

吉林省一级期刊
吉林省科技期刊30强
“中国知网”上网期刊
《中国学术期刊网络出版总库》收录期刊
《中文科技期刊数据库》收录期刊
《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊
“万方数据—数字化期刊群”全文上网期刊
《CAJ—规范》执行优秀期刊

ISSN 1005-7129
CN 22-1106/S

吉林林业科技

JOURNAL OF
JILIN FORESTRY SCIENCE AND TECHNOLOGY

第55卷 总第303期
2026
JILIN LINYE KEJI



目次

坡位对冠下更新幼苗细根生物量、形态特征和 NSC 含量的影响..... 赵士芳等(1)

紫椴苗木萌枝能力对平茬高度的响应 王梓默等(8)

不同环割时间对岑软 2 号油茶开花结果的影响 宋雪婷等(12)

多级半径滚球法的林木激光点云三维重构 孙 健等(16)

长白山不同海拔梯度针阔混交林资源结构特征分析 杨军元等(23)

采伐干扰对东北天然次生近熟林凋落物分解的影响 孙 越等(28)

小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲幼虫防治效果的研究 修冬莹等(33)

吉林向海国家级自然保护区白枕鹤繁殖与迁徙栖息地特征研究 李红旭(39)

淄博市森林草原防灭火一体化建设策略探讨 宋媛媛等(44)

本刊声明 (11)

CONTENTS

Effects of Slope Position on Fine Root Biomass, Morphological Characteristics and NSC content of
Regenerated Seedlings Under Canopy ZHAO Shifang et al. (1)

Effect of Stumping Height on Sprouting of *Tilia amurensis* Seedlings WANG Zimo et al. (8)

Effects of Different Girdling Stages on Flowering and Fruiting of *Camellia oleifera* ‘Cenruan 2’
..... SONG Xueting et al. (12)

Three-dimensional Reconstruction of Laser Point Clouds of Forest Tree Using Multi-level Radius
Ball Pivoting Algorithm SUN Jian et al. (16)

Analysis on Resource Structure Characteristics of Coniferous and Broad-leaved Mixed Forests at
Different Altitude Gradients in Changbai Mountain YANG Junyuan et al. (23)

Effects of Cutting Disturbance on Litter Decomposition in Natural Secondary Near-mature Forests in
Northeast China SUN Yue et al. (28)

Study on the Control Efficacy of Combined Application of *Steinernema carpocapsae* and Matrine
against *Curculio dieckmanni* Larvae XIU Dongying et al. (33)

Characteristics of Breeding and Migratory Habitat of *Grus vipio* in Jilin Xianghai National Nature
Reserve LI Hongxu (39)

Discussion on the Integrated Construction Strategy of Forest and Grassland Fire Prevention and
Suppression in Zibo City SONG Yuanyuan et al. (44)

Statement (11)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.001

文章编号:1005-7129(2026)05-0001-07

中图分类号:S718.43

文献标识码:A

坡位对冠下更新幼苗细根生物量、 形态特征和 NSC 含量的影响

赵士芳¹, 王清涛², 夏秀雪³, 朱佳恒⁴, 赵晓璐³, 李 岩⁴

(1. 长春市净月潭实验林场, 吉林 长春 130117; 2. 长春市儿童公园, 吉林 长春 130041; 3. 吉林省重点国有林技术服务中心, 吉林 长春 130022; 4. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033)

摘 要:本研究以天然次生林为研究对象,在不同坡位下以红松、水曲柳、胡桃楸、紫椴 4 种珍贵乡土树种进行造林,探讨坡位对冠下更新幼苗细根生物量、形态特征和非结构性碳水化合物(NSC)含量的影响。4 种冠下更新幼苗细根生物量随根序的增加呈逐渐升高的趋势,且均在下坡位最大。4 种冠下更新幼苗细根比根长、比根表面积随根序的增加呈降低的趋势,组织密度除红松随根序的增加呈降低的趋势外其余树种均呈升高的趋势,各指标均在上坡位最大。4 种冠下更新幼苗细根 NSC 含量随根序的增加呈先降低后升高的趋势,且均在上坡位最大。采用综合评比法对不同坡位细根生物量及形态特征进行定量评价,上坡位立地条件更有利于 4 个树种细根的形态构建与生理代谢进程,而下坡位更有利于细根生物量的积累。本研究可为天然次生林的生态恢复与适宜树种选择提供科学依据。

关键词:坡位;冠下更新幼苗;细根生物量;形态特征;非结构性碳水化合物

Effects of Slope Position on Fine Root Biomass, Morphological Characteristics and NSC content of Regenerated Seedlings Under Canopy

ZHAO Shifang¹, WANG Qingtao², XIA Xiuxue³, ZHU Jiaheng⁴, ZHAO Xiaolu³, LI Yan⁴

(1. Jingyuetan Experimental Forest Farm of Changchun City, Changchun 130017, China; 2. Changchun Children's Park, Changchun 130041, China; 3. Key State-owned Forest Technology Service Center of Jilin Province, Changchun 130022, China; 4. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The natural secondary forest was taken as the research object in this study, and four precious native tree species, namely *Pinus koraiensis*, *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica* and *Tilia amurensis*, were planted at different slope positions to explore the effects of slope position on the fine root biomass, morphological characteristics and non-structural carbohydrate (NSC) content of regenerated seedlings under canopy. The fine root biomass of regenerated seedlings increased gradually with the rise of root order, and that was the maximum at the lower slope. With the rise of root order, the specific root length and specific root surface area of the fine root of regenerated seedlings decreased. Those were the maximum values at the upper slope. With the rise of root order, the root tissue density of *Fraxinus mandshurica* seedlings, *Juglans mandshurica* seedlings and *Tilia amurensis* seedlings increased, while the root tissue density of *Pinus koraiensis* seedlings decreased. That was the maximum at the upper slope. The NSC content in the fine root of regenerated seedlings decreased first and then increased with the rise of root order, and that was the maximum at the upper slope. The comprehen-

收稿日期:2026-04-02

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20240402031GH)

第一作者:赵士芳(1978—),女,高级工程师,主要从事林业研究,E-mail:1562792029@qq.com。

通信作者:李岩(1978—),女,研究员,主要从事林业研究,E-mail:liyan_j2004@163.com。

sive evaluation method was used to quantitatively evaluate the fine root biomass and morphological characteristics at different slope positions. The site condition of the upper slope was more conducive to the morphological construction and the physiological metabolic process of the fine root, while that of the lower slope was more conducive to the accumulation of the fine root biomass. This study could provide the scientific basis for the ecological restoration and the selection of suitable tree species of natural secondary forests.

