例/%	价值量/万元	比例/%	价值量/万元	比例/%
芦林湖	345.6	19.25	1 444.6	80.43	3.8	0.21	2.0	0.11	1 796	100
如琴湖	0	0	1 063.6	99.58	3.0	0.28	1.5	0.14	1 068	100
莲花台水库	282.4	11.91	2 085.0	87.91	2.8	0.12	1.5	0.06	2 371.8	100
将军河水库	1 562.8	54.81	1 285.9	45.10	1.6	0.06	0.8	0.03	2 851.1	100
仰天坪水库	65.1	12.96	435.6	86.77	0.9	0.17	0.5	0.09	502	100
大月山湖	25	22.70	84.6	76.16	0.8	0.75	0.4	0.40	111.1	100
合计	2 281		6 399.2		13		6.7		8 700	

由表3可知，6个重点湖泊总生态服务价值达8 700万元，呈现显著的功能结构差异。调节功能以6 399.2万元占据主导地位，其次是提供功能2 281万元，文化与支持功能合计不足20万元，整体呈现以调节功能为核心主导，提供功能为次要支撑，支持功能与文化功能共同构成补充性基础的价值梯度。

调节功能中，莲花台水库以2 085万元为调节服务核心载体，芦林湖（1 444.6万元）、将军河水库（1 285.9万元）和如琴湖（1 063.6万元）共同构成第二梯队，仰天坪水库和大月山湖的调节功能价值量较小，反映出这两个水库在防洪、蓄水等调节功能中的贡献相对有限。

提供功能中，将军河水库以1 562.8万元形成单极引领，其价值相当于其他五湖总和的2.2倍，这种差异可能源于将军河水库以发电为主要功能的特殊定位——庐山电站大坝位于将军河水库，为水库下游的九江县县城及两个乡镇5万亩农田提供了丰富的水力和电力资源。

文化服务功能整体薄弱，占总服务功能价值不足1%，原因可能是当前景区湖泊文旅融合开发尚存提升空间，本研究将存在价值从文化功能中分离出来单独评估，导致总体文化功能偏低。

支持功能为湖泊价值量最低、占比最小的功能，但这一功能仍然不容忽视。支持功能评估结果整体薄弱的原因可能与评估的方法有关。因湖泊的生物种类及数量难以获得，本研究采用成果参照法对支持功能进行评估，而成果参照法未考虑物种数量和物种保护级别价值的差异性，导致支持功能价值偏低。

3.2 各湖泊生态系统服务功能单位面积价值量比较

由于生态服务功能价值总量受湖泊水域面积等因素影响，为进一步了解各湖泊生态服务功能的空间差异性，对各湖泊单位面积的价值量进行分析，结果见表4。

表4 庐山风景名胜区6个重点湖泊生态系统服务功能单位面积价值量比较

Tab. 4 Ecosystem service value at per unit area of six key lakes in Lushan Scenic Area 单位：元/(m^2·a)

服务功能	指标体系	芦林湖	如琴湖	莲花台水库	将军河水库	仰天坪水库	大月山湖	均值
提供功能	供水	41.65	0.00	45.55	0.00	34.25	14.03	25.57
	发电	0.00	0.00	0.00	446.51	0.00	0.00	55.62
	小计	41.65	0.00	45.55	446.51	34.25	14.03	81.19
调节功能	防洪	59.50	13.17	211	82.80	135.04	8.44	87.11
	蓄水	114.50	152.98	125.24	284.55	94.17	38.54	140.57
	气候调节	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	小计	174.04	166.19	336.28	367.39	229.25	47.02	227.72
文化功能	旅游景观	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42
	科研教育	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
	小计	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
支持功能	维持生物多样性	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
	小计	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
	总计	216.39	166.89	382.53	814.6	264.2	61.75	309.61

结果表明，庐山风景名胜区6个重点湖泊生态系统服务功能单位面积价值量均值为309.61元/(m^2·a)，其中，提供功能单位面积价值量为81.19元/(m^2·a)，调节功能单位面积价值量为227.72元/(m^2·a)，文化功能单位面积价值量为0.42元/(m^2·a)，支持功能单位面积价值量为0.28元/(m^2·a)。综上，调节功能单位面积价值量最大，而支持功能最小。

对各湖泊按单位面积生态服务功能价值量从大到小进行排序为：将军河水库、莲花台水库、仰天坪水库、芦林湖、如琴湖、大月山湖，这在一定程度上反映了各个湖泊的利用情况。将军河水库作为单位面积生态服务功能价值量第一的湖泊，其发电功能价值与蓄水功能价值远高于其他湖泊，这一评估结果与其以防洪、发电为主，兼顾旅游的定位相符合；莲花台水库、仰天坪水库的单位面积生态服务功能价值量分别位列第二、第三，调节功能单位面积价值量较其他湖泊具有显著优势，主要原因在于其防洪功能价值远高于其他湖泊；芦林湖和如琴湖单位面积价值量分别位列第四、第五，且如琴湖的蓄水功能仅次于将军河水库，其蓄水功能突出的原因在于旅游接待设施的改善，居民生活水平的提高使城镇用水量增加，因此建设如琴湖的供水工程是解决庐山

供水矛盾的必要工程。大月山湖的单位面积价值量远低于其他湖泊,可对其进行适度开发。

3.3 存在价值估算

3.3.1 样本社会经济状况分析

本次问卷调查总计发放180份问卷,剔除无效问卷8份,回收172份。样本的社会经济状况如表5所示。表格中系统呈现了样本群体的社会经济结构特征,涵盖性别、年龄、职业、教育及收入5个维度。数据显示,样本性别分布相对均衡,女性占比(51.74%,89人)略高于男性(48.26%,83人)。年龄结构呈现明显集中趋势,23～45岁群体占比达50.58%(87人),构成主要研究对象;其次是46～60岁群体(30.81%,53人),两者合计占样本总量的81.39%,结果显示中青年群体为主体。

职业分布中,占比较高的国企/事业单位职工及公务员占比最高(29.07%,50人),其次是商业、服务、销售人员(15.12%,26人)。教育程度方面,大专/本科学历者占47.09%(81人),中专/高中占34.31%(59人),两者构成主要教育背景,反映样本整体受教育水平集中于中等偏上层次。

收入结构呈现橄榄型分布,5 001～7 000元区间占比最高(30.23%,52人),3 001～5 000元(19.19%,33人)及3 000元以下(16.86%,29人)分列其后。值得注意的是,12 001～15 000元、15 001～18 000元及18 001元以上占比均低于5%。样本整体数据勾勒出一个以中青年、中等教育程度及中等收入为主体的研究样本画像。

3.3.2 支付意愿频度分析

回收的172位被调查者的最大支付意愿(WTP)统计结果(表6)表明,愿意为庐山风景名胜区永续存在支付费用的有109人,占比63.37%。从支付意愿频数分布表可以看出被调查者的支付意愿主要集中在50元以下,计算得出支付意愿均值为47.53元。

庐山风景名胜区的生态保护与开发问题,不仅与这一地区有关,也危及到九江市的生态安全问题。因此本文以九江市范围内具有支付能力的人口样本水平进行存在价值评估,根据2023年《江西统计年鉴》的数据,九江市年平均社会就业人员为212万人。根据以上CVM抽样调查得到的支付意愿均值及愿意支付的比重估算存在价值为638万元。

3.3.3 影响存在价值的社会因素分析

为了确定社会因素对于支付意愿影响的方向和大小,有必要对支付意愿与各相关因素进行回归分析。以支付意愿为因变量,选择性别、年龄、职业、受教育水平、月收入、满意度等因素为自变量,分析相关因素对支付意愿的影响。以表7的结果进行分析,仅有受教育水平和月收入在0.05水平上通过了T检验,表明这两个因素对支付意愿有显著影响,但受教育程度及收入变量系数小于0,表明受教育程度及收入变量与支付意愿无法同向变动,原因可能是:教育水平高的人群可能具备更强的批判性思维,且对景区环境的评价标准更高,从而削弱支付意愿;部分高收入群体可能存在“搭便车”心理,认为生态系统的维护应通过税收或公共财政解决,而非个人额外支付,这种“搭便车”行为削弱了其支付意愿。此外,样本数量太少及回答不真实也可能是原因之一。而其他因素虽

表5 样本社会经济概况

Tab. 5 The general analysis of statistics survey

项目	标识	频数	百分比/%
性别	A.男	83	48.26
	B.女	89	51.74
年龄	A.16岁以下	6	3.49
	B.17～22岁	17	9.88
	C.23～45岁	87	50.58
	D.46～60岁	53	30.81
	E.60岁以上	9	5.23
职业	A.学生	24	13.95
	B.国企、事业单位职工/公务员	50	29.07
	C.商业、服务、销售人员	26	15.12
	D.私营业主	22	12.79
	E.工人	25	14.53
	F.教师、科研工作人员	12	6.98
	G.自由职业	7	4.07
	H.离退休人员	2	1.16
	I.其他	4	2.33
受教育程度	A.初中及以下	13	7.56
	B.中专/高中	59	34.3
	C.大专/本科	81	47.09
	D.硕士及以上	19	11.05
收入水平	A.3 000元以下	29	16.86
	B.3 001～5 000元	33	19.19
	C.5 001～7 000元	52	30.23
	D.7 001～9 000元	23	13.37
	E.9 001～12 000元	21	12.21
	F.12 001～15 000元	5	2.91
	G.15 001～18 000元	6	3.49
	H.18 001元以上	3	1.74

然不显著，但是并不意味着对支付意愿没有影响，此后的研究应增加样本量，继续深入探寻不同变量对支付意愿的影响。

3.4 生态系统服务功能价值的影响因素分析

综上可知，庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值分布极不均衡。从估算价值的公式和方法来看，影响庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值的主要因素有经济发展水平、资源禀赋（如面积大小）。生态资产能够提供生态服务，而这些生态服务是没有直接市场及明确市价的，其价值的核算通常是通过具有相同、相似功能的造价成本或服务功能变化对经济效益的影响等来实现间接替代估值，故经济发展水平对生态资产的核算有直接影响。而资源禀赋对庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值的影响主要表现在湖泊面积大小对价值估算的影响。在其他因素不变的情况下，湖泊面积越大，在防洪蓄水等方面的作用更强，生态价值也就更高。

表6 WTP频数分析表

Tab. 6 The distribution frequency of WTP

支付金额/元	频数	百分比/%
5	15	13.76
10	12	11.01
20	12	11.01
30	9	8.26
50	9	8.26
70	16	14.68
100	15	13.76
150	10	9.17
200	5	4.59
300	5	4.59
400	1	0.92
其他	0	0
合计	172	100

表7 影响存在价值的社会因素分析

Tab. 7 The analysis of social factors influencing the value of existence

变量	系数	*T*值	显著水平
性别	0.007	0.086	0.931
年龄	−0.040	−0.828	0.409
职业	−0.011	−0.542	0.589
受教育水平	−0.099	2.054	0.042*
月收入	−0.058	2.349	0.020*
满意程度	−0.025	0.393	0.695
旅游次数	−0.010	−0.242	0.809
了解程度	−0.024	−0.713	0.477
了解途径	−0.015	−0.761	0.448
R^2		0.105	
调整R^2		0.054	
F		*F*(9,161)=2.088,*P*=0.033	
D-W值		0.549	

4 结论与讨论

本研究基于千年生态系统评估及现有研究对生态系统服务功能进行梳理和归纳，在此基础之上对庐山风景名胜区6个重点湖泊的9项生态系统子服务功能价值量进行估算，各子服务功能价值量从大到小排序依次为：蓄水、防洪、发电、供水、存在价值、旅游景观、维持生物多样性、气候调节、科研教育。研究结果表明，这6个重点湖泊的生态系统服务功能总价值约为9 330万元，其中，直接功能价值约为2 294万元，间接功能价值约为6 406万元，湖泊间接价值约是直接价值的3倍，差距较大。以CVM法采用问卷调查的方式估算的非使用价值为约为638万元，且受教育水平和月收入对存在价值的支付意愿有显著影响；各湖泊的价值量从大到小排序依次为：将军河水库、莲花台水库、芦林湖、如琴湖、仰天坪水库、大月山湖，各湖泊主要服务功能与其实际的功能定位基本相符。此外，从估算价值的公式和方法来看，影响庐山风景名胜区山地湖泊生态资产价值的主要因素有经济发展水平、资源禀赋（如面积大小）。

在对庐山风景名胜区山地湖泊的生态系统服务功能进行估算时，由于研究数据与资料的局限性只评估了该地区6个重点湖泊的9项生态系统服务功能，并未考虑航运、养殖等次要生态系统服务功能及其他难以量化的生态系统服务功能，因此本研究得到的生态系统服务功能价值小于实际价值，尚不能全面反映庐山风景名胜区湖泊的特点，有待进一步完善。

参考文献：

[1] PETERS C M, GENTRY A H, MENDELSOHN R O. Valuation of an Amazonian rainforest[J]. Nature, 1989, 339: 655-656.

[2] SERAFY S E. Pricing the invaluable: the value of the world′s ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998, 25 (1): 25-27.

[3] DAILY G C, SÖDERQVIST T, ANIYAR S, et al. The value of nature and the nature of value[J]. Science, 2000, 289 （下转第86页）

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.012

信阳市18种常见园林树种叶片滞尘效应研究

单燕祥[1,2],冯万富[1,2],柳 勇[1,2],袁 浩[3]
(1.信阳市林业科学研究所,河南 信阳 464031;2.河南鸡公山森林生态系统国家定位观测研究站,河南 信阳 464031;3.信阳鼎信森林工业集团有限公司,河南 信阳 464000)

摘 要:【目的】探讨信阳市常见城市园林树种的滞尘效应,筛选出滞尘功能强的树种。【方法】在信阳市中心城区选取18种不同生活型(常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木和落叶灌木)的常见园林树种,于雨后1周、2周和3周分别对其叶片的单位面积滞尘量和滞尘速率进行测定分析。【结果】(1)随着时间推移,各树种叶片单位面积累计滞尘量均呈逐步增长趋势。(2)同一生活型不同树种之间饱和滞尘量和滞尘速率均存在显著差异($P<0.05$)。(3)结合同一生活型不同树种饱和滞尘量、滞尘速率分别进行聚类分析,筛选出综合滞尘效应最强的树种5种(雪松、枇杷、广玉兰、栾树和大叶黄杨);较强的7种(桂花、法国梧桐、红叶李、红叶石楠、海桐、红花檵木和紫薇)。【结论】在选择城市园林树种时,应当按照适地适树、多样配置、树种均衡的原则。在车流量大、扬尘污染相对严重的区域,可优先考虑树种的滞尘效应因素。

关键词:园林树种;饱和滞尘量;滞尘速率;聚类分析;信阳市
中图分类号:S731.2:X829 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0067-06

Research on dust-retention effects of 18 common landscape tree leaves in Xinyang City

SHAN Yanxiang[1,2], FENG Wanfu[1,2], LIU Yong[1,2], YUAN Hao[3]
(1.The Forest Science Research Institute of Xinyang, Xinyang He′nan 464031, China;2. Henan Jigongshan Forest Ecosystem National Observation and Research Station, Xinyang He′nan 464031, China;3. Xinyang Dingxin Forest Industry Group Co., Ltd, Xinyang He′nan 464000, China)

Abstract:【Objective】To explore the dust-retention effects of the main urban garden tree species in Xinyang City and screen out tree species with strong dust-retention functions.【Method】18 types of landscaping tree species with different life forms (evergreen trees, deciduous trees, evergreen shrubs and deciduous shrubs) were selected in the central urban area. The dust-retention amount per unit area of their leaves and the dust-retention rate were measured and analyzed respectively one week, two weeks and three weeks after the rain.【Result】(1) The cumulative dust-retention amount per unit area of the leaves of each tree species gradually increased over time. (2) There were significant differences ($P<0.05$) in the saturated dust-retention amount and the dust-retention rate among different tree species of the same life form. (3) Combined with the saturated dust-retention amount and the dust-retention rate of different tree species of the same life form, cluster analysis was carried out respectively, and 5 tree species with the strongest comprehensive dust-retention effect (*Cedrus deodara*, *Eriobotrya japonica*, *Magnolia grandiflora*, *Koelreuteria paniculata* and *Buxus megistophylla*) and 7 tree species with relatively strong effect (*Osmanthus fragrans*, *Platanus orientalis*, *Prunus cerasifera*, *Photinia serratiporum*, *Pittosporum tobira*, *Loropetalum chinense* and *Lagerstroemia indica*) were screened out.【Conclusion】In the selection of urban garden tree species, we should follow the principles of suitable trees, diverse allocation and balanced tree species. In the area of heavy traffic and serious dust pollution, the dust retention effect of tree species can be given priority.

Key words: garden tree species; saturated dust retention amount; dust-retention rate; cluster analysis; Xinyang City

随着工业化和城市化的迅猛发展,大气尘埃污染已成为城市严重的生态环境问题[1]。园林植物作为城市

收稿日期:2024-09-13;2024-12-15修回
基金项目:河南省中原学者工作站资助项目“森林对信阳市环境空气的净化功能研究”(234400510026);信阳生态研究院开放基金面上项目“森林对空气质量的调控功能研究--以信阳市为例”(2023XYMS09)
第一作者:单燕祥,男,工程师,硕士,主要从事森林生态方向研究。E-mail: 273622831@qq.com
引文格式:单燕祥,冯万富,柳勇,等.信阳市18种常见园林树种叶片滞尘效应研究[J].南方林业科学,2025,53(1):67-72.
SHAN YANXIANG, FENG W F, LIU Y, et al. Research on dust-retention effects of 18 common landscape tree leaves in Xinyang City[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1):67-72.

生态系统的重要组成部分，是改善城市环境的重要载体，具有调节局域小气候、抑菌等功能，对阻滞、吸附粉尘污染有显著作用[2]。

国内外有关城市绿化树种滞尘效应的研究，主要集中在不同树种滞尘机制[3-6]、滞尘功能的时空变化[7-8]等方面。不同城市由于其所处气候带、地理生态区位的差异，适合当地栽植的滞尘效应强的树种不尽相同。为探讨信阳城区主要园林绿化树种的滞尘效应，本试验通过在中心城区主干道选取18种不同生活型的园林树种（常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木和落叶灌木），开展林木叶片滞尘效应研究，旨在筛选出滞尘功能强的树种，以期为信阳城市环境空气污染治理、森林城市建设以及森林植被生态效益评估等提供参考。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

信阳市处于河南省南部，淮河上游，鄂、豫、皖三省交界处，地理坐标为30°23′～32°27′ N，113°45′～115°55′ E，属北亚热带季风湿润气候向暖温带过渡地带，四季分明，光热水资源丰富，年均温度15.2℃，年均降水量1 200 mm，年均相对湿度76%，适生的园林绿化树种丰富。

1.2 测试树种

在信阳市中心城区新七大道、107国道市区段和平中大街的交通主干道路肩绿化带，选取4种生活型（常绿乔木、落叶乔木、常绿灌木和落叶灌木）18种主要行道树的叶片进行测试，选择标准为植株生长健壮、长势良好，叶片完整、无病虫害（表1）。

表1 测试树种的基本情况

Tab. 1 Basic status of tested tree species

植物生活型	树种名称	树高/ m	叶片形态特征
常绿乔木	雪松 *Cedrus deodara*	8.0～10.0	叶针形簇生，表面密被绒毛
	枇杷 *Eriobotrya japonica*	4.0～5.0	叶革质，表面有褶皱、密生绒毛
	广玉兰 *Magnolia grandiflora*	6.0～7.0	叶革质，表面有少量绒毛
	桂花 *Osmanthus fragrans*	4.0～5.0	叶革质、表面粗糙、无毛
	大叶女贞 *Ligustrum lucidum*	7.0～10.0	叶纸质，表面无毛
	香樟 *Cinnamomum camphora*	6.0～8.0	叶革质，表面无毛
落叶乔木	栾树 *Koelreuteria paniculata*	5.0～8.0	叶纸质、表面粗糙、分泌油脂
	红叶李 *Prunus cerasifera*	3.0～4.0	叶革质，表面粗糙
	法国梧桐 *Platanus orientalis*	7.0～8.0	叶纸质，表面有绒毛
	银杏 *Ginkgo biloba*	6.0～9.0	叶纸质，表面无毛
常绿灌木	大叶黄杨 *Buxus megistophylla*	0.6～1.0	叶革质、表面角质层厚
	红花檵木 *Loropetalum chinense*	0.7～1.0	叶革质、表面粗糙、有纤毛
	红叶石楠 *Photinia serratiporum*	1.2～1.5	叶革质、表面角质层厚
	海桐 *Pittosporum tobira*	1.0～1.5	叶革质、表面角质层厚
	小叶女贞 *Ligustrum quihoui*	0.8～1.2	叶革质、表面无毛
落叶灌木	月季 *Rosa chinensis*	0.8～1.4	叶革质，表面无毛
	紫薇 *Lagerstroemia indica*	2.0～3.0	叶革质，表面有褶皱
	红枫 *Acer palmatum*	2.0～3.0	叶革质，表面无毛

1.3 采样方法

树种的滞尘效应是根据一定时间内植物单位叶面积的灰尘滞留量来衡量的[9]。有学者研究认为叶片滞尘达到饱和状态所需时间为20 d左右[10-12]；单次降水量大于15 mm，即可冲洗干净植物叶片上所滞留的颗粒物或粉尘[13-14]。本试验引用前人研究结果，于2023年5－10月，选择单次降水量大于15 mm的雨后1周、2周和3周分别采集不同树种叶片样品，共重复取样3次。每次取样时，同一树种选择3～5棵健康样株，从树冠外围东南西北4个方向，分别于树冠上、中、下3个部位随机均匀地采集新鲜完整叶片30～50枚（针叶60～100 g），分装于自封袋内备用。采集和封存过程中尽量避免抖动叶片，以免叶片上所附着的颗粒物脱落。

1.4 样品处理与滞尘量测定

操作时将采集的叶片用镊子夹入烧杯中,先用适量蒸馏水浸泡2 h,接着用软毛刷将叶片上的附着物轻轻刷洗干净,然后用镊子将叶片夹出,滤液用滤纸过滤,烘干滤纸。叶片单位面积滞尘量(C,mg/cm^2)的计算公式如下:

$$C=(a_1-a_2)/S \quad (1)$$

式中,a_1为滤纸质量(mg),a_2为滤纸和叶片表面过滤物质量(mg),S为样品总叶面积(cm^2)。质量均采用万分之一电子天平称量,叶面积采用国产万深LA-S叶面积分析系统测定。

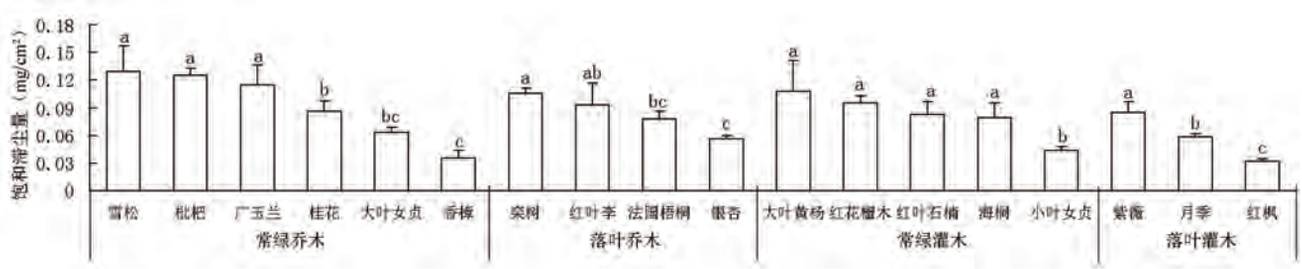
1.5 数据处理

数据统计分析及图表制作采用SPSS 20.0和Microsoft Excel 2007软件完成。采用单因素方差分析比较不同树种间叶片滞尘量的差异性。

2 结果与分析

2.1 同一生活型不同树种间叶片饱和滞尘量比较

测试的18种树种单位叶面积饱和滞尘量处于0.032～0.130 mg/cm^2,平均值为0.082 mg/cm^2(图1),不同生活型树种之间单位叶面积饱和滞尘量存在显著差异(P<0.05)。



图中不同小写字母表示在同一生活型间树种的叶片饱和滞尘量差异显著(P<0.05)。

Different lowercase letters in the figure indicated that the saturation dust retention of leaves has significant difference between tree species in the same life type (P<0.05).

图1 不同树种叶片单位面积饱和滞尘量

Fig. 1 The saturated dust-retention amount per unit area of leaves of different tree species

6种常绿乔木单位叶面积饱和滞尘量为0.036～0.130 mg/cm^2,平均值为0.093 mg/cm^2;雪松(0.130 mg/cm^2)、枇杷(0.125 mg/cm^2)和广玉兰(0.115 mg/cm^2)的单位叶面积饱和滞尘量最大,3个树种间差异不显著;桂花(0.086 mg/cm^2)和大叶女贞(0.063 mg/cm^2)单位叶面积饱和滞尘量居中,饱和滞尘能力显著低于雪松、枇杷和广玉兰3个树种(P<0.05);香樟的单位叶面积饱和滞尘能力最弱。最大的单位叶面积饱和滞尘量雪松是最小的香樟的3.61倍。

4种落叶乔木单位叶面积饱和滞尘量为0.056～0.105 mg/cm^2,平均值为0.083 mg/cm^2。栾树、红叶李(0.093 mg/cm^2)单位叶面积饱和滞尘能力最强;法国梧桐(0.078 mg/cm^2)居中;银杏单位叶面积饱和滞尘能力较弱,与其它栾树、红叶李2个树种存在显著差异(P<0.05),与法国梧桐未达到显著水平(P>0.05)。单位叶面积饱和滞尘量最大的栾树(0.105 mg/cm^2)是最小的银杏(0.056 mg/cm^2)的1.88倍。

5种常绿灌木单位叶面积饱和滞尘量为0.043～0.108 mg/cm^2,均值为0.081 mg/cm^2。大叶黄杨、红花檵木(0.095 mg/cm^2)、红叶石楠(0.082 mg/cm^2)和海桐(0.079 mg/cm^2)4个树种饱和滞尘效应较强,4者之间差异未达到显著水平(P>0.05),小叶女贞滞尘效应较弱,与其它4种常绿灌木树种之间均存在着显著差异(P<0.05)。单位叶面积饱和滞尘量最大的大叶黄杨(0.108 mg/cm^2)是最小的小叶女贞(0.043 mg/cm^2)的2.51倍。

3种落叶灌木单位叶面积饱和滞尘量为0.032～0.085 mg/cm^2,均值为0.059 mg/cm^2。紫薇的饱和滞尘效应最强,月季(0.059 mg/cm^2)次之,红枫较差,3树种之间饱和滞尘量均存在显著差异(P<0.05)。单位叶面积饱和滞尘量最大的紫薇(0.085 mg/cm^2)是最小的红枫(0.032 mg/cm^2)的2.66倍。

树种叶片滞尘量统计学差异检验,可做为不同树种叶片滞尘能力分类的依据。树种叶片滞尘效应主要由

树木生长特性、生理特征(叶片大小、形状、叶面质地等)、树叶表面特性(褶皱、粗糙、绒毛、油脂、湿润性等)、枝干分枝角度、树冠和总叶面积等决定[15-16]。

2.2 同一生活型不同树种间叶片滞尘速率比较

由于不同树种生态学特性不同,叶片滞尘速率快慢不同,达到饱和滞尘量所需时间存在差异。为探究滞尘效应的时间响应机制,对参试的18种树种叶片单周累计滞尘量占饱和滞尘量的比率进行比较分析(图2)。

由图2可见,雨后第1周是树木滞尘累积增量贡献最大时段,树种叶片整体滞尘速率$V_{(第1周)}$处于较快水平,滞尘速率最高。雨后第1周18种不同树种叶片单位面积累计滞尘量占饱和滞尘量的比率均超过50%,其中常绿灌木海桐的比率最高,超过80%;常绿乔木桂花、香樟次之,占比处于70%～80%;常绿乔木大叶女贞、枇杷、广玉兰,落叶乔木红叶李、法国梧桐、栾树,常绿灌木红叶石楠、红花檵木、大叶黄杨和落叶灌木紫薇、月季等11种树种滞尘速率中等,占比为60%～70%;其它4种树种,包括常绿乔木雪松,落叶乔木银杏,常绿灌木小叶女贞和落叶灌木红枫滞尘速率较慢,占比为50%～60%。

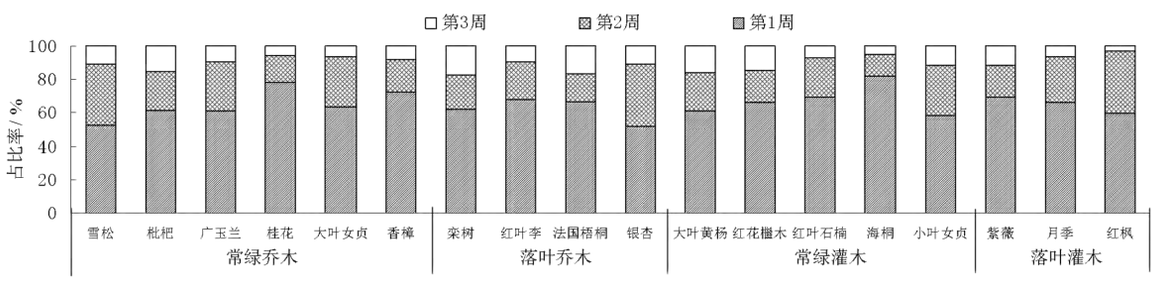


图2 不同树种单周累计滞尘量占饱和滞尘量的比率

Fig. 2 The ratio of cumulative dust-retention amount per week of different tree species to saturated dust-retention amount