Keywords: slope position; regenerated seedlings under canopy; fine root biomass; morphological characteristics; non-structural carbohydrate

细根是植物吸收水分和养分的重要器官,在合成有机物、贮存能量方面发挥重要作用^[1]。其具有极强的可塑性且对外界环境的变化极为敏感^[2, 3]。细根形态特征是根系类型、结构以及分布的综合表现^[4],其中细根比根长和比根表面积可表征植物根系生长分布并推断植物的资源获取策略^[5, 6]。细根对环境中水分、养分等因子的变化较为敏感^[7],对细根形态特征的分析研究有利于深入了解细根对环境因素的适应性^[8, 9]。细根的生物量、形态特征等影响植物的生长和生物量积累,目前相关研究主要集中在植物细根生物量及其形态特征与林分类型、演替阶段或林龄、生物多样性和环境因子等因素之间的关系^[10-15]。

非结构性碳水化合物(NSC)是植物重要的碳储存形式,在植物适应环境因素和生长代谢活动中发挥关键作用^[16]。NSC包括可溶性糖和淀粉,两者可在不同时间尺度上相互转化^[17],影响植物的生存与适应性^[18],是决定植物生长能力的关键内在因素。目前,关于NSC的研究主要集中在干旱、低温、养分限制和种间竞争等条件对其的影响^[19-23]。坡位影响光照、温度、水分和养分,从而影响细根生物量积累和形态特征^[24, 25]。因此,探讨根系NSC在不同坡位下的适应性变化有助于更加全面系统地阐明植物在不同立地条件下的生存策略。

目前,有关坡位对冠下更新幼苗细根生物量和形态特征的影响的相关研究很少。本研究以天然次生林为研究对象,在不同坡位下栽植乡土树种幼苗,开展冠下人工幼苗更新,探讨更新幼苗的细根生物量、形态特征和NSC含量对坡位的响应机制,为促进次生林林分健康稳定的正向演替提供理论支撑。

1 研究区概况

研究区地处吉林省蛟河市前进乡(地理位置127°47'40" E、43°53'49" N),属长白山系张

广才岭余脉,地形呈北方高、南方较为平缓的态势。研究区平均海拔为506 m,处于中纬度北温带,属于受大陆季风影响的山地气候。夏季炎热多雨,冬季漫长寒冷,全年平均气温为3.9℃,年降水量为700~800 mm,多集中在6—8月,无霜期120~150 d。研究区土壤类型为暗棕壤。植被属长白山植物区系,主要林分类型为天然次生针阔混交林,植被种类复杂。乔木树种主要有白桦(*Betula platyphylla*)、白牛槭(*Acer mandshuricum*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、山杨(*Populus davidiana*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、红松(*Pinus koraiensis*)、红皮云杉(*Picea koraiensis*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer pictum* subsp. *mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、稠李(*Prunus padus*)等,灌木主要有东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、刺五加(*Eleutherococcus senticosus*)、毛榛(*Corylus mandshurica*)等,草本植物主要有蚊子草(*Filipendula digitata*)、山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)、美汉草(*Meehanian urticifolia*)、东北羊角芹(*Aegopodium alpestre*)、白花碎米荠(*Cardamine leucantha*)、荨麻(*Urtica fissa*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

本研究在天然次生林内设置试验样地,主林层高度20~26 m,树种组成为色木槭3白牛槭2春榆1胡桃楸1水曲柳1山杨1稠李+紫椴+红松-蒙古栎-,坡向东坡。在上坡位、中坡位、下坡位各布设3块样地(50 m×50 m),不同坡位样地间隔大于100 m,同一坡位样地间隔大于50 m,样地基本情况见表1。造林苗木为4年生红松、1年生胡桃楸、1年生水曲柳、1年生紫椴,选择相应的I级苗且保证同一树种其基径和苗高基本相同。每个样地内采用随机混交方式分别补植4种幼苗各40株。

表 1 样地基本情况
Tab. 1 Basic information of the site

样地编号	坡位	土层厚度/cm	海拔/m	坡度/°	郁闭度
1	上坡	45	496	10	0.62
2		56	507	8	0.57
3		55	499	11	0.52
4		48	465	12	0.65
5	中坡	57	470	14	0.55
6		49	468	15	0.52
7		56	436	15	0.63
8	下坡	58	431	17	0.53
9		54	429	14	0.51

2.2 试验材料

造林第 2 年,每个样地内 4 个树种分别选取 9 株树干通直、长势良好、无病虫害及机械损伤的更新幼苗对其进行全株挖取,挖取过程中确保各幼苗根系保持完整,同时在不损伤根系的情况下清理根系上的土壤等残留物,编号装入自封袋带回实验室。将取回的植株分解出根部,去掉较大杂质,用 2~3 ℃ 的蒸馏水小心清洗根系上的土壤颗粒及较小杂质,然后按照 Pregitzer 等^[26] 相关研究中描述的程序进行根系分级处理。

2.3 指标测定

每个样地每个树种随机取 3 株分级后的根置于烘箱中 75 ℃ 烘干至恒质量,测定各级根生物量。同样方法取 3 株分级后的根系放入装有蒸馏水的培养皿中,进行根系形态学分析,将根系样本根据分枝顺序用镊子小心解剖,然后使用 Expression 10000XL 1.0 根系扫描仪(Epson Telford Ltd.,Telford,UK) 进行扫描。细根的平均直径、总长度和体积通过根系分析软件(Re-gent Instruments, Inc., Québec, Canada) 进行测定,计算比根长、比根表面积和根组织密度。

在剩余的根系中,每个样地每个树种按分级随机各取根样本(0.100 0 g)放入 10 mL 离心管中,加入 2 mL 80 % 的乙醇。将混合物放入 80 ℃ 的水浴中振荡 30 min,然后以 4 000 r·min⁻¹ 离心 5 min。对沉淀物进行 2 次 80 % 乙醇的提取,保留上清液,合并存储于-20 ℃ 以备可溶性糖测定。去除乙醇后,从沉淀物中提取淀粉。向沉淀物中加 2 mL 蒸馏水并煮沸 15 min。冷却至室温后,加入 2 ml 9.2 mol·L⁻¹ 的高氯酸,振荡 15 min。随后加入 4 mL 蒸馏水,再次以 4 000 r·min⁻¹ 离心 5 min。使用

2 mL 4.6 mol·L⁻¹ 的高氯酸再次提取。保留上清液,合并后存储于-20 ℃ 以备淀粉测定。可溶性糖和淀粉采用蒽酮-硫酸比色法在吸光度 625 nm 波长下进行测定。可溶性糖含量通过基于葡萄糖标准溶液的回归方程计算,淀粉含量通过将葡萄糖含量乘以转换因子 0.9 来计算。NSC 含量为二者的加和。

2.4 综合评比指数计算

采用极差标准化法对原始数据进行无量纲化处理,消除量纲影响。采用等权重法分配各指标权重,即每个评价指标的权重均为 0.2,以此避免主观赋权带来的偏差。采用线性加权求和法计算各树种在不同坡位下的综合评比指数,计算公式如下:

$$Q_i = \sum (X_{ij}' \times W_j)$$

式中: Q_i 为第 i 个树种在某一坡位下的综合评比指数(值域 0~1); X_{ij}' 为第 i 个树种第 j 项指标的标准化值; W_j 为第 j 项指标的权重(0.2)。

2.5 数据处理与分析

本研究所有数据统计分析均采用 SPSS 19.0 软件进行,采用单因素方差分析法(One-Way ANOVA)分析坡位之间的差异显著性($P < 0.05$)。

3 结果与分析

3.1 坡位对更新幼苗细根生物量的影响

由表 2 可知,不同坡位细根生物量存在差异。4 种冠下更新树种细根生物量随根序的增加整体呈逐渐升高的趋势,5 级根生物量显著高于其他级别根系,1 级根生物量最低。红松各级根生物量均表现为下坡>上坡>中坡,中坡位细根生物量最低;水曲柳、胡桃楸和紫椴则整体表现为下坡>中坡>上坡,上坡位细根生物量最低。

表 2 不同坡位细根生物量

Tab. 2 Fine root biomass at different slope positions

树种	坡位	细根生物量/(g·m ⁻²)				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
红松	上坡	0.586 9±0.002 5dC	0.901 2±0.005 6dC	1.356 9±0.015 6cC	1.965 4±0.015 9bC	2.896 3±0.025 8aC
	中坡	0.576 8±0.004 2cC	0.865 2±0.002 6bcC	1.297 8±0.014 8bC	1.730 4±0.026 5bC	2.739 8±0.025 6aC
	下坡	0.612 3±0.005 8dC	1.112 5±0.003 5cC	1.468 9±0.015 6cC	2.156 8±0.021 4bC	3.123 4±0.024 7aC
水曲柳	上坡	1.268 4±0.004 2cB	1.854 6±0.005 6cB	2.469 1±0.014 7cB	3.654 8±0.015 6bB	5.413 2±0.025 8aB
	中坡	1.492 0±0.005 6dA	2.238 2±0.004 5dA	3.357 5±0.013 6cA	4.476 4±0.024 7bA	7.087 5±0.023 6aA
	下坡	1.654 8±0.008 9dA	2.456 8±0.012 5cdA	3.268 9±0.014 8cA	4.856 1±0.015 8bA	7.258 9±0.031 0aA
胡桃楸	上坡	1.458 2±0.012 4dA	2.136 5±0.015 6dA	3.154 6±0.015 9cA	4.265 8±0.023 5bB	6.654 2±0.024 1aB
	中坡	1.632 8±0.012 6dA	2.449 2±0.014 8cA	3.673 8±0.019 6bA	4.898 4±0.018 5bA	7.755 8±0.025 8aA
	下坡	1.856 4±0.012 5dA	2.795 4±0.015 8dA	4.056 2±0.012 5cA	5.436 8±0.025 8bA	8.557 4±0.019 6aA
紫椴	上坡	1.125 8±0.015 6cB	1.654 8±0.014 5cB	2.475 6±0.016 5bcB	3.354 8±0.019 8bB	5.225 6±0.025 8aB
	中坡	1.255 2±0.025 4dB	1.882 8±0.021 1dB	2.824 2±0.014 8cA	3.765 6±0.025 6bB	5.962 2±0.024 7aB
	下坡	1.456 8±0.015 8dA	2.115 4±0.029 8dA	3.258 4±0.021 5cA	4.268 9±0.022 2bB	6.651 5±0.019 9aB

注:同行不同小写字母表示不同根系等级之间差异显著($P < 0.05$);同列不同大写字母表示不同坡位之间差异显著($P < 0.05$)。下同。

3.2 坡位对更新幼苗细根形态特征的影响

由表 3 可知,不同坡位细根比根长存在差异。4 种冠下更新树种细根比根长随根序的增加呈降低的趋势,1 级根、2 级根、3 级根显著高于 4 级根、5 级根,符合根系功能性状的普遍规律。4 种冠下更新树种细根比根长在各级根内均表现为上坡>中坡>下坡。