雨后第2周树种叶片单位面积累计滞尘量继续增加,不同树种两周累计滞尘量占饱和滞尘量的比例均超过80%,其中占比超过90%的有常绿乔木桂花、大叶女贞、香樟、广玉兰,落叶乔木红叶李,常绿灌木海桐、红叶石楠和落叶灌木红枫、月季等9种树种;其它9种树种占比均处于80%～90%。雨后第2周各树种累计滞尘量增量较第1周有所减少,滞尘速率$V_{(第2周)}$趋于平缓阶段,滞尘时间效率一般。

雨后第3周各树种叶片滞尘总量均达到相对饱和状态,不同树种叶片滞尘增量均显著减少,滞尘速率$V_{(第3周)}$处于最低水平,滞尘时间效率最差。

2.3 不同树种间叶片滞尘效应聚类分析

基于参试树种叶片滞尘速率和饱和滞尘量,综合4个指标($V_{(第1周)}$、$V_{(第2周)}$、$V_{(第3周)}$和饱和滞尘量),按3个类别(Ⅰ类最强、Ⅱ类较强和Ⅲ类一般)对树种叶片滞尘效应进行聚类分析(图3)。

通过聚类分析结果表明,常绿乔木雪松、枇杷、广玉兰,落叶乔木栾树,常绿灌木大叶黄杨处于I类,综合滞尘效应最强,在筛选城市治污减霾树种时应优先发展;常绿乔木桂花,落叶乔木法国梧桐、红叶李,常绿灌木红叶石楠、海桐、红花檵木和落叶灌木紫薇处于II类,综合滞尘效应较强,在城市园林景观营造时可适当发展;常绿乔木大叶女贞、香樟,落叶乔木银杏,常绿灌木小叶女贞和落叶灌木月季和红枫处于III类,综合滞尘效应较差,应适当限制发展。

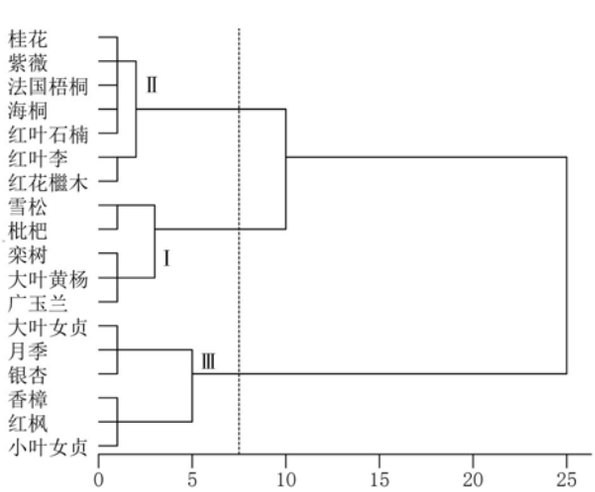


图3 不同树种间叶片滞尘效应聚类分析

Fig. 3 Cluster analysis of leaf dust-retention effect based on different tree species

3 结论与讨论

3.1 讨论

3.1.1 叶片形态特征对滞尘能力的影响

树种叶片具有凹凸不平的表面形态、密被的细毛、紧凑密集的冠形、上倾的角度、蜡质含量高等因素

均有利于提高叶片滞尘能力。多年来,大量学者研究了树种叶片形态特征对其滞尘效应的影响。王蕾等[17]的研究表明雪松叶片多簇生,密被绒毛,能分泌油脂;王兵等[18]认为栾树叶片表面结构粗糙、富含油脂;刘宇等[19]的研究表明枇杷叶片具有皱褶特征;禹海群等[20]研究发现紫薇叶片具有线形纹饰、沟状结构;林星宇等[21]研究表明大叶黄杨叶片具有较厚的蜡质层;李海梅等[22]研究显示红花檵木叶片表面密布纤毛。以上几种树种独有的叶片生理特征致使其具有较强的滞尘效应,在本研究中得到进一步印证。

3.1.2 园林树种滞尘效应综合评价

18种参试树种叶片累计滞尘量贡献率在雨后第1周最大均超过50%,这与韩丽媛[23]的研究结果是一致的;雨后2周,叶片累计滞尘量贡献率均超过80%,其中广玉兰、桂花、大叶女贞、香樟、红叶李、红枫、红叶石楠、月季和海桐等9种树种贡献率均达到90%以上。树种叶片滞尘是一个复杂的过程,在滞尘未达到饱和滞尘量的初期阶段,滞尘速率相对较快的树种,其叶片滞尘量累积增幅较大,在达到饱和滞尘量一半以后,滞尘量增幅逐渐下降,直到滞尘量达到饱和状态。在外部复杂环境作用下(风、雨雪、园林洒水、车流扰动等),可造成园林植物吸附的灰尘和颗粒物脱落,植物叶片重新恢复滞尘功能,形成叶片滞尘叠加效应。树种叶片滞尘是个循环往复的过程,选择调查的时间尺度不同,叶片滞尘效应会存在差异。在开展相关研究时,引入叶片滞尘速率,能够体现出滞尘效应的时间效率,较为准确客观的评价不同树种的滞尘功能。随着城市化进程的加快,如何利用有限的城市绿地,提升绿植总体滞尘效应,还需要深入开展不同树种空间滞尘效应综合评价,为市政管理部门在筛选不同生活型园林树种和配置模式时提供参考方案。

3.1.3 不同生活型滞尘树种在城市绿化中的运用

城市粉尘污染受到污染尘源和气象条件等多种因素影响,园林植物治污减霾的机理复杂。在城市绿化景观规划上,选择乔-灌、乔-草或乔-灌-草等不同生活型树种复合配置[24],在空间上既能营造出错落有致的多层次景观格局,又能发挥植物立体治污减霾功能。在年生长周期上,落叶树种的滞尘能力具有明显的季节差异,春夏季植物生长旺期,枝叶繁茂,能够较好地发挥减尘、阻尘、滞尘、降尘效应,秋冬季落叶后几乎丧失滞尘功能[25];常绿树种全年着叶,秋冬季节滞尘功能相较于落叶树种优势明显,能够继续发挥治污减霾作用。在城市绿化中,如果全部运用常绿树种,会出现绿色叠加,景观单一的问题。合理选用适量滞尘能力强的落叶树种,既发挥树种的滞尘效应,又体现丰富多彩、层次多样的自然景观属性,达到生态效益与社会效益的有机融合。

3.2 结论

选择城市园林树种时,应当按照适地适树、多样配置、树种均衡的原则。在车流量大、扬尘污染相对严重的区域,可优先考虑树种的滞尘效应因素。从园林树种滞尘功能角度考虑,建议优先选择滞尘能力最强的常绿树种(雪松、枇杷、广玉兰、栾树和大叶黄杨),适当发展滞尘能力较强的常绿树种(桂花、法国梧桐、红叶李、红叶石楠、海桐、红花檵木和紫薇),以尽可能多地发挥城市园林绿化树种吸收滞纳粉尘污染、改善环境空气质量功能。在需要配置季相变化明显的区域,建议优先考虑滞尘能力最强的栾树,其次选择滞尘能力较强的法国梧桐、紫薇、红叶李,兼顾滞尘效果和景观效果,充分发挥园林树种的生态价值。

参考文献:

[1] 徐祥德,汤绪.城市化环境气象学引论[M].北京:气象出版社,2002:243-244.
[2] 杨貌,张志强,陈立欣,等.春季城区道路不同绿地配置模式对大气颗粒物的削减作用[J].生态学报,2016,36(7):2076-2083.
[3] 高金晖.北京市主要植物种滞尘影响机制及其效果研究[D].北京:北京林业大学,2007.
[4] 王会霞,石辉,李秧秧.城市绿化植物叶片表面特征对滞尘能力的影响[J].应用生态学报,2010,21(12):3077-3082.
[5] 俞学如.南京市主要绿化树种叶面滞尘特征及其与叶面结构的关系[D].南京:南京林业大学,2008.
[6] 柴一新,祝宁,韩焕金.城市绿化树种的滞尘效应——以哈尔滨市为例[J].应用生态学报,2002,13(9):1121-1126.
[7] 王月菡.基于生态功能的城市森林绿地规划控制性指标研究[D].南京:南京林业大学,2004.
[8] 张莉.南京常见道路绿化树种的环境效益研究[D].南京:南京林业大学,2007.
[9] 张新献,古润泽,陈自新,等.北京城市居住区绿地的滞尘效益[J].北京林业大学学报,1997,19(4):12-17.
[10] 邱媛,管东生,宋巍巍.惠州城市植被的滞尘效应[J].生态学报,2008,28(6):2455-2462.
[11] 杜双洋,金研铭,庄波.长春地区常用绿化树种滞尘能力研究[J].安徽农业科学,2010,38(14):7233-7235,7237.
[12] 张家洋,周君丽,任敏,等.20种城市道路绿化树木的滞尘能力比较[J].西北师范大学学报(自然科学版)2013,49(5):113-120.

[13] 王赞红,李纪标.城市街道常绿灌木植物叶片滞尘能力及滞尘颗粒物形态[J].生态环境,2006,15(2):327-330.
[14] 杨波,赵红艳,庄园园,等.吉林市十种宿根花卉滞尘能力比较[J].湖北农业科学,2014,53(23):5761-5764.
[15] 吴中能,于一苏,边艳,等.合肥主要绿化树种滞尘效应研究初报[J].安徽农业科学,2001,29(6):780-783.
[16] 孙应都,陈奇伯,李艳梅,等.昆明市6个绿化树种叶表微结构与滞尘能力的关系研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2019,39(3):78-85.
[17] 王蕾,高尚玉,刘连友.北京市11种园林植物滞留大气颗粒物能力研究[J].应用生态学报,2006,17(4):597-601.
[18] 王兵,王晓燕,牛香,等.北京市常见落叶树种叶片滞纳空气颗粒物功能[J].环境科学,2015,36(6):2005-2009.
[19] 刘宇,张楠,王晓立,等.冬季苏北8种常绿乔木吸滞颗粒物能力与叶表微结构关系[J].西北林学院学报,2021,36(3):80-87,127.
[20] 禹海群,李楠,林平义,等.深圳市常见园林植物滞尘效应初步研究[J].江苏林业科技,2012,39(2):1-5.
[21] 林星宇,李海梅,李彦华,等.青岛市六种常绿灌木的滞尘效益分析[J].湖北农业科学,2018,57(5):74-76,99.
[22] 李海梅,党宁,禹靓倩,等.5个园林树种滞尘能力与叶表形态及颗粒物粒径的关系[J].林业科学研究,2021,34(4):84-94.
[23] 韩丽媛.资源型城市主要绿化树种叶片滞尘能力和规律研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2008.
[24] 张建设,冯万富,史晓海,等.不同绿地结构对$PM_{2.5}$和PM_{10}的消减作用[J].江苏农业科学, 2019,47(21):302-304.
[25] 胡舒,肖昕,贾含帅,等.徐州市主要落叶绿化树种滞尘能力比较与分析[J].中国农学通报,2012,28(16):95-98.

(上接第42页)

[4] ORTIZ-QUEZADA A G, LEONARDO L, CISNEROS-ZEVALLOS L. Pecans: antioxidants in pecannut cultivars[*Carya illinoinensis* (Wangenh.) K. Koch][J]. Nuts and Seeds in Health and Disease Prevention, 2011, 104: 881-889.
[5] 李永荣,吴文龙,刘永芝.薄壳山核桃种质资源的开发利用[J].安徽农业科学,2009,37(27):13306-13308,13316.
[6] 黄国帅.薄壳山核桃品种差异性比较研究[D].杭州:浙江农林大学,2019.
[7] 彭方仁.美国薄壳山核桃产业发展现状及对我国的启示[J].林业科技开发,2014,28(6):1-5.
[8] 吕飞.滁州市薄壳山核桃产业发展现状及对策[J].现代农业科技,2020(20):78-79,82.
[9] 邓立宝,潘鸿,马涛,等.6个薄壳山核桃品种在广西河池市的种植表现及品质特性[J].经济林研究,2022,40(2):241-248.
[10] 黄桂丹.^{60}Co-γ射线辐射育种研究进展[J].林业与环境科学,2016,32(2):107-111.
[11] 曹亚萍,武银玉,刘博,等.小麦异源易位系诱致方法及应用研究进展[J].植物遗传资源学报,2022,23(4):943-953.
[12] 何平,李林光,王海波,等.辐照处理对苹果嫩枝变异效应研究[J].核农学报,2016,30(7):1249-1254.
[13] 常格.^{60}Co-γ辐射及化学诱变剂对杜梨诱变效应研究[D].保定:河北农业大学,2021.
[14] 刘平平,叶开玉,龚弘娟,等.猕猴桃^{60}Co-γ射线辐射诱变植株变异的ISSR分子标记研究[J].西南农业学报,2016,29(10):2457-2462.
[15] 漆巨容,刘正富,黄柳根,等.早熟甜橙新品种—渝早橙的选育[J].果树学报,2011,28(4):731-732,548.
[16] YUE W Q, ZHANG H, LIU J L, et al. Breeding Report of a New Red Pear Cultivar 'Xianghongli' [J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(11): 2569-2571, 2581.
[17] 周维,韦绍龙,韦莉萍,等.抗枯萎病中秆香蕉新品种桂蕉8号的选育[J].果树学报,2023,40(11):2494-2499.
[18] 李准,伊华林,吴巨勋.^{60}Co-γ辐射诱变在果树育种中的应用与展望[J].中国果树,2022,5:21-27.
[19] 柏军华,王克如,初振东,等.叶面积测定方法的比较研究[J].石河子大学学报(自然科学版),2005,23(2):216-218.
[20] 孔广红,倪书邦,贺熙勇,等.^{60}Co-γ射线辐照澳洲坚果种子后的苗期辐射效应[J].核农学报,2018,32(3):417-423.
[21] 朋冬琴,郭欣慰,栗孟飞,等.^{60}Co-γ辐射对北柴胡的诱变效应研究[J/OL].甘肃农业大学学报,2024:1-8[2024-08-20].https://link.cnki.net/urlid/62.1055.S.20240428.1441.052
[22] 杜若甫.作物辐射遗传与育种[M].北京:科学出版社,1981:31-34.
[23] 林文欢,詹潮安,郑道序,等.^{60}Co-γ射线辐照对余甘子穗条嫁接成活的影响[J].中国南方果树,2016,45(3):132-134.
[24] 柳觐,倪书邦,孔广红,等.^{60}Co-γ射线对不同品种澳洲坚果萌动种子的诱变效应[J].西南农业学报,2019,32(5):1149-1154.
[25] 石新杰,吴潇,陈杨杨,等.^{60}Co-γ射线辐射对翠冠和玉露香梨枝条的生物损伤效应[J].核农学报,2019,33(11):2095-2102.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.013