表 3 不同坡位细根比根长

Tab. 3 Specific root length at different slope positions

树种	坡位	比根长/(m·g ⁻¹)				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
红松	上坡	45.26±4.32aA	30.64±2.56bA	18.59±2.33cA	8.56±0.95dA	2.11±0.25dA
	中坡	40.58±3.25aA	25.47±2.36bA	15.98±1.58cA	6.54±0.64dA	1.57±0.13dA
	下坡	38.59±3.16aA	22.14±3.21bB	12.54±1.47cA	5.64±0.85dA	1.28±0.09dA
水曲柳	上坡	49.66±4.56aA	30.42±3.45bA	17.52±1.95cA	7.14±0.33dA	2.12±0.16dA
	中坡	48.25±3.26aA	29.65±2.58bA	15.46±1.64cA	6.25±0.25dA	1.25±0.18dA
	下坡	45.61±3.02aA	23.51±2.71bB	11.47±2.58cB	4.41±0.84dB	1.17±0.42dA
胡桃楸	上坡	44.68±2.58aA	29.68±1.59bA	15.87±2.69cA	6.05±0.71dA	1.48±0.26dA
	中坡	42.64±4.21aA	28.54±3.65bA	14.65±2.31cA	5.58±0.64dA	1.35±0.31dA
	下坡	39.56±4.56aA	26.95±2.85bA	13.58±2.47cA	5.51±0.85dA	1.11±0.33dA
紫椴	上坡	41.58±3.25aA	27.59±1.69bA	15.69±2.22cA	7.21±0.45dA	1.35±0.14dA
	中坡	39.55±1.25aA	26.87±1.66bA	13.45±1.11cA	5.94±0.65dA	1.22±0.16dA
	下坡	37.21±2.68aA	25.11±1.32bA	11.25±1.55cA	3.33±0.22dB	1.12±0.22dA

由表 4 可知,不同坡位细根比根表面积存在差异。4 种冠下更新树种细根比根表面积随根序的增加呈降低的趋势,均为 1 级根比根表面积最大,5 级根比根表面积最小,符合根系越

细根比根表面积越大的生物学规律。4 种冠下更新树种细根比根表面积在各级根内均表现为上坡>中坡>下坡。

表 4 不同坡位细根比根表面积
Tab. 4 Specific root surface area at different slope positions

树种	坡位	比根表面积/(cm ² · g ⁻¹)				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
红松	上坡	350. 25±25. 16aC	245. 87±15. 94bC	186. 17±10. 25cB	108. 52±21. 35dC	34. 59±9. 25eC
	中坡	324. 58±22. 13aC	225. 61±16. 57bC	168. 49±12. 58cB	91. 25±12. 58dC	30. 55±9. 05eC
	下坡	284. 29±19. 25aC	205. 31±17. 95bC	142. 57±13. 57cB	80. 45±13. 64dC	25. 33±5. 06eC
水曲柳	上坡	542. 64±18. 46aB	381. 26±21. 54bB	264. 51±12. 98cA	152. 33±13. 55dB	61. 22±13. 24eB
	中坡	492. 56±13. 65aB	350. 24±22. 36bB	246. 39±20. 35cA	138. 46±16. 95dB	56. 21±9. 68eB
	下坡	475. 64±20. 13aB	331. 28±13. 69bB	236. 11±19. 68cA	118. 54±11. 21dBC	53. 47±8. 18eB
胡桃楸	上坡	521. 51±18. 55aB	394. 51±16. 97bB	274. 16±21. 58cA	156. 99±13. 25dB	55. 24±7. 16eB
	中坡	485. 28±16. 54aB	359. 64±16. 58bB	258. 13±22. 21cA	146. 27±22. 13dB	50. 21±5. 96eB
	下坡	425. 64±17. 95aB	333. 58±17. 54bB	243. 69±34. 15cA	134. 56±13. 65dB	48. 55±7. 98eB
紫椴	上坡	635. 27±34. 56aA	478. 96±23. 65bA	336. 54±23. 65cA	198. 46±15. 96dA	75. 63±6. 89eA
	中坡	589. 61±23. 55aA	425. 31±22. 59bAB	305. 64±29. 50cA	180. 25±16. 46dA	70. 44±7. 55eA
	下坡	554. 21±19. 86aB	401. 36±35. 46bB	291. 54±26. 57cA	170. 22±11. 25dA	67. 55±5. 22eA

由表 5 可知,不同坡位细根组织密度存在差异。水曲柳、胡桃楸和紫椴细根组织密度随根序的增加呈升高的趋势,均为 1 级根细根组织密度最小,5 级根细根组织密度最大。红松

细根组织密度则随根序的增加呈降低的趋势。4 种冠下更新树种细根组织密度在各级根内均表现为上坡>中坡>下坡。

表 5 不同坡位细根组织密度
Tab. 5 Fine root tissue density at different slope positions

树种	坡位	组织密度/(g · cm ⁻³)				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
红松	上坡	0. 312±0. 032aA	0. 284±0. 031aB	0. 265±0. 035aC	0. 241±0. 026aC	0. 225±0. 026aC
	中坡	0. 286±0. 024aA	0. 263±0. 028aB	0. 241±0. 026aC	0. 228±0. 0. 25aC	0. 204±0. 017aC
	下坡	0. 264±0. 026aB	0. 249±0. 027aBC	0. 227±0. 019aC	0. 214±0. 021aC	0. 186±0. 035bC
水曲柳	上坡	0. 287±0. 031bA	0. 405±0. 019aA	0. 423±0. 018aA	0. 461±0. 031aA	0. 541±0. 038aA
	中坡	0. 261±0. 039cB	0. 375±0. 011bA	0. 384±0. 024bB	0. 419±0. 033abA	0. 496±0. 028aA
	下坡	0. 235±0. 028cC	0. 343±0. 005bB	0. 356±0. 036bB	0. 378±0. 028bAB	0. 455±0. 029aB
胡桃楸	上坡	0. 269±0. 016cB	0. 301±0. 016bB	0. 358±0. 019bB	0. 389±0. 019aA	0. 433±0. 021aB
	中坡	0. 245±0. 019bB	0. 279±0. 032abB	0. 324±0. 009aBC	0. 351±0. 017aB	0. 396±0. 015aB
	下坡	0. 222±0. 020bC	0. 255±0. 033abB	0. 291±0. 028abC	0. 314±0. 015aB	0. 357±0. 024aBC
紫椴	上坡	0. 217±0. 018cC	0. 258±0. 024cB	0. 309±0. 027bC	0. 345±0. 025aB	0. 383±0. 035aB
	中坡	0. 192±0. 028bC	0. 234±0. 041bBC	0. 275±0. 009bC	0. 314±0. 031aB	0. 356±0. 022aBC
	下坡	0. 176±0. 009bC	0. 210±0. 028bC	0. 241±0. 034abC	0. 288±0. 022aC	0. 321±0. 011aC

3.3 坡位对更新幼苗细根 NSC 含量的影响

由表 6 可知,不同坡位细根 NSC 含量存在差异。4 种冠下更新树种随着根序增加细根 NSC 含量呈先降低后升高的趋势,1 级根、2 级

根、3 级根 NSC 含量较高,4 级根略有下降,5 级根因可溶性糖补充有所回升。4 种冠下更新树种细根 NSC 含量各级根均表现为上坡>中坡>下坡。

表 6 不同坡位细根 NSC 含量

Tab. 6 Fine root NSC content at different slope positions

树种	坡位	NSC 含量/(mg · g ⁻¹)				
		1 级根	2 级根	3 级根	4 级根	5 级根
红松	上坡	105.67±8.56aA	102.89±5.26aA	95.68±3.69aA	85.22±2.56aA	92.35±2.68aA
	中坡	102.34±7.56aA	96.34±4.53aA	92.34±3.57aA	79.58±1.98bA	86.59±2.04aA
	下坡	95.68±8.21aA	90.47±5.26aAB	86.57±3.48aB	77.43±1.56bA	81.12±2.08abAB
水曲柳	上坡	103.56±7.56aA	95.78±4.36aA	91.22±3.67aA	79.26±1.85bA	84.44±1.56abA
	中坡	95.64±4.23aA	91.27±4.58aAB	84.57±3.72aB	73.65±1.74bAB	82.11±1.85aAB
	下坡	91.26±3.25aAB	89.96±3.54aAB	78.34±3.85bB	61.25±1.96cB	76.21±1.28bC
胡桃楸	上坡	90.45±3.68aAB	86.47±3.69aB	81.75±2.96aB	69.37±1.38cB	75.55±1.36bC
	中坡	85.37±3.48aB	82.37±3.37aB	74.59±2.56bC	62.35±1.85cB	71.33±1.58bC
	下坡	81.29±2.57aB	76.49±3.25bBC	71.11±2.35bC	58.67±1.67cB	66.54±2.01cC
紫椴	上坡	85.69±2.69aB	80.79±2.68aB	76.55±3.01bBC	62.58±1.75cB	71.16±1.58bC
	中坡	79.69±2.48aB	74.58±2.48aC	70.25±3.02aC	59.46±1.46bB	64.59±1.76bC
	下坡	74.33±2.65aC	71.11±2.11aC	65.35±1.58bC	55.26±1.32cC	62.33±1.66bC

3.4 综合评比指数计算

采用细根生物量、比根长、比根表面积、细根组织密度和细根 NSC 含量为评价指标,通过综合评比法对不同坡位细根生物量及形态特征进行定量评价。红松、水曲柳、胡桃楸和紫椴的

综合评比指数均表现为上坡位最高,中坡位次之,下坡位最低。即在研究区域内,上坡位立地条件更有利于 4 个树种细根的形态构建(比根长、比根表面积、细根组织密度)与生理代谢(NSC 含量)进程。

表 7 不同树种不同坡位综合评比指数

Tab. 7 Comprehensive evaluation index of different tree species at different slope positions

树种	综合评比指数		
	上坡	中坡	下坡
红松	0.8786	0.3794	0.2000
水曲柳	0.7923	0.5817	0.2011
胡桃楸	0.7975	0.5132	0.1998
紫椴	0.7951	0.4648	0.2007

4 讨论与结论

本研究中,不同坡位细根生物量存在差异。4 种冠下更新树种细根生物量随根序的增加呈逐渐增加的趋势,高序级根主要承担根系支撑功能,生物量较高。红松各级根生物量表现为下坡>上坡>中坡,中坡位最低,可能与中坡位土壤水分或养分限制有关。水曲柳、胡桃楸和

紫椴则整体表现为下坡>中坡>上坡,上坡位生物量最低,主要是因为上坡位水分含量较低导致细根比例降低,下坡位水分充足有利于促进细根的生长,同时也反映出其对下坡位土壤的适应性。

比根长、比根表面积和细根组织密度是细根的形态构建表征,同时是影响根系吸水效率和能力的重要功能性状参数,一般拥有更小直

径、更大比根长的细根具有更高的养分吸收效率^[27]。本研究中不同坡位细根比根长、比根表面积和组织密度均存在差异,4种冠下更新树种细根比根长、比根表面积随根序的增加呈降低的趋势,组织密度除红松随根序的增加呈降低的趋势外,其余树种均呈升高的趋势,这种变化趋势符合根系功能性状的普遍规律。4种冠下更新树种细根比根长、比根表面积和组织密度在各级根内均表现为上坡>中坡>下坡,主要是因为上坡位水分含量较少导致根系形态可塑性增强,促进了低序级根比根长、比根表面积和组织密度的增加。

相关研究指出低序级根可能比高序级根获得更大的碳投资,低序级根的主要作用是吸收水分和养分,而高序级根负责运输养分并支撑整个根^[28, 29]。本研究不同坡位细根 NSC 含量存在差异,随着根序增加细根 NSC 含量呈先降低后升高的趋势,因高序级根代谢活动减弱,碳分配减少所致,1级根、2级根、3级根 NSC 含量较高,4级根略有下降,5级根因可溶性糖补充有所回升。4种冠下更新树种细根 NSC 含量在各级根均表现为上坡>中坡>下坡,主要是因为上坡位光照充足促进了光合产物的积累,下坡位 NSC 含量受到水分胁迫的影响,明显低于上坡位。

综上所述,坡位通过影响土壤环境、光照等对冠下更新幼苗细根的生物量积累、形态特征及 NSC 含量产生调控效应。通过综合评比法对不同坡位细根生物量、形态特征及 NSC 含量进行定量评价,上坡位立地条件更有利于4个树种细根的形态构建与生理代谢进程,而下坡位更有利于细根生物量的积累,这为天然次生林冠下更新造林最优坡位立地条件选择奠定了基础,并为次生林生态恢复提供了科学依据。

参考文献

[1] Weihs B J, Heuschele D J, Tang Z, et al. The state of the art in root system architecture image analysis using artificial intelligence: a review[J]. *Plant Phenomics*, 2024, 6: 0178.