基于遥感技术的森林火灾灾后评估研究进展

郝 鑫[1],王邵军[2*],陈语奇[3]
(1.西南林业大学 水土保持学院,云南 昆明 650224;2.西南林业大学 生态与环境学院/云南省高原湿地保护修复与生态服务重点实验室,云南 昆明 650224;3.江西省林业科学院,江西 南昌 330013)

摘 要:森林火灾是全球性最主要的生态灾害之一,严重影响森林生物资源及生态系统服务功能。遥感技术凭借其大范围、快速、无损评估的优势,在森林火灾灾后评估中发挥着不可替代的作用。通过文献阅读和梳理,系统综述了遥感技术在森林火灾灾后评估中的应用现状、主要方法及发展趋势。重点分析了光学遥感、雷达遥感、激光雷达等遥感技术在火烧范围界定、火烧等级识别、火烧强度评估、植被恢复监测等方面的应用;精准分析当前在数据获取时效性、评估方法适用性和验证体系标准化等方面面临的挑战。提出了未来灾后评估研究应重点加强多平台协同观测能力建设、发展自适应评估模型、构建智能化评估平台和深化生态系统功能评估。

关键词:森林火灾;灾后评估;遥感技术;火烧等级;植被恢复监测;研究进展
中图分类号:S762:S771.8 **文献标志码**:A **文章编号**:2095-9818(2025)01-0073-07

Research progress on post-disaster assessment of forest fire based on remote sensing technology

HAO Xin[1], WANG Shaojun[2*], CHEN Yuqi[3]
(1. College of Soil and Water Conservation, Southwest Forest University, Kunming Yunnan 650224, China; 2. College of Ecology and Environment, Southwest Forest University/Yunnan Key Laboratory of Plateau Wetland Conservation, Restoration and Ecological Services, Kunming Yunnan 650224, China; 3. Jiangxi Academy of Foresrty, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: As one of the most important global ecological disaster, forest fire can seriously affect biological resources and ecosystem services. Remote sensing technology played an irreplaceable role in post-disaster assessment of forest fire due to its wide range, fast and non-destructive assessment. Through reading and combing the literature, it was systematically summarized the application status, main methods and development trend of remote sensing technology in forest fire post-disaster assessment. It was focused on the analysis of application of remote sensing technologies, such as optical remote sensing, radar remote sensing and LiDAR in the fire range definition, fire grade identification, fire intensity assessment, and vegetation restoration monitoring. It was also accurately analyzed the current challenges in terms of timeliness of data acquisition, applicability of assessment methods, and standardization of validation systems. It was proposed that the future research would focus on strengthening multi-platform collaborative observation capacity building, developing adaptive assessment model, building intelligent assessment platform as well as deepening ecosystem function assessment.

Key words: forest fire; post-disaster assessment; remote sensing technology; fire rating; vegetation restoration monitoring; research progress

森林火灾是全球自然灾害中最具破坏性的灾害之一,据联合国环境规划署统计,全球每年因森林火灾造成的直接经济损失高达数百亿美元[1]。森林火灾不仅造成大量森林资源损失,还引发了生物多样性减少、土壤退化、温室气体排放等一系列生态环境问题[2]。随着全球气候变化加剧和人类活动的持续性

收稿日期:2024-12-04;2025-01-22修回
基金项目:国家自然科学基金资助项目(32271722、32060281)
第一作者:郝鑫,女,硕士在读,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail: 13211918551@163.com
***通信作者**:王邵军,男,教授,博士,研究方向为森林生态学。E-mail: shaojunwang2009@163.com
引文格式:郝鑫,王邵军,陈语奇.基于遥感技术的森林火灾灾后评估研究进展[J].南方林业科学,2025,53(1):73-79.
HAO X, WANG S J, CHEN Y Q. Research progress on post disaster assessment of forest fire based on remote sensing technology[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 73-79.

影响，全球森林火灾发生频率呈现显著上升趋势，火灾强度也不断增加[3-4]。近年来，澳大利亚、美国加州、西伯利亚等地区频繁发生大规模森林火灾，造成了巨大生态和经济损失。我国大兴安岭[5]、西南地区[6]等重点林区也时有重大森林火灾发生。如何对森林火灾范围界定、等级划分、强度评估、经济损失以及植被恢复进行快速有效评估，对于指导灾后生态修复、制定森林管理决策、预防次生灾害具有重要的现实意义[7]。

传统森林火灾灾后评估主要依赖地面调查，这种方法不仅耗时耗力，而且在地形复杂、交通不便的山区难以全面开展。与传统调查方法相比，遥感技术具有覆盖范围广、获取及时、重访周期短、成本相对较低等显著优势[8-9]。遥感技术通过不同波段的影像数据、结合多源信息融合，能够在较短时间内获取火灾受灾区域的空间分布、受灾程度等关键信息，为灾后应急响应和生态恢复提供重要的决策依据[10]。国际上对森林火灾遥感评估技术的研究始于20世纪70年代。随着遥感技术的不断进步，评估方法经历了从简单的目视解译到定量遥感评估的发展过程[11]。目前，基于光学遥感、雷达遥感、激光雷达等多源遥感数据的评估技术体系已经形成，并在全球范围内得到广泛应用。我国在森林火灾遥感评估方面的研究起步相对较晚，但发展迅速。20世纪80年代，我国首次将遥感技术应用于森林火灾的研究[12]，随后在“3S”技术（遥感、地理信息系统、全球定位系统）的支持下，已形成了较为完整的技术体系[13]。然而，在评估精度、自动化程度、生态影响评估等方面还存在一定差距，需要进一步加强研究和技术创新。本文通过从数据源特点、评估方法、问题与挑战等方面综述森林火灾灾后遥感评估技术研究进展，以期通过改进并整合遥感技术分析方法，提升森林火灾灾后损失及恢复重建监测和评估的水平与效率。

1 遥感技术在森林火灾灾后评估的数据源特点

森林火灾灾后评估中常用的遥感数据源可分为光学遥感、雷达遥感和激光雷达3大类（表1）。光学遥感数据是最主要的数据源，其工作原理是探测地物对太阳辐射的反射和自身发射的电磁波信息[14-15]。光学遥感数据通常包含多个波段，不同波段对地物特征的响应各不相同。研究表明，基于全红外光谱的火点识别技术能够有效提取高温火点位置，并可用于定量评判受灾程度，其中热红外波段对火烧迹地的识别准确率可达85%以上[16]。多源遥感数据融合以多种类型数据整合为核心，从中提炼数据的普遍特点，进而形成宏观数据，相比于单一的数据，其中蕴含的数据更加准确全面[17]。可见光波段（0.4～0.7 μm）能够清晰反映地表的基本特征，火烧后地表变黑的特征在该波段表现尤为明显；近红外波段（0.7～1.3 μm）对植被信息特别敏感，能够有效反映火烧后植被的损毁程度和后期的恢复状况；短波红外波段（1.3～3.0 μm）对水分含量变化敏感，火烧后的灰烬和干燥土壤在该波段具有显著特征；热红外波段（8.0～14.0 μm）则可用于监测地表温度变化，评估火烧强度。这些不同波段的组合可构建多种光谱指数，为火烧迹地识别和火烧强度评估提供重要依据。

雷达遥感是一种主动式遥感技术，通过发射微波并接收目标的后向散射信号获取地物信息。与光学遥感相比，雷达遥感最大的优势在于其全天时、全天候观测能力，且不受云雾天气影响。目前常用的雷达数据包括X波段、C波段、L波段和P波段等，不同波段的雷达数据具有不同的穿透能力和散射特性。其中，X波段穿透能力较弱，主要用于提取地表细节特征；C波段平衡了穿透能力和空间分辨率，是目前应用最广泛的波段；L波段和P波段具有较强的植被穿透能力，适合监测植被结构变化和进行生物量估算。目前，以Sentinel-1（C波段）和ALOS-2 PALSAR-2（L波段）为代表的雷达数据在森林火灾灾后评估中发挥着重要作用，尤其是在评估植被结构变化、监测土壤水分和估算生物量等方面具有独特优势。

激光雷达是近年来发展迅速的一种主动遥感技术，其工作原理是通过发射激光脉冲并接收目标反射信号来获取地物的三维结构信息[18]。激光雷达数据的最大优势在于其能够直接获取地物的三维结构信息，特别是在林冠高度、垂直分层结构和生物量估算等方面具有独特优势[19]。通过分析火灾前后的激光雷达点云数据，可以精确评估火灾对森林垂直结构的影响，量化植被损失程度，并监测植被的恢复过程。此外，激光雷达数据还可与光学和雷达数据进行融合，提供更全面的评估信息。但激光雷达数据的获取成本相对较高，且覆盖范围有限，在一定程度上限制了其在大范围评估中的应用。

表1 不同类型遥感数据在森林火灾灾后评估中的主要特征对比

Tab. 1 Comparison of main characteristics of different types of remote sensing data in post-disaster assessment of forest fire

类型	主要数据源	空间分辨率/ m	主要优势	主要限制	主要应用	文献来源
光学遥感	Landsat、Sentinel-2、MODIS	0.3～1 000.0	光谱信息丰富、易于解译、获取成本低	易受天气干扰	烧毁面积计算、火烧强度评估、植被恢复监测	[20]
雷达遥感	Sentinel-1、ALOS-2	1.0～30.0	全天候观测、可穿透云雾、结构信息丰富	数据处理复杂、解译难度大	结构变化监测、土壤水分评估	[21]
激光雷达	机载/地基LiDAR	0.1～25.0	三维结构精确、垂直分层准确、点云密度高	成本高、覆盖范围小	植被结构评估、生物量估算	[22]

2　遥感技术在森林火灾灾后评估的主要应用

2.1　火点识别

遥感技术通过卫星和航空平台获取地表信息,对于森林火烧区域识别及灾后监测评估具有重要作用。卫星遥感火点监测主要依赖于热红外通道,通过检测地表温度升高引起的热辐射增强来识别火点。例如,常温地表(约300 K)的辐射峰值波长约为10.0 μm,而林火发生时地表温度可达500～750 K,辐射峰值波长则位于3.9～5.8 μm,这正好在卫星探测器的红外通道范围内[23]。研究者们开发了多种算法用于火点的自动识别。早期的算法包括基于AVHRR数据的FLANNIGAN和HAAR方法,以及FLASSE和CECCATO提出的上下文算法。随着技术的发展,MODIS卫星数据被广泛用于火点监测,如GIGLIO等[24]提出的MODIS火点检测算法。此外,静止轨道卫星因其时间分辨率高而被用于火点识别,例如基于风云二号G星的火点识别算法。为了提高火点识别的准确性和效率,研究者们开始探索多源数据融合和算法优化。例如,结合风云三号C星MERSI数据特点,设计了区域生长算法与支持向量方法,对图像通过显著性增强方法进行过火区域的提取。此外,基于FY-3D MERSI数据的火点识别方法研究中,提出了结合动态阈值法和上下文检测方法的改进算法,以提高对小型火点的提取效果[25]。

2.2　火烧面积与强度评估

烧毁面积是森林火灾灾后评估的基础指标,其计算精度直接影响后续评估工作的准确性[9]。目前,烧毁面积计算主要采用光谱指数法、图像分类法和变化检测法。

2.2.1　光谱指数法

光谱指数法是最常用的烧毁面积计算方法,其原理是基于火烧前后地物光谱特征的变化来识别火烧区域。植被在火烧后近红外波段反射率显著降低,而短波红外波段反射率升高,这种特征变化可通过构建专门的光谱指数进行量化。常用的光谱指数包括:归一化燃烧比率(Normalized Burn Ratio, R_{NB})、差值归一化燃烧比率(Differenced Normalized Burn Ratio, R_{DNB})、相对差值归一化燃烧比率(Relativized Dfferenced Normalized Burn Ratio, R_{RDNB})。各指数计算公式分别为:

$$R_{NB} = (\rho_{R_N} - \rho_{R_S})/(\rho_{R_N} + \rho_{R_S}) \tag{1}$$

$$R_{DNB} = R_b - R_a \tag{2}$$

$$R_{RDNB} = R_{DN}/\sqrt{|R_b|} \tag{3}$$

式(1)中,ρ_{R_N}为近红外波段反射率,ρ_{R_S}为短波红外波段反射率。R_{NB}值在火烧前较高(接近+1),火烧后显著降低(可接近-1),且降低幅度与火烧强度呈正相关。

式(2)中,R_b为火灾前归一化燃烧比率,R_a为火灾后归一化燃烧比率,R_{DNB}为差值归一化燃烧比率。

式(3)中,R_{RDNB}是在R_{DNB}基础上的改进指数,通过引入标准化因子$\sqrt{|R_b|}$,减少火灾前植被覆盖度对火烧强度评估的影响[26]。R_{RDNB}指数适用于植被覆盖度差异较大的研究区,能够提供更客观的火烧强度评估结果。

R_{DNB}指数评估法能够更好地消除地形、土壤背景等因素的影响,突出火烧造成的植被变化特征,已成为遥感评估火烧强度的主流方法之一。美国地质调查局(USGS)提出了一套基于差值归一化燃烧比率的火烧强度

分级标准，如表2所示。以大兴安岭1987年特大森林火灾为例，基于R_{DNB}指数评估显示，重度燃烧区域占火烧总面积的70.8%，与实地调查结果具有较高的一致性[27]。

表2 USGS差值归一化燃烧比率火烧强度分级标准

Tab. 2 USGS normalized difference combustion ratio fire intensity grading standard

级别	R_{DNB}范围值	火烧强度等级	植被受损程度描述	文献来源
1	<0.10	未燃烧	植被基本未受影响	
2	0.10～<0.27	低度燃烧	地表轻微燃烧，林冠基本完整	
3	0.27～<0.44	中度燃烧	地表显著燃烧，部分林冠受损	[28-29]
4	0.44～<0.66	高度燃烧	地表严重燃烧，大部分林冠被破坏	
5	≥0.66	极重度燃烧	地表和林冠完全燃烧	

2.2.2 图像分类法

图像分类法通过建立分类模型直接识别火烧区域，可分为传统分类方法和深度学习方法两类。董文雪等[30]研究表明，利用激光雷达和高光谱数据的协同应用，可以显著提高森林区域分类的精度，结合结构和光谱特征的分类方法可使分类精度达到$R^2 = 0.70$。

传统分类方法主要包括监督分类和非监督分类。监督分类需要先选取训练样本，常用算法包括最大似然法、支持向量机（SVM）和随机森林等，操作相对简单，但分类精度受训练样本质量影响较大。非监督分类如K-means和ISODATA算法不需要训练样本，但需要进行人工解译和类别合并。

深度学习方法近年来发展迅速，在火烧区识别中展现出良好效果。基于深度学习的卷积神经网络和注意力机制在遥感数据融合方面表现优异[31]。

2.2.3 变化检测法

变化检测法通过分析火烧前后遥感影像的差异来识别火烧区域，主要包括直接代数法、主成分分析法、变化向量分析法[32]。

直接代数运算是最基础的变化检测方法，包括差值法和比值法。差值法直接计算火烧前后影像的差值，简单直观但易受噪声影响。比值法通过计算比值来降低大气和地形的影响，但需要仔细选择阈值。主成分分析法（PCA）可有效提取多时相影像的变化信息，通过对多个波段进行线性变换，将变化信息集中在主分量中，有助于提高变化检测的准确性。变化向量分析法（CVA）则通过构建光谱特征空间，分析地物变化的方向和大小，能够提供更详细的变化信息（表3）。

表3 烧毁面积主要计算方法对比

Tab. 3 Comparison of calculation methods of main burned area

方法类型	主要算法	优点	缺点	文献来源
光谱指数法	归一化燃烧指数（R_{NB}），差值归一化燃烧比率（R_{DN}），相对差值归一化燃烧比率（R_{RD}）	简单易用，物理意义明确	阈值选择主观，受背景影响	[33]
图像分类法	支持向量机（SVM），卷积神经网络（CNN），卷积神经网络架构（U-Net）	自动化程度高，精度可控	需要训练样本，计算量大	[34]
变化检测法	主成分分析(PCA)，变化矢量分析（CVA），差值法	考虑时间变化，噪声小	配准要求高，阈值确定	[35]

2.3 植被恢复评估

植被恢复监测是评估森林生态系统修复效果的关键环节，需要建立长期、系统的监测体系[36]。研究表明，火灾等自然干扰导致的植被退化程度与地形条件、土壤状况及火烧强度等因素密切相关，而植被恢复速率在不同类型植被间存在显著差异，其中针叶林的恢复速率普遍低于阔叶林[37]。随着遥感技术的发展，植被恢复监测已从单一的覆盖度评估发展到包括生态系统功能在内的综合评估。当前的研究主要围绕植被指数动态分析、生态系统功能评估和多尺度协同监测等方面展开。

生态系统功能恢复评估是近年来研究的重点方向[38]。刘兵兵等[39]基于海量无人机激光雷达数据对卫星遥感监测产品在中国森林生态系统中的验证研究表明，在植被恢复监测中，需要综合考虑林型、坡度和覆盖度等因素对监测精度的影响，这对提高植被恢复监测的准确性具有重要指导意义。在生物量恢复评估方面，石亮

等[40]利用植物多样性测度方法对兴安落叶松(*Larix gmelinil*)林火后林下植被生物量的研究表明,火烧强度与植被生物量恢复之间存在显著相关性,为遥感估算火后生物量提供了重要的地面验证数据。

遥感深度学习算法是遥感领域中应用深度学习技术来处理和分析遥感数据的一系列算法。这些算法能够从遥感图像中提取特征,并用于分类、目标检测、图像分割、变化检测等多种应用。同时在植被恢复监测中展现出巨大潜力。金山等[41]选择了太行山南段油松(*Pinus tabuliformis*)林火烧迹地,通过实地调查植物群落结构,包括群落相似性指数、多样性指数、稳定性指数等,来分析火烧迹地植物群落的组成、多样性和稳定性。通过计算优势种的生态位宽度、生态位重叠以及种间关联,来反映物种与环境之间的相互作用以及群落的稳定性。油松林火烧迹地恢复初期的研究发现,不同火烧强度下林下植被的恢复特征存在显著差异,这些地面观测数据为提高基于深度学习的遥感监测精度提供了重要支撑[42]。具体植被恢复评估方法如表4所示。

表4 植被恢复评估主要方法

Tab. 4 Main methods of vegetation restoration assessment

方法类型	技术特点	应用领域	作用	文献来源
高空间和光谱分辨率传感器	连续光谱信号、无损检测、非接触性	生物多样性、土地覆盖特征	准确量化植被再生	[43]
植被遥感参数法	多指数应用、定量化植被生长状况、	植被受损情况和恢复情况	高效准确监测、生态系统健康评价	[44]
对象导向图像分析	多特征分类、多分辨率分割提高分类精度	地物分类、土地覆盖变化、灾害评估	模拟人类视觉感知、支持多尺度分析	[45]
地面调查与遥感数据结合	大面积同步观测、时效性、经济性	森林面积、植被覆盖度、生物量、林分冠层高	长时间序列监测、提高监测时效性	[46]
时间序列分析	数据序列互相依赖、考虑实物发展的延续性和随机性	植被恢复情况、确定森林绿度恢复关键时段	监测植被恢复过程、分析不同植被类型的恢复特征	[47]
光谱轨迹分析	捕捉短时和长时变化、控制参数和阈值过滤	火后植被恢复过程、植被指数变化特征	火烧强度对植被恢复的影响、分析植被类型的恢复特征	[48]
合成孔径雷达和光检测与测距数据	高分辨率成像、全天时、全天候成像	火后不同植被恢复过程、灾后植被水分恢复监测	植被恢复过程监测、植被恢复特征分析	[49]

3 森林火灾灾后遥感评估面临的问题与挑战

尽管遥感技术在森林火灾灾后评估领域取得了显著进展,但技术和应用层面的挑战依然存在。以塔里木河流域胡杨(*Populus euphratica*)林生态恢复评估为例,张久丹等[50]的研究揭示了生态修复的空间异质性,特别是在水源匮乏区域,植被恢复速度显著缓慢,现有评估技术在应对复杂地形条件和多尺度生态过程监测方面仍显不足。在数据获取与处理方面,光学遥感数据受云雾影响较大,尤其在火灾多发的季节,有效数据的获取面临挑战。其次,高分辨率遥感数据的价格成为限制其广泛应用的主要因素,尤其是在需要长期、连续监测的生态恢复评估工作中。多源数据融合处理同样面临技术挑战,不同传感器数据在时空分辨率、几何精度和辐射特性等方面可能存在显著差异,增加了数据融合的难度。特别是在山地地区,地形起伏引起的几何变形和阴影效应对数据质量造成了严重影响。

遥感技术在森林火灾灾后评估领域的发展迅速,已构建起较为完善的技术体系[51]。多源遥感数据的协同应用为灾情评估提供了丰富的信息支持,涵盖了从光学遥感到雷达遥感,从高空间分辨率到高时间分辨率的广泛数据获取能力。特别是遥感数据与气象数据的有效结合,为火灾评估提供了更全面的解决方案[52]。评估方法不断创新,深度学习等人工智能技术的引入显著提升了评估精度和效率[53]。同时,评估内容也从单一的火烧面积统计向生态系统功能的综合评估拓展[54],为科学制定恢复策略提供了重要依据。

当前研究仍面临诸多挑战。数据获取的时效性和可靠性需要提高,尤其是在云雾频发的山区,有效数据获取困难;评估方法的适用性有待增强,现有模型在不同地区、不同植被类型区的表现差异较大;评估标准和验证方法缺乏统一性,验证体系和标准规范亟待完善。未来研究应重点关注以下方向:首先,加强多平台协同观测

能力建设，通过天基、空基和地基观测系统，提高数据获取的全天候性和可靠性；其次，发展基于机器学习的自适应评估模型，引入生态过程机理，提升算法在不同环境条件下的适用性；第三，构建智能化评估平台，实现数据处理、分析评估和成果展示的自动化和标准化；最后，深化生态系统功能评估研究，建立包括生物量、生产力和生态系统服务在内的综合评估指标体系。

参考文献：

[1] 郑鑫,刘晏铭,司莉青,等.林火干扰对林分结构及植被更新影响研究进展[J].北京林业大学学报,2025,47(1):156-162.

[2] KELLY L T, GILJOHANN K M, DUANE A, et al. Fire and biodiversity in the Anthropocene[J]. Science, 2020, 370(6519): 1234-1238.

[3] JOLLY W M, COCHRANE M A, FREEBORN P H, et al. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013[J]. Nature Communications, 2015, 6(7):7537.

[4] ABATZOGLOU J T, PARK WILLIAMS A. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests[J].Proceedings of the National Academy of sciences, 2016, 113(42): 11770-11775.

[5] 田家昊.基于遥感信息的大兴安岭林火情势及预警研究[J/OA].消防界(电子版),2023,9(9):47-50.DOI:10.16859/j.cnki.cn12-9204/tu.2023.09.017.

[6] 刘佳鑫,李荣,王红.中国主要林区森林火灾时空动态变化分析[J].湖北大学学报(自然科学版),2024,46(6):809-819.

[7] CHUVIECO E, MOUILLOT F, van der WERF G R, et al. Historical background and current developments for mapping burned area from satellite Earth observation[J]. Remote Sensing of Environment, 2019, 225: 45-64.

[8] KARAGIANNI A, LAZARIDOU M. Remote sensing techniques in monitoring areas affected by forest fire[C]//Fifth International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2017). March 20-23, 2017. Paphos, Cyprus. SPIE, 2017: 24.

[9] SUNAR F, ÖZKAN C. Forest fire analysis with remote sensing data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2001, 22(12): 2265-2277.

[10] 覃先林,李晓彤,刘树超,等.中国林火卫星遥感预警监测技术研究进展[J].遥感学报,2020,24(5):511-520.

[11] 胡凯龙,聂娟,崔燕,等.高分遥感卫星影像森林火灾动态监测应用[J].卫星应用,2020,(6):35-39.

[12] 冯博宇.自然火灾遥感监测研究进展[J].科技传播,2011,3(14):228-229.

[13] 王世杰,彭韬,刘再华,等.加强喀斯特关键带长期观测研究,支撑西南石漠化区生态恢复与民生改善[J].中国科学院院刊, 2020, 35(7):925-933.

[14] GIGLIO L, van der WERF G R, RANDERSO J T, et al. Global estimation of burned area using MODIS active fire observations[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2006, 6(4): 957-974.

[15] 胡林林,王立中,李华,等.PL高分辨率遥感影像在森林火灾评估上的应用[J].林业科学,2022,58(3):107-116.

[16] 杨远垚,陈海燕,陈邵莹,等.基于全红外光谱的火点识别与林火灾后评估[J].林业与生态科学,2021,36(2):170-178.

[17] 王晓娇,武慧珍,贾瑞娟.地质矿产勘查中多源遥感数据融合技术的应用研究[J].西部资源,2023,(6):95-96,101.

[18] MORANTE-CARBALLO F, BRAVO-MONTERO L, CARRIÓN-MERO P, et al. Forest fire assessment using remote sensing to support the development of an action plan proposal in Ecuador[J]. Remote Sensing, 2022, 14(8): 1783.

[19] 韦复国,邱世平.激光雷达技术在森林资源监测中的研究进展[J].林业调查规划,2021,46(1):18-22,95.

[20] QUAN X W, YEBRA M, RIAÑO D, et al. Global fuel moisture content mapping from MODIS[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2021, 101: 102354.

[21] 张鹏飞,余辉,张扬,等.星载微波云要素雷达遥感技术发展及展望[J].上海航天(中英文),2024,41(S1):85-101.

[22] 庞勇,荚文,覃先林,等.机载光学全谱段遥感林火监测[J].遥感学报,2020,24(10):1280-1292.

[23] 汪东,贾志成,夏宇航,等.森林草原火灾监测技术研究现状和展望[J].世界林业研究,2021,34(2):26-32.

[24] 陈兴峰,刘李,李家国,等.卫星遥感火点监测应用和研究进展[J].遥感学报,2020,24(5):531-542.

[25] 殷针针,陈方,林政阳,等.基于FY-3D MERSI数据的火点识别方法研究[J].遥感技术与应用,2020,35(5):1099-1108.

[26] 刘树超,陈小中,覃先林,等.内蒙古毕拉河林场森林火灾受害程度遥感评价[J].林业资源管理,2018(1):90-95,140.

[27] 钱达,张虎,何龙.火灾区域林地植被变化分析——以大兴安岭和黄石公园地区为例[J].天津师范大学学报(自然科学版),2019, 39(3):60-68.

[28] LENTILE L B, HOLDEN Z A, SMITH A M S, et al. Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects [J].International Journal of Wildland Fire, 2006, 15(3): 319-345.

[29] BROOK A. Spectroscopy and Remote Sensing Techniques to Assess Active- and Post-Fire Effects[C]//TERRAenVISION 2019. MDPI, 2020: 78.

[30] 董文雪,曾源,赵玉金,等.机载激光雷达及高光谱的森林乔木物种多样性遥感监测[J].遥感学报,2018,22(5):833-847.