[2] Carmona C P, Bueno C G, Tousaint A, et al. Fine-root traits in the global spectrum of plant form and function[J]. *Nature*, 2021, 597(7878): 683-687.

[3] 张运, 宋崇林, 陈健, 等. 10年生杉木人工林叶片和细根功能性状对土壤磷添加的响应[J]. 林业科

学研究, 2022, 35(4): 23-32.

[4] Cao Cheng, Yang Pei, Tang Chaoyuan, et al. Morphological characteristic extraction of unopened cotton bolls using image analysis and geometric modeling methods[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2025, 232: 110094.

[5] Metcalfe D B, Meir P, Aragão L E O C, et al. The effects of water availability on root growth and morphology in an Amazon rainforest[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 189-199.

[6] 崔家宝, 魏晨, 王宁, 等. 高寒草地不同径级根形态对围封年限的响应[J]. 生态学报, 2023, 43(8): 3327-3338.

[7] 高祥, 丁贵杰, 翟帅帅, 等. 不同林分密度马尾松人工林根系生物量及空间分布研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, 34(6): 71-75.

[8] 范严伟, 史金红, 唐兴鹏, 等. 不同灌溉防护措施下梭梭根系生物量及形态特征[J]. 生态学报, 2024, 44(16): 7278-7289.

[9] Kalr A, Goel S, Elias A A. Understanding role of roots in plant response to drought: way forward to climate-resilient crops[J]. *The Plant Genome*, 2024, 17(1): e20395.

[10] 耿鹏飞, 金光泽. 小兴安岭4种森林类型细根生物量的时空格局[J]. 林业科学, 2016, 52(6): 140-148.

[11] 张云宇, 孙晓凤, 张临峰, 等. 帽儿山温带落叶阔叶林细根生物量、生产力和周转率[J]. 应用生态学报, 2021, 32(9): 3053-3060.

[12] 高国强, 程云环, 王政权, 等. 林分年龄对落叶松人工林细根生物量的影响[J]. 温带林业研究, 2019, 2(3): 18-24.

[13] 王静波, 于水强, 郝倩薇, 等. 不同林龄亚热带次生林细根生物量和形态分布差异[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 38-46.

[14] 杨玉盛, 陈光水, 何宗明, 等. 杉木观光木混交林和杉木纯林群落细根生产力、分布及养分归还(英文)[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(3): 223-233.

[15] 时应贵, 熊德成, 叶旺敏, 等. 土壤和大气增温对杉木幼树细根生物量和叶片性状的影响[J]. 生态学杂志, 2021, 40(7): 1916-1923.

[16] Hartmann H, Trumbore S. Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees - from what we can measure to what we want to know[J]. *New Phytologist*, 2016, 211(2): 386-403.

[17] Dietze M C, Sala A, Carbone M S, et al. Nonstructural carbon in woody plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2014, 65: 667-687. (下转第15页)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.002

文章编号:1005-7129(2026)05-0008-04

中图分类号:S792.36

文献标识码:A

紫椴苗木萌枝能力对平茬高度的响应

王梓默¹, 汤政泽², 杨军元², 林士杰¹, 易 华², 朱红波²

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 本文以 8 年生紫椴扦插苗为研究对象, 设置 4 种平茬高度(0 cm、5 cm、10 cm 和 15 cm), 研究平茬高度对紫椴苗木萌枝能力的影响, 探索紫椴复幼较佳平茬高度。结果表明, 平茬高度为 5 cm 时紫椴萌条数量和成活率最高, 萌条长度和基径最大。本研究通过平茬复幼克服成熟紫椴年龄效应, 可为紫椴优质资源的规模化繁育提供技术参考。

关键词: 紫椴; 平茬; 高度; 萌条

Effect of Stumping Height on Sprouting of *Tilia amurensis* Seedlings

WANG Zimo¹, TANG Zhengze², YANG Junyuan², LIN Shijie¹, YI Hua², ZHU Hongbo²

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: Taking 8-year-old *Tilia amurensis* seedlings propagated by cuttings as research materials, four stumping heights of 0 cm, 5 cm, 10 cm and 15 cm were set up. The effect of the stumping height on the sprouting capacity of *T. amurensis* seedlings was studied to explore the optimal stumping height for rejuvenation of *T. amurensis* seedlings. The results showed that when the stumping height was 5 cm, the number, survival rate, length and basal diameter of sprouts were the highest. In this study, *T. amurensis* seedlings were rejuvenated by stumping to overcome the age effect of mature seedlings. That could provide technical reference for large-scale breeding of high-quality resources of *T. amurensis*.