[31] 张春玲,赵训威,王志刚,等.基于人工智能的多源遥感数据融合在电网勘测应用研究[J].现代电子技术,2024,47(4):128-133.
[32] 吴超,徐伟恒,黄邵东,等.林火监测中遥感应用的研究现状[J].西南林业大学学报(自然科学),2020,40(3):172-179.
[33] 刘小波,尹旭,刘海波,等.深度迁移学习在高光谱遥感图像分类中的研究现状与展望[J].青岛科技大学学报(自然科学版),2019,40(3):1-11.
[34] CHENG G L, HUANG Y M, LI X T, et al.Change Detection Methods for Remote Sensing in the Last Decade: A Comprehensive Review [J]. Remote Sensing, 2024, 16(13): 2355.
[35] 戴维序,朱涛,吴桐,等.基于多源遥感数据的森林火灾损失评估[J].科技创新与应用,2024,14(24):10-14.
[36] 公茂锋,林连蓬,韦俊杰.惠州沿海红树林生态监测及生态修复研究[J].皮革制作与环保科技,2021,2(18):38-39.
[37] 蒋宇威,李登秋.火灾和地质灾害对森林的干扰及其恢复评估[J].安徽农业科学,2021,49(14):106-109.
[38] 褚燕琴,牛树奎,陈锋,等.火干扰及环境因子对油松林林下植被的影响[J].浙江农林大学学报,2017,34(1):96-103.
[39] 刘兵兵,魏建新,胡天宇,等.卫星遥感监测产品在中国森林生态系统的验证和不确定性分析——基于海量无人机激光雷达数据[J].植物生态学报,2022,46(10):1305-1316.
[40] 石亮,周梅,王鼎,等.林火干扰对兴安落叶松林下植被多样性和生物量的影响[J].东北林业大学学报,2016,44(1):44-47.
[41] 金山,武帅楷.太岳山油松林火烧迹地恢复初期植物群落结构特征[J].生态学报,2021,41(10):4182-4193.
[42] 武秀娟,奥小平.油松林火烧迹地恢复初期林下植被特征[J].西北林学院学报,2022,37(5):155-161.
[43] 钟燕飞,王心宇,胡鑫,等.高光谱高空间分辨率遥感观测、处理与应用[J].测绘学报,2023,52(7):1212-1226.
[44] 王敏钰,罗毅,张正阳,等.植被物候参数遥感提取与验证方法研究进展[J].遥感学报,2022,26(3):431-455.
[45] 黄志坚.面向对象影像分析中的多尺度方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2014.
[46] 魏海峰,张红红,殷大分,等.卫星遥感信息技术在综合地质调查中应用研究[J].吉林地质,2024,43(2):77-84.
[47] 张立福,陈浩,孙雪剑,等.多维遥感数据时空谱一体化存储结构设计[J].遥感学报,2017,21(1):62-73.
[48] 张立福,王飒,刘华亮,等.从光谱到时谱——遥感时间序列变化检测研究进展[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(4):451-468.
[49] 赵磊,陈尔学,李增元,等.合成孔径雷达在森林资源监测中的应用:优势、难点和方法[J].卫星应用,2024,(6):29-36.
[50] 张久丹,李均力,包安明,等.2013—2020年塔里木河流域胡杨林生态恢复成效评估[J].干旱区地理,2022,45(6):1824-1835.
[51] 王艳春.安徽合肥四里河生态修复策略研究[J].中国园林,2018,34(7):86-90.
[52] CHEN Y H, LI J, PENG G X. Forest fire risk assessment combining remote sensing and meteorological information[J].New Zealand Journal of Agricultural Research, 2007, 50(5): 1037-1044.
[53] CHUVIECO E, AGUADO I, YEBRA M, et al. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies[J]. Ecological modelling, 2010, 221(1): 46-58.
[54] 杨胜苏,刘卫柏.基于恢复生态学的洞庭湖区“山水林田湖草”生态修复研究[J].生态学报,2021,41(16):6430-6439.

DOI编码:10.16259/j.cnki.36-1342/s.2025.01.014

南昌市松墨天牛成虫种群发生与消长动态研究

程 芳[1],张 驰[2],周子超[1],高怀诚[2],刘兴平[2],曾菊平[2]★
(1.南昌市综合林业服务中心,江西 南昌 330025;2.保护生物学江西省重点实验室,鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室,江西农业大学 林学院,江西 南昌 330045)

摘 要:【目的】监测掌握南昌市松墨天牛种群动态,为精准防控松材线虫病提供参考。【方法】在南昌市选择有疫情的10个乡镇设置松墨天牛监测点,放置诱捕器,每周统计松墨天牛数量与雌雄个体数,并清理成虫。【结果】2022年诱捕到成虫6 209头,始见日为5月16日,雌雄性比为2.46、种群密度为每个诱捕器每次5头。种群呈双峰型、早期单峰型、中期单峰型和波动型4种消长动态类型。种群呈逻辑斯蒂增长,其中双峰型种群数量大、发生重、增长持续期长、拐点出现晚;早期单峰型发生轻至中度、拐点出现早;波动型与双峰型消长曲线相似,但单位时间增长量后者是前者10倍。【结论】双峰型监测点应列为松材线虫病重点防控区,增加防控频次、延长防控时间,并将单峰型监测点纳入方案,据其高峰期分布安排防治日期、措施。

关键词:松墨天牛;诱捕法;种群动态;监测;逻辑斯蒂增长
中图分类号:S763.302 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-9818(2025)01-0080-07

Adult population occurrence and dynamics of *Monochamus alternatus* in Nanchang

CHENG Fang[1], ZHANG Chi[2], ZHOU Zichao[1], GAO Huaicheng[2], LIU Xingping[2], ZENG Juping[2]★
(1.Nanchang Comprehensive Forestry Service Center, Nanchang Jiangxi 330025, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Conservation Biology, Key Laboratory of Forest Ecosystem Protection and Restoration in Poyang Lake Basin, National Forestry and Grassland Administration, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang Jiangxi 330045, China)

Abstract:【Objective】It was monitored and grasped the population dynamics of *Monochamus alternatus* in Nanchang City, providing reference for precise prevention and control of pine wilt disease.【Method】It was selected 10 townships with outbreaks in Nanchang City to set up monitoring points for *M. alternatus*, placed traps, and counted the number of *M. alternatus* and male and female individuals every week, and cleaned up adult beetles.【Result】In 2022, 6 209 adult of *M. alternatus* were captured, and the first date of adult emergence was May 16th, as well as the population density was 5 beetles per trap in average, with a sex ratio (females∶males) of 2.46. The population dynamics curves were showed four types: bimodal curve, early-term unimodal curve, middle-term unimodal curve, and no-peak curve. The logistic growth model was fitted in all populations, and the bimodal population was significantly larger, with a high-degree in occurrence, a longer growth duration, and a later time of turning-point (with zero-growth rate); The early-term unimodal type usually showed a mild- or moderate-degree in occurrence, with the maximum growth rate and turning-point appearing earlier. The population growth curves were looked similar between the no-peak and the bimodal type, but the actual increment per unit time was completely different, with the latter being up to 10 times that of the former.【Conclusion】The bimodal-type area should be as a key zone that formulating a prevention and control plan for the longhorn beetle of *M. alternatus*, and where the control period should be appropriately extended by increasing the frequency. And this plan should also include all unimodal-type area as a prevention and control zone, and arrange the control works reasonably according to the peak period.

Key words: *Monochamus alternatus*; trapping method; population dynamics; monitoring; logistic growth model

收稿日期:2024-10-31;2025-01-19修回
基金项目:南昌市林业有害生物监测项目
第一作者:程芳,女,工程师,本科,主要从事林业灾害防控管理研究。E-mail: 281260470@qq.com
***通信作者:**曾菊平,男,教授,博士,主要从事林业害虫防控与昆虫生态保护研究。E-mail: zengjupingjxau@163.com
引文格式:程芳,张驰,周子超,等.南昌市松墨天牛成虫种群发生与消长动态研究[J].南方林业科学,2025,53(1):80-86.
CHENG F, ZHANG C, ZHOU Z C, et al. Adult population occurrence and dynamics of *Monochamus alternatus* in Nanchang[J]. South China Forestry Science, 2025, 53(1): 80-86.

伴随全球气候变化加剧、极端气候频繁[1-2],人流、物流(包括生物物质)流动加速[3],与人类生产、生活密切相关的一些害虫的发生、分布正在悄然变化[4]。而通过实施害虫种群监测,跟踪把握其发生动态、消长规律、预测趋势等,对于及时预测预报预警意义重大[5-6],成为当前生态保护、生物入侵与害虫防治、管理研究的核心内容之一[7-8]。

松墨天牛(*Monochamus alternatus*)是导致松树大量死亡、松林毁灭的松材线虫病的本地重要传播媒介[9],伴随疫情的传播、扩散[10-11],松墨天牛的发生面积、暴发频次呈现出显著扩大趋势。根据传染病流行的预防控制方法要求,控制天牛媒介,具有切断传染源、阻碍传播途径的双重功效,成为当前松材线虫病防控的关键途径之一。而开展松墨天牛种群监测工作,有助于精准把握松墨天牛发生现状与动态,为实施"控天牛、控媒介"措施,提供第一手资料和参考依据。当前,借助轻型直升机载药,飞至松林上方喷雾,防治松墨天牛的方法(简称"飞防"),因其作业面大、工作效率高等优点,近些年已在多地推广应用[12]。飞防法主要以松墨天牛成虫防控为目标,需首先掌握松墨天牛成虫发生期(始见日、高峰日等)等基础资料,才能确保防效。且飞防申请获批需要时间、空中作业又易受天气条件影响等[13],防治窗口期短,精准掌握成虫发生期就显得尤为重要。不仅如此,由于各飞防区地形各异、气候差异大,且疫情发生的历史背景也不同,即便是处在同一行政区域,松墨天牛成虫发生期也并非一致,实际防治日期不能套用、照搬。因此,在不同区域、地点开展松墨天牛监测,各自累积资料,获知本地松墨天牛发生期,才能做到有针对性地选准防治日期,提高防治成效。

江西省于2003年在赣州市章贡区首次发现松材线虫病疫情,目前(截至2023年底)已扩散到10个设区市81个县(区)[14]。松材线虫病在江西的传播主要依靠松墨天牛。该虫春季羽化后,开始啃食树冠嫩枝或树皮补充营养,完成交配、产卵行为。在此期间,松材线虫被松墨天牛携带,从被害的伤口侵入健康松树[15-16]。而由于纬度跨度大,江西各地的松墨天牛发生代数、成虫发生期等各自不同[17],因而需依据各自监测资料,找准防控窗口期。南昌市位于江西省中部偏北,全市森林以松、杉树为主,而松树主要为易感病树种马尾松(*Pinus massoniana*)[18],松材线虫防控压力较大。本研究于2022年选择在南昌市马尾松林面积大、松材线虫病疫情重的新建区、南昌国家经济技术开发区(简称经开区)、安义县、进贤县,借助诱捕法在多点开展松墨天牛全年监测,按每周一次频次采集数据,分析揭示当地松墨天牛种群动态、特征,为实施松材线虫病防治之"控天牛、控媒介"方法、途径,提供重要参考。

1　方法与材料

1.1　研究区概况

研究区南昌市位于28°09′～29°11′ N,115°271′～116°11′ E,地处江西省中部偏北,区内以平原为主,东南地势平坦,西北丘陵起伏,最高点位于西山山脉中段的梅岭洗药峰,海拔841.4 m;位于亚热带季风区,气候湿润温和、雨量充沛、四季分明,年均气温19.7°C、年均降水量1 962.8 mm。区内森林以松、杉树为主,其中,松林面积3.424 1万 hm^2,主要为马尾松等松材线虫病易感树种。当地松材线虫病于2006年最早在进贤县出现,之后十年扩散到了安义县、湾里、新建区等地,损失巨大,如2021年南昌市松材线虫病发生面积1.1867万 hm^2,调查记录枯死松树近24万株,涉及到1 327个林区小班等。因此,选择在马尾松林面积大、松墨天牛呈爆发态势且松材线虫病疫情较重的新建区、南昌国家经济技术开发区(以下简称经开区)、安义县、进贤县4个县(区)开展监测研究。

1.2　监测方法

1.2.1　监测点选择

2022年3月,结合2021年松材线虫病发生记录与现场实地踏查情况,选择研究区疫情小班多、发生重的乡(镇)作为监测点,包括新建区石岗镇、西山镇,经开区乐化镇、樵舍镇,安义县长埠镇、新民乡、石鼻镇,进贤县白圩乡、长山晏乡、钟陵乡。在每个监测点,基于当地林业小班图与地方工作人员介绍推荐,在马尾松优势小班内初步踏查,选择在马尾松枯死树集中、树干刻槽多的位置设置松墨天牛诱捕器。

1.2.2　诱捕器设置

参考松墨天牛信息素引诱剂使用方法[19],在监测点每隔50 m以上设置松墨天牛诱捕器1个,并按说明放置松墨天牛引诱剂(费洛蒙F8型)。每个监测点设置5个诱捕器,于5月至11月,每周1次,查看记录每个诱捕器

的松墨天牛数量与雌雄个体数，并将松墨天牛放入纱笼，带回室内供其他实验使用。雌雄性别判断主要参考郭雅琦等[20]方法，诱芯按说明书要求每月更换。

1.3 数据分析

采用方差分析或非参数检验法，比较分析同一县（区）的不同监测点间的松墨天牛成虫、雌虫、雄虫诱捕数的差异。显著性检验水平设为$P<0.05$。全文均用Excel制图。

2 结果与分析

2.1 松墨天牛的年发生动态

2022年松墨天牛成虫始见日为5月16日，汇总10个监测点50个诱捕器数据，获知全年成虫诱捕数为6 209头，其中，雌虫4 314头、雄虫1 751头，总体性比（雌虫数∶雄虫数）为2.46，属于“偏雌性”种群结构。

从图1可知，南昌市松墨天牛成虫在5－10月均可见林间活动，但以5、6、7、8月份为高峰期，这4个月的诱捕量占比大于95%、每个月占比接近或大于20%。而进入11月后，林间很难再见到松墨天牛成虫活动。

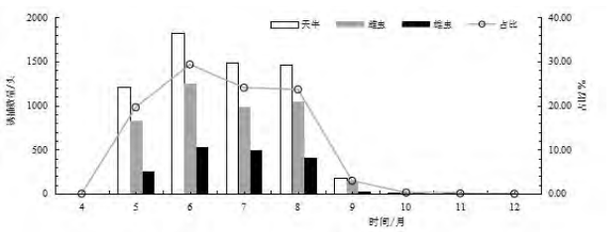


图1 南昌市2022年各月松墨天牛诱捕数量与占比

Fig. 1 Number and proportion of the longhorn beetle of *M. alternatus* trapped monthly in Nanchang in 2022

2.2 松墨天牛成虫种群密度

研究区内平均每个诱捕器每次诱集的松墨天牛数为5头，但各监测点之间的实际种群密度差异大，即便是位于同一县（区）的近邻监测点也差异显著（表1）。其中，安义县的石鼻、经开区的樵舍松墨天牛种群密度最高，每个诱捕器每次诱集数量为12头或以上，尤其雌虫密度大；进贤县的钟陵、安义县的长埠墨天牛种群密度较高，每个诱捕器每次诱集数量为5～6头；而其他监测点种群密度相对较低，每个诱捕器每次诱集数量约为3头。

表1 2022年南昌市监测点松墨天牛成虫种群密度

Tab. 1 Adult population density of *M. alternatus* trapped at monitoring points of Nanchang in 2022

监测点 县（区）乡镇		排序	松墨天牛密度 （头/诱捕器）	雌虫密度 （头/诱捕器）	雄虫密度 （头/诱捕器）
安义	石鼻	1	12.57±13.96a	9.03±10.82a	3.25±4.3a
	新民	10	1.81±3.73c	1.02±1.95c	0.47±1.21c
	长埠	4	5.3±6.74b	3.42±4.83b	1.69±2.31b
	平均	–	6.63±10.27	4.54±7.73	1.83±3.13
进贤	白圩	6	3.83±5.14ab	2.83±4.16ab	1.02±1.48a
	长山晏	7	3.61±4.15b	2.53±2.95b	1.05±1.63a
	钟陵	3	5.7±9.71a	4.03±7.77a	1.62±2.9a
	平均	–	4.38±6.83	3.13±5.39	1.23±2.11
经开	乐化	9	2.14±3.03b	1.42±2.22b	0.72±1.1b
	樵舍	2	11.52±15.02a	7.77±10.55a	3.4±4.54a
	平均	–	6.72±11.68	4.52±8.17	2.03±3.53
新建	石岗	5	4.03±8.31a	2.99±6.79a	1.02±2.04a
	西山	8	3.46±4.12a	2.51±3.34a	1.04±1.4a
	平均	–	3.75±6.55	2.75±5.35	1.03±1.75
总体	–	–	5.35±9.05	3.73±6.77	1.52±2.73

注：表中数值为平均值±标准差，不同字母表示县（区）内的乡镇间差异显著。

Note: the values in the table were Mean ± SD, different letters indicated significant difference among townships within a county.