Keywords: *Tilia amurensis*; stumping; height; sprout

紫椴(*Tilia amurensis*)是珍贵的用材树种、优良的绿化树种和蜜源植物,为国家二级重点保护野生植物^[1, 2]。近年来,过度采伐及生境破坏致使其天然优良资源匮乏。传统实生繁殖遗传性状不稳定,导致苗木性状变异。与之相比较,无性繁殖能够稳定遗传亲本的优良特性,可在较短时间内获得大量优质的苗木资源,促进其产业发展。

张亚君等^[3]研究发现,紫椴年龄越大,其

枝条上芽的分化能力越差,年龄效应已成为制约成熟紫椴优良单株离体快繁的关键技术难题,克服年龄效应是当前紫椴良种优质资源快繁与推广应用的关键。复幼可使成熟树木重新获得某些幼态性状,可显著提升林木无性繁殖效率^[4-7]。相关研究表明,平茬可促进萌芽更新,使水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)^[8]、湿加松(*Pinus elliotii* × *P. caribaea*)^[9]母本保持幼态特性。平茬受诸多因素影响,其中平茬高度是

收稿日期:2026-06-18

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20250601059RC)

第一作者:王梓默(1991—),女,副研究员,硕士研究生,主要从事森林生态及林木遗传育种研究,E-mail:243217015@qq.com。

通信作者:朱红波(1976—),男,正高级工程师,主要从事森林培育、森林经理研究,E-mail:78574843@qq.com。

可控制因子之一^[10]。适当的平茬高度可显著提高水曲柳^[8]、沙拐枣 (*Calligonum mongolicum*)^[11]的萌枝能力,促进株高、地径、冠幅等指标的增长。目前,关于紫椴复幼的研究很少,关于平茬高度对紫椴萌条生长的影响鲜见报道。

本研究以 8 年生紫椴扦插苗为研究对象,研究平茬高度对紫椴萌条数量、长度、基径等指标的影响,旨在筛选出紫椴复幼较佳平茬高度,通过平茬复幼解决成熟紫椴的年龄效应问题并提升其无性繁殖能力,为其优质资源规模化繁育和推广应用提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地为吉林省林业科学研究院伊通实验基地(地理位置 124°49′ E、43°35′ N),位于吉林省四平市,该区域属温带大陆性半湿润季风气候,年平均日照时数为 2 688 h,年平均气温为 4.8 ℃,年平均降水量为 615 mm,无霜期约为 138 d。试验地地势平缓,土壤类型以暗棕色森林土为主。

1.2 试验材料与方法

供试材料为无病虫害、个体大小基本一致的 8 年生紫椴扦插苗(2018 年 4 月栽植于吉林省林业科学研究院伊通实验基地),株行距

1.0 m × 1.0 m,常规田间管理。2025 年 4 月 10 日进行平茬,平茬高度设置为 0 cm (A)、5 cm (B)、10 cm (C)、15 cm (D),茬口平整光滑,每个处理 5 株苗木,重复 3 次。

1.3 生长指标测定

平茬后 40 d、70 d、100 d、130 d 定期测定萌条(长度>1.5 cm 为有效萌条)数量、长度及基径,平茬后 160 d 仅测定萌条数量以计算萌条成活率。

1.4 数据分析

采用 Excel 2007 软件进行数据整理、分析、作图,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和 Duncan 多重比较。

2 结果与分析

2.1 平茬高度对紫椴萌条生长状况的影响

紫椴萌条生长指标如表 1 所示,平茬高度对萌条数量、长度、成活率影响显著 ($P < 0.05$),对萌条基径影响不显著 ($P > 0.05$)。萌条数量方面,B>C>D>A,B 显著高于其他处理,A、C、D 之间差异不显著。萌条长度方面,B>A>C>D,B 与 A 差异不显著,但 B 显著大于 C 和 D,D 显著小于其他处理。萌条基径方面,B>A>C>D,各处理之间差异不显著。萌条成活率方面,B>A>D>C,A 与其他处理间差异均不显著,B 显著大于 C 和 D,C、D 之间差异不显著。

表 1 平茬高度对紫椴萌条生长的影响

Tab. 1 Effect of stumping height on the growth of *Tilia amurensis* sprouts

编号	平茬高度/cm	萌条数量/个	萌条长度/cm	萌条基径/mm	萌条成活率/%
A	0	7.56 ± 0.34b	80.26 ± 7.44ab	6.55 ± 0.52a	82.72 ± 2.38ab
B	5	11.77 ± 0.82a	85.68 ± 5.28a	6.80 ± 1.04a	87.67 ± 3.09a
C	10	7.71 ± 0.40b	72.24 ± 6.06b	6.11 ± 0.94a	76.47 ± 6.49b
D	15	7.67 ± 0.63b	59.66 ± 6.89c	5.63 ± 0.12a	76.72 ± 2.03b

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示指标在各处理间差异显著($P < 0.05$)。

2.2 平茬高度对紫椴萌条数量、长度及基径生长进程的影响

2.2.1 平茬高度对紫椴萌条数量增长进程的影响

由图 1 可见,平茬后 0~40 d,萌条开始萌生;平茬后 40~70 d,萌条数量快速增长,各处理的增长幅度均较大,处理 B 的增长幅度最大,平茬后 70 d 处理 B 的萌条数量分别比 A、C 和 D 高 49.42 %、33.10 %和 50.78 %;平茬后

70~100 d,萌条数量的增长幅度减缓,平茬后 100 d 处理 B 的萌条数量分别比 A、C 和 D 高 47.91 %、31.98 %和 33.29 %;平茬后 100~160 d,各处理萌条数量出现小幅下降,平茬后 160 d 处理 B 的萌条数量分别比 A、C 和 D 高 55.74 %、52.59 %和 53.48 %。通过方差分析得知,平茬后 40 d,B 与 C、D 差异不显著($P > 0.05$),三者显著高于处理 A ($P < 0.05$);平茬后 70 d、100 d、130 d、160 d,B 显著高于其他处理($P < 0.05$)。

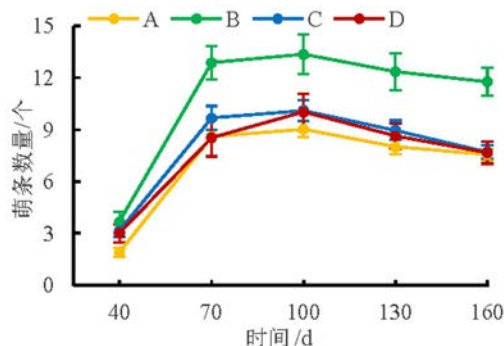


图1 平茬高度对紫椴萌条数量增长进程的影响

Fig. 1 Effect of stumping height on the number of *T. amurensis* sprouts

2.2.2 平茬高度对紫椴萌条长度生长进程的影响

由图2可见,平茬后40~100 d,萌条长度快速增长,各处理的萌条长度呈直线式增长,处理B的上升幅度最大,平茬后70 d处理B的萌条长度分别比A、C和D高52.56%、42.80%和43.50%,平茬后100 d处理B的萌条长度分别比A、C和D高10.27%、17.51%和25.72%;平茬后100~130 d,各处理的萌条长度增长速度变缓,平茬后130 d处理B的萌条长度分别比A、C和D高6.75%、18.60%和43.61%。通过方差分析得知,平茬后40 d、70 d,B显著高于其他处理($P < 0.05$);平茬后100 d,B与A、A与C、C与D之间差异均不显著($P > 0.05$),B与C和D、A与D差异均达到显著水平($P < 0.05$);平茬后130 d,B与A、A与C之间差异均不显著($P > 0.05$),B与C和D、A与D差异均达到显著水平($P < 0.05$)。