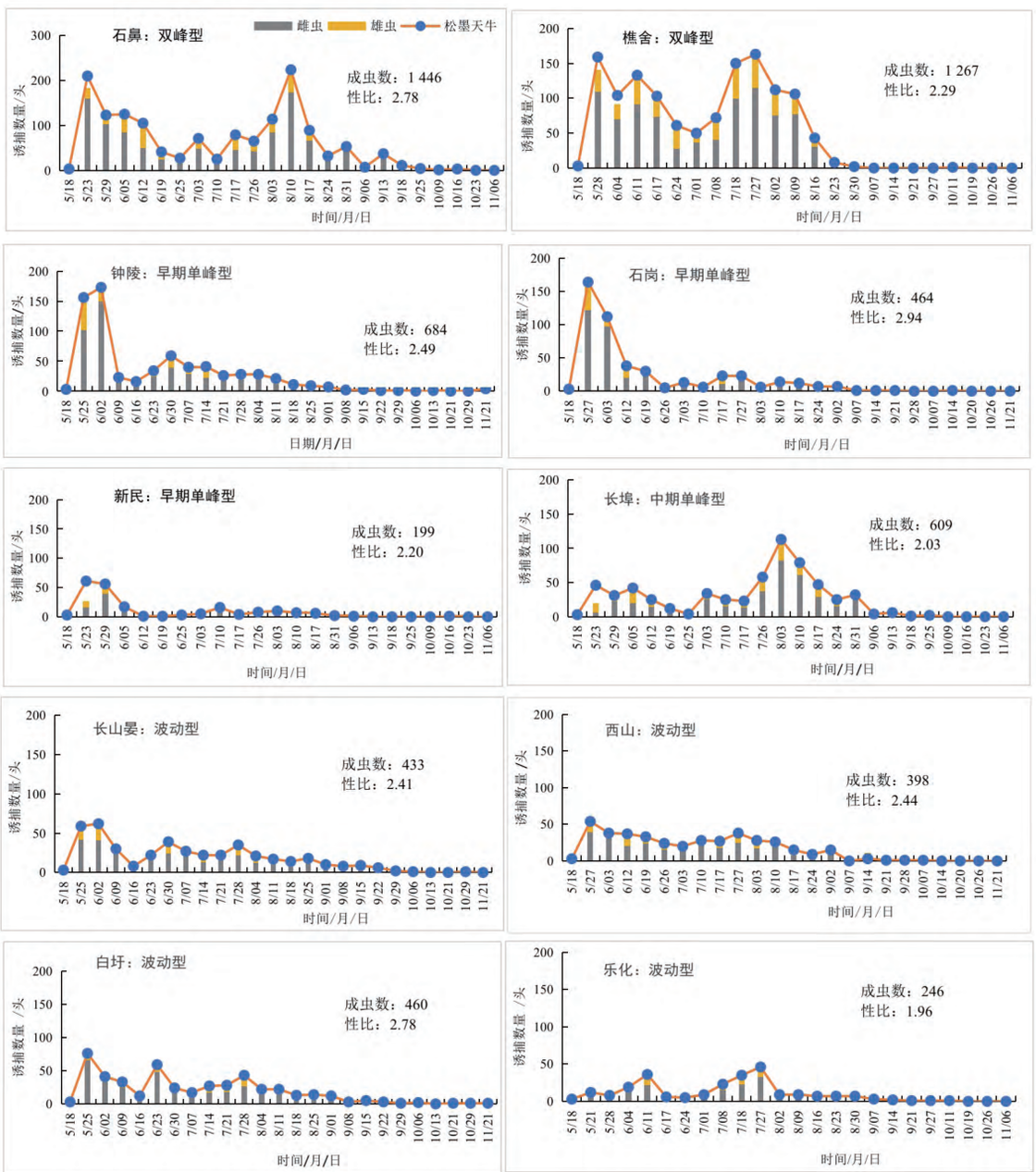
2.3 松墨天牛成虫种群大小、性比与动态特征

从图2可知，各监测点松墨天牛种群数量差异较大，同一年度内发生程度不同。石鼻（1 446头）与樵舍（1 267头）发生程度最重，种群数量显著高于钟陵（684头）、长埠（609头）、石岗（464头）、白圩（460头）、长山晏（433头）、西山（398头），而新民（199头）监测点的种群数量最小，发生程度最轻。

各监测点松墨天牛种群全年发生动态明显不同。根据高峰日时间、高峰期出现频次与高峰期跨度等,可将松墨天牛种群发生动态曲线划分出4种类型:双峰型、早期单峰型、中期单峰型、波动型。

(1)双峰型:分别在5月下旬(早期)与7月下旬至8月上旬(中期)记录到两次峰值,如石鼻、樵舍,其松墨天牛种群数量、密度均显著大于其他监测点,属重度发生。

(2)早期单峰型:在5月下旬记录到峰值后,松墨天牛数量随后呈持续波动下降趋势,如钟陵、石岗、新民,其中,石岗、钟陵松墨天牛种群数量较大、密度较高,属中度发生,新民则为轻度发生。



图中松墨天牛成虫数量包含虫体残缺难以辨别雌雄的个体数量。

The number of adult *M. alternatus* in the picture included the number of individuals with incomplete bodies that were difficult to distinguish between male and female.

图2　南昌市各监测点松墨天牛诱捕数量与性比(图柱上的值)的年动态变化

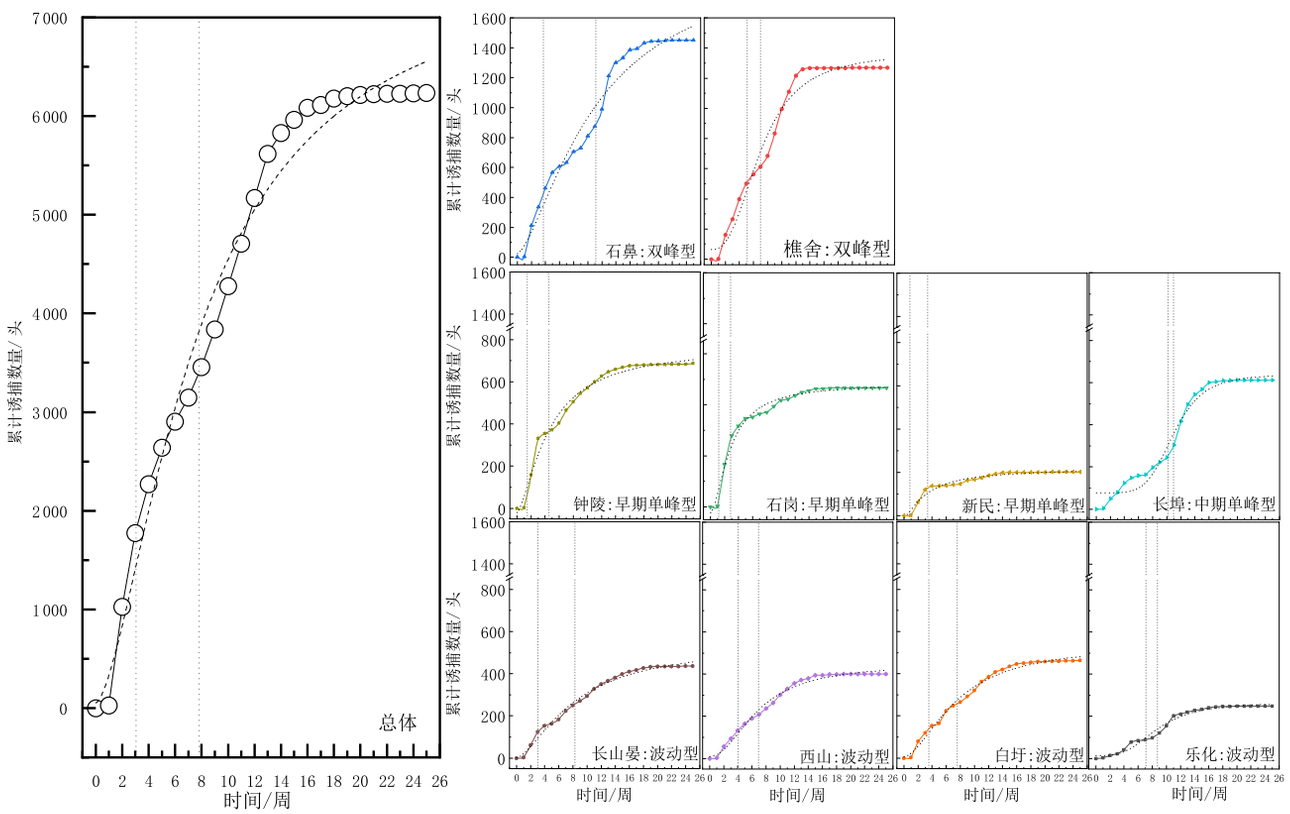
Fig. 2　Annual dynamic changes in the amount and sex ratio (values on columns) of the longhorn beetle of *M. alternatus* at monitoring sites in Nanchang

(3)中期单峰型:早期峰值不明显,而在8月上旬(中期)记录到明显峰值,如长埠,松墨天牛种群较大、密度较高,属中度发生。

(4)波动型:全年未记录到明显峰值,松墨天牛数量一直在波动,如长山晏、西山、白圩、乐化,其中,除乐化为轻度发生外,其他均为中度发生。而无论发生程度如何,各监测点种群性比都呈“偏雌性”结构,种群性比时间动态的变幅大、无规律,但高峰期雌雄性的比值通常较大。

2.4 松墨天牛成虫种群增长特征

从图3可知,各监测点全年松墨天牛种群均呈逻辑斯蒂增长,但增长特征不同。新民最早达到最大增长速率,而重度发生的监测点(石鼻、樵舍)达到最大增长速率的时间偏晚;尤其,石鼻最晚到达拐点(零增长速率),且持续增长期最长,而轻度发生的监测点(新民)则较早进入拐点。但是,重度发生的监测点樵舍的拐点出现时间并不晚,而轻度发生的监测点乐化则相对较晚。显然,松墨天牛种群增长与其发生动态有关,早期单峰型的种群拐点或最大增长速率出现时间更早,中期单峰型的种群拐点出现时间更晚;而双峰型与波动型的种群增长曲线特征较相似,但其实际增长量差异大(图3),其中石鼻每个百分点增量约为乐化的10倍。



图中两条竖直虚线分别指示最大增长速率与零增长速率(拐点)。

The two dotted lines indicated the maximum and zero (turning-points) growth rate.

图3 南昌市各监测点松墨天牛成虫诱捕量及其逻辑斯蒂种群增长模型

Fig. 3 The trapped amount and logistic population growth models of the longhorn beetle of *M. alternatus* at monitoring sites in Nanchang

3 结论与讨论

实施害虫种群动态监测是提高害虫防控成效的关键[7-8]。松墨天牛以幼虫钻蛀树干、成虫啃食树皮等方式为害马尾松等松树,但种群暴发频次并不高。然而,自松材线虫病侵入其发生区,导致大量马尾松死亡;同时,松材线虫病还借助松墨天牛作为主要媒介昆虫[9],在我国各地快速传播、扩散[10-11],这导致松墨天牛种群动态也随之改变。南昌市10个监测点的数据表明松墨天牛成虫种群全年呈现出双峰型、早期单峰型、中期单峰型、波动型4种消长曲线类型。

江西省南昌市针叶林多由松材线虫病易感树种马尾松构成[18],该病于2006年在进贤县首先出现,目前已在全市各县区发生、扩散。2022年南昌市10个监测点的诱捕数据显示,各监测点松墨天牛种群动态不同,即使是位于同一个县(区),其成虫种群数量全年动态也差异显著,如发生高峰日时间、高峰期数量与跨度等都不一

致。显然,松墨天牛在林间发生的复杂性,给当下正在实施的“控天牛、控媒介”途径,及天牛的精准防控,增加了更多困难和挑战。例如,松墨天牛种群发生沿江西省纬度梯度的变化较大,在赣南(全南、南康等)每年发生1～2代,成虫发生期3月中下旬开始、5月上中旬达高峰期;赣中(万安等)每年发生1代或少量2代,成虫发生期4月上旬开始,至5月下旬或6月上旬达高峰期;而至赣北(湾里、浮梁等)则每年发生1代,成虫发生期4月下旬或5月上旬开始,7月上旬达高峰期[17]。而即使在同一个纬度梯度,松墨天牛的种群发生也可能不同。例如,本研究同时在南昌市不同县(区)监测松墨天牛,发现成虫种群消长动态的4种类型,即双峰型、早期单峰型、中期单峰型、波动型,其中,双峰型分别在5月下旬(早期)与7月下旬至8月上旬(中期)出现2个高峰期;早期单峰型则在5月下出现高峰期;中期单峰型实际高峰期出现在8月上旬,而非7月上旬。因此,在松墨天牛防控生产上,若简单地照搬或参考某一个已知发生期,如以7月上为参考高峰期设定施药(如飞防)方案,则显然与各地实际情况不符,因而无法达到精准防控的要求。

松墨天牛种群动态除了受温度、降水等气象因素与纬度梯度、地形、林相等环境因素影响外[21],仍可能受到当地越冬种群数量大小、周边疫情状况等因素的直接影响,尤其在地方或更小尺度(如林班或小班)层面,这种直接影响可能更明显。例如,本次的双峰型种群(如石鼻、樵舍)较其他种群显著偏大,这可能与监测点小班前一年留下的越冬虫源量更大有关;而波动型种群(如乐化、西山等)全年未见明显高峰期,则可能与其越冬虫源量更小有关;中期单峰型种群(如长埠)的高峰期出现时间明显延后,则可能与诱捕法的“拉”效应有关,使得周边虫源更易扩散进来,从而补充了更多松墨天牛成虫个体。而相反地,早期单峰型种群则可能是因为发生点的位置相对孤立,或其周边疫情相对较轻,使“拉”效应不明显或未形成,而仅在早期出现一个高峰。在发生程度上,双峰型种群发生地显然归属于重度发生类型,波动型种群发生地则以中、轻度发生为主。而无论是早期单峰型或中期单峰型种群发生地或其周边,都可能为中度以上发生程度。因此,若基于种群动态监测结果来设定松墨天牛防控方案,则双峰型发生点应作为重点防治区,而单峰型发生点则至少应列入到防治区。

然而,无论松墨天牛种群动态特征如何,其全年种群增长均呈现为逻辑斯蒂增长形式,这意味着逻辑斯蒂增长模型也适用于松墨天牛全年种群增长和衰退趋势的分析,并可进一步尝试将该工具用于开展松墨天牛的科学预测与害虫管理。例如,在轻度发生点(如新民),因其种群增长达到最大增长速率的时间更早,松墨天牛防治时间安排也应适当前移;而在重度发生点(如石鼻、樵舍),由于其种群增长很晚达到拐点(零增长速率),即持续增长期更长,所以其防治期也相应延长,或通过增加防治频次来补充等。而伴随全球气候变化加剧,害虫管理可能需考虑更多的复杂情形。例如,江西省年均气温在1901－2010年间每10年上升了0.18℃,尤其冬季上升幅度大,每10年上升了0.29℃;而与此同时,全省平均相对湿度却每10年下降了0.45%。这种气候变化趋势,与过去几十年获知气候变化江西省病虫灾害面积扩大、损失加重关系密切,可能是重要驱使因子之一[4],其中温度或温湿度联合作用的特征变量,贡献率为41.43%。伴随气候变暖,未来若增温2℃,预测松墨天牛在江西省的平均适生概率将增长20%。届时,高度适生范围将扩展到全省各个县(区),如南昌市几乎都将成为高适生区[22],届时松墨天牛种群发生显然会变得更复杂。。

总之,在多种生物(如天敌、食物)或非生物(如地形、气象等)因素影响下,害虫种群发生与消长动态类型可能较预期更为多样。而且,在当前全球气候变化、极端气候加剧背景下[1-2],害虫种群动态可能正在变得更加复杂,这显然给害虫防控、管理带来了更多压力和挑战。本研究针对南昌市10个乡镇松墨天牛种群动态的监测结果,较好地揭示了当前松墨天牛种群发生的复杂性与多变性,为实施“控天敌、控媒介”途径,达到科学、精准防控要求提供了重要参考。但松墨天牛种群监测需长期持续地开展,需进一步结合林分特征、生产行为、气候变化等进行,以跟踪预测未来种群趋势,获知复杂动态与变化的解释机制。

参考文献:

[1] RAHMSTORF S, COUMOU D. Increase of extreme events in a warming world[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2011, 108(44): 17905-17909.

[2] IPCC. Summary for policymakers. In Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2022: 1-2272 .

[3] KHERBASH O, MOCAN M L. A review of logistics and transport sector as a factor of globalization[J]. Procedia Economics and Finance, 2015, 27(3):42-47.
[4] 张鹏霞,叶清,欧阳芳,等.气候变暖、干旱加重江西省森林病虫灾害[J].生态学报,2017,37(2):639-649.
[5] CAREY J R, LIEDO P, OROZCO D, et al. A male-female longevity paradox in medfly cohorts[J]. Journal of Animal Ecology, 1995, 64 (1): 107-116.
[6] BEMARDI D, GARCIA M S, BOTTON M, et al. Biology and fertility life table of the green aphid Chaetosiphon fragaefolli on strawberry cultivars[J]. Journal of Insect Science, 2012, 12(1): 28.
[7] 句荣辉,沈佐锐.昆虫种群动态模拟模型[J].生态学报,2005,25(10):2709-2716.
[8] 赵紫华.虫口统计学的概念与应用[J].植物保护学报,2020,47(4):904-911.
[9] WANG Y, CHEN F, WANG L, et al. Study of the departure of pine wood nematode, Bursaphelenchus xylophilus (Nematoda: Aphelenchoididae) from Monochamus alternatus (Coleoptera: Cerambycidae)[J]. Journal of Asia-Pacific Entomology, 2020, 23(4): 981-987.
[10] 王志明,皮忠庆,候彬.吉林省发现松墨天牛[J].中国森林病虫,2006,25(3):35.
[11] 李硕,孙红,周艳涛,等.2021年全国主要林业有害生物发生情况及2022年发生趋势预测[J].中国森林病虫,2022,41(2):44-47.
[12] 王辉,仇慧娟,徐俊,等.噻虫啉飞机喷雾防治松褐天牛现状与应用展望[J].世界林业研究,2019,32(5):34-40.
[13] 王辉.飞机喷雾防治松褐天牛短期效果与持续效果研究[D].南昌:江西农业大学,2020.
[14] 国家林业和草原局.国家林业和草原局公告(2024年第4号)(2024年松材线虫病疫区)[R/OL].(2024-02-27)[2025-01-19]. https://www.forestry.gov.cn/c/www/gkgjlyjgb/547477.jhtml.
[15] 柴希民,蒋平.松材线虫病的发生和防治[M].北京:中国农业出版社,2003.
[16] 展茂魁,杨忠岐,王小艺,等.松褐天牛成虫松材线虫病的传播能力[J].林业科学,2014,50(7):74-81.
[17] 潘友粮.纬度与灾害对松墨天牛种群动态的影响[D].南昌:江西农业大学,2022.
[18] 王曦茁,曹业凡,汪来发,等.松材线虫病发生及防控现状[J].环境昆虫学报,2018,40(2):256-267.
[19] 郑光楠,杨秀好,韦曼丽,等.广西松褐天牛成虫种群动态规律及其与林分和气象因子相关性[J].林业科学,2023,59(1):128-142.
[20] 郭雅琦,辛玉翠,陶希,等.松墨天牛成虫雌雄体型差异及蛹和成虫大小与越冬幼虫体重的关系[J].昆虫学报,2015,58(9):989-996.
[21] 陈顺立,杜瑞卿,高宛莉,等.影响武夷山景区松墨天牛种群动态变化的因素分析[J].昆虫学报,2010,53(4):427-435.
[22] 张鹏霞.森林虫害发生动态及江西松褐天牛适生性研究[D].南昌:江西农业大学,2016.

(上接第66页)

(5478): 395-396.
[4] WESTMAN W E. How much are nature's services worth?[J]. Science, 1977, 197(4307):960-964.
[5] PIMENTEL D, HARVEY C, RESOSUDARMO P, et al. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits[J]. Science, 1995, 267(5201):1117-1123.
[6] COSTANZA R, ARGE A R, GROOT R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Ecological Economics, 1998,25(1):3-15.
[7] 谢高地,鲁春霞,冷允法,等.青藏高原生态资产的价值评估[J].自然资源学报,2003,18(2):189-196.
[8] 谢高地,张彩霞,张雷明,等.基于单位面积价值当量因子的生态系统服务价值化方法改进[J].自然资源学报,2015,30(8):1243-1254.
[9] 赵同谦,欧阳志云,王效科,等.中国陆地地表水生态系统服务功能及其生态经济价值评价[J].自然资源学报,2003,18(4):443-452.
[10] 刘海,黄跃飞,朱运海.旅游活动对庐山景区植被变化的影响:基于空间信息技术方法[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019, 53(3):425-432.
[11] 张云昌,王建华.水库生态学构建中的十个基本问题[J].中国水利,2024(24):26-32.
[12] 董鸿彪.赣东最大的人工湖——洪门水库[J].企业经济,1987(4):53-54.
[13] 郑祚芳,任国玉,王耀庭,等.大型人工湖气候效应观测研究:以密云水库为例[J].地理科学,2017,37(12):1933-1941.
[14] 贾军梅,罗维,杜婷婷,等.近十年太湖生态系统服务功能价值变化评估[J].生态学报,2015,35(7):2255-2264.
[15] 咎欣,张玉玲,贾晓宇,等.永定河上游流域水生态系统服务价值评估[J].自然资源学报,2020,35(6):1326-1337.
[16] 王斌,杨艳刚,张彪,等.常州市水生态系统服务功能分析及其价值评价[J].湖南农业科学,2010(12):72-76.
[17] 孙作雷,李亚男,俞洁,等.浙江省6大重点水库生态服务功能价值评估[J].浙江大学学报(理学版),2015,42(3):353-358,364.
[18] 王欢,韩霜,邓红兵,等.香溪河河流生态系统服务功能评价[J].生态学报,2006,26(9):2971-2978.
[19] 陈仲新,张新时.中国生态系统效益的价值[J].科学通报,2000,45(1):17-22,113.
[20] 李志勇,徐颂军,徐红宇,等.湛江湾生态系统服务功能与价值评估[J].海洋环境科学,2012,31(4):567-571.

《南方林业科学》征稿简则

《南方林业科学》（双月刊）是由江西省林业局主管，江西省林业科学院和江西省林学会共同主办的国内外公开发行的林业类综合性学术期刊。本刊立足南方，面向全国，坚持理论与实践相结合，促进林业科学研究与学术交流，服务生态文明建设，突出学术性、地域性、实用性和可读性，重点报道国内外林业科学领域学术研究的新技术、新成果和新动向。主要刊登林木遗传育种、森林培育、森林保护、森林经理、森林生态、城市林业、野生动植物保护与利用、园林植物与观赏园艺、水土保持与荒漠化治理、林业工程、木材科学与技术、林产化工、林业经济管理等方面的研究论文、研究简报、综述等。

本刊优先采用有国家级或省部级等各类基金项目资助的研究成果论文。

一、来稿要求

1、内容：内容须兼具真实性、先进性、科学性和实用性，文字精炼、条理清晰。研究论文、研究简报、综述的字数一般为 5 000～7 000 字(含图表)为宜。

2、作者署名及单位：作者人数不宜过多（不超过 10 位），第一作者和通信作者均只列 1 位；作者单位应写全称，单位地址包括所在城市名及邮编。

3、中英文摘要及关键词：中文摘要一般为 200～300 字，尽可能用规范术语，一般不列出图表、公式和非公知公用的符号、缩略语；关键词为代表文章核心内容的名词术语 3～8 个；英文摘要内容应与中文摘要完全对应，写作上要符合英语语法规范，时态全部使用过去式。

4、首页脚注：收稿日期（由编辑部填写）；基金项目（资助该研究的基金项目名称和项目编号，基金项目名称应按国家有关部门规定的正式名称填写；多项基金项目应依次列出），作者简介（第一作者和通信作者简介内容包括姓名、性别、职称、学历/学位、研究方向或从事的主要工作以及 E-mail 地址）。

5、图与表：图、表要简明扼要，内容与正文相一致，先见文字后见图表；图题与表题要有中、英文对照；表格编排采用三线表，不用竖线，栏目明确，表头变量采用“量/ 单位”表示。提供图片原图或矢量图。

6、层次标题：用阿拉伯数字连续编写，层次划分一般不超过 3 级。

7、参考文献：参考文献应按在文中出现的先后顺序排列并标注，只列出公开发表的与本文有关近年主要国内外有代表性的学术期刊文献；除公开发表的各类文献和学位论文、会议文集、技术报告、专利、电子文献外，其他未公开发表的资料、文件不得作参考文献引用，只能在征得原作者同意后，在正文中引用处加括号注明资料名称；参考文献一般不少于 15 篇，具体著录格式参见 GB/T 7714－2015《信息与文献参考文献著录规则》。

8、量和单位：计量单位和单位符号一律按国家计量局颁布的《中华人民共和国法定计量单位》，书写规范，并注意区分英文字母的大小写、正斜体及上下角标。

9、拉丁学名：动植物和病虫害名称在文中第一次出现均需附拉丁学名。

来稿如不符合上述要求，编辑部将退回作者修改后再投稿。

二、投稿与稿件处理

1、投稿方式：本刊唯一收稿方式为电子邮箱收稿，邮箱账号：nflykx@163.com；本刊没有收稿平台，且未与任何单位或机构合作收稿，请作者投稿时注意甄别。

2、稿件处理：投稿时请在邮件中写明第一作者或通信作者的电话、详细通信地址及邮政编码。来稿请勿一稿多投，如 2 个月内未收到处理意见（双方另有约定除外），作者可致电编辑部咨询，如需撤稿或改投，请发送邮件告知。

3、作者投稿时请从江西省林业科学院官方网站（https://www.jxlky.cn/）下载并签署《著作权许可使用授权书》。未被录用的稿件，签署的《著作权许可使用授权书》自动失效。

4、编辑部联系电话：0791-83833691。

《南方林业科学》第七届编辑委员会

顾　　问： 唐守正　张守攻　曹福亮

主 任 委 员： 魏运华

副主任委员： 金志农　罗　勤　杜天真　胡加林　杨杰芳　李雄辉　余传源

委员（按姓氏笔画排序）：

艾　卿　戎　俊　朱培林　刘苑秋　江香梅　李　勇　杨光耀　肖复明　吴长飞　吴英豪　何齐发
余发新　宋法生　宋墩福　张　露　陈伏生　陈家宽　欧　斌　周　诚　倪修平　徐林初　郭正福
黄晓凤　龚　春　曾建华　曾哲灵　谢利玉　楼浙辉　雷小林　阙龙善　欧阳勋志

《南方林业科学》编辑部

主　　编： 杨杰芳

副 主 编： 李　勇

责任编辑： 熊彩云　颜　聪　吴巧花

南 方 林 业 科 学

NANFANG LINYE KEXUE

（双月刊 1973年创刊）

第53卷 第1期（总第289期）

2025年2月15日出版

主管单位： 江西省林业局

主办单位： 江西省林业科学院
江西省林学会

主　　编： 杨杰芳

出版单位： 《南方林业科学》编辑部

地　　址： 南昌市枫林西大街1629号江西省林业科学院内（330013）

电　　话： 0791-83833691

投稿邮箱： nflykx@163.com

网　　址： http://www.jxlky.cn

印刷单位： 江西核工印务有限公司

发行单位： 《南方林业科学》编辑部

发行范围： 公开发行

South China Forestry Science

（Bimonthly, Started in 1973）

Vol. 53, No.1(General No.289), Feb.15, 2025

Administered by: Jiangxi Forestry Administration

Sponsored by: Jiangxi Academy of Forestry
Jiangxi Forestry Society

Editor in chief: YANG Jiefang

Published by: Editorial Department of South China Forestry Science

Address: Jiangxi Academy of Forestry, No. 1629 Fenglin West Street, Nanchang 330013, China

Telephone: +86-791-83833691

E-mail: nflykx@163.com

Website: http:// www.jxlky.cn

Printed by: Jiangxi Nuclear Printing Co., Ltd.

Distributed by: Editorial Department of South China Forestry Science

Distribution area: Open Distribution

国际标准连续出版物号：ISSN 2095-9818　　国内统一连续出版物号：CN 36-1342/S　　定价：16.00元