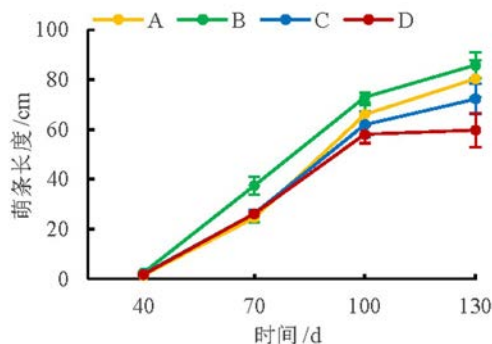


图2 平茬高度对紫椴萌条长度生长进程的影响

Fig. 2 Effect of stumping height on the length of *T. amurensis* sprouts

2.2.3 平茬高度对紫椴萌条基径生长进程的影响

由图3可见,平茬后40~130 d,各处理的

萌条基径均呈直线式增长,处理B的上升幅度最大,平茬后70 d处理B的萌条基径分别比A、C和D高11.81%、12.82%和15.65%,平茬后100 d处理B的萌条基径分别比A、C和D高2.67%、6.38%和9.70%,平茬后130 d处理B的萌条基径分别比A、C和D高3.83%、11.32%和20.78%。通过方差分析得知,平茬后40 d,B与A、C和D之间差异显著($P < 0.05$);平茬后70 d、100 d,B与A、C之间差异均不显著($P > 0.05$),与D差异达到显著水平($P < 0.05$),平茬后130 d,B与A、C和D之间差异不显著($P > 0.05$)。

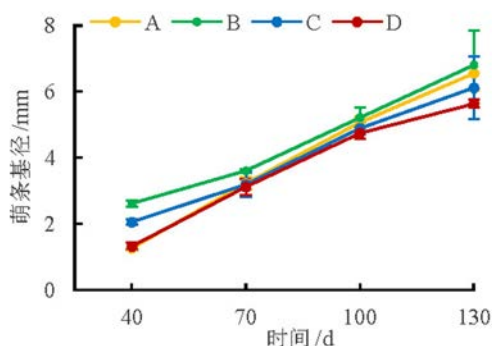


图3 平茬高度对紫椴萌条基径生长进程的影响

Fig. 3 Effect of stumping height on the base diameter of *T. amurensis* sprouts

3 结论与讨论

平茬是通过去除植株地上部分促进新枝萌发^[12],能够让成熟的植物器官、组织和细胞重新获得某些幼态特性^[13],即出现植物幼化现象。已有研究表明,平茬高度是调控植株萌条生长、实现成熟植株复幼的核心关键因子^[14, 15]。杨越等^[16]研究发现,1年生文冠果移栽苗,短截强度越大,越能降低地上部分的营养物质消耗量,保障植株生长态势良好,所有处理中5 cm短截处理下的地径生长量最高。常春^[17]研究发现,7~8年生柠条锦鸡儿生长季平茬最适高度为2~4 cm,过低和过高都不利于枝条萌蘖与再生。杨丹怡等^[18]研究发现,留茬高度为5 cm显著增加了凤丹的单株新生枝数量。杨柳等^[19]研究发现,平茬高度为5 cm的文冠果的株高、地径、根长、茎生物量、叶生物量、根生物量、叶片数量、叶片面积等指标优于平茬高度为10 cm、15 cm、20 cm的指标。本研究发现,与其他平茬高度(0 cm、10 cm、15 cm)相比,

平茬高度为 5 cm 显著增加了紫椴萌条数量,明显促进了紫椴萌条长度和基径的生长。从生长进程来看,平茬后 40~70 d,各处理萌条数量快速增长;平茬后 40~100 d,萌条长度快速增长;平茬后 40~130 d,萌条基径均呈直线式增长;所有处理中,平茬高度为 5 cm 时萌条数量、长度和基径增长幅度均最大。本研究得出紫椴平茬复幼较佳高度为 5 cm,通过平茬复幼可克服成熟紫椴年龄效应,研究结果可为紫椴优质资源的规模化繁育及推广应用提供技术参考。

参考文献

[1] 张建瑛,吕跃东,李京,等. 紫椴腋芽增殖途径快繁的影响因子分析研究[J]. 江西农业学报, 2018, 30(11): 23-26.

[2] 王海南,沈海龙,杨立学. 紫椴嫩枝扦插繁殖技术研究[J]. 经济林研究, 2012, 30(3): 106-110.

[3] 张亚君,徐妙珍,王凡秀,等. 紫椴芽的离体培养诱导分化条件的研究[J]. 吉林林业科技, 1996, 25(1): 43-44.

[4] 熊成明,王巧欣,何利明,等. 复幼措施对水曲柳生长与组培再生的影响[J]. 植物研究, 2026, 46(1): 91-100.

[5] Wu G, Park M Y, Conway S R, et al. The sequential action of miR156 and miR172 regulates developmental timing in *Arabidopsis*[J]. *Cell*, 2009, 138(4): 750-759.

[6] Yang L, Xu M L, Koo Y, et al. Sugar promotes vegetative phase change in *Arabidopsis thaliana* by repressing the expression of *MIR156A* and *MIR156C* [J]. *eLife*, 2013, 2: e00260.

[7] 薛文辉,詹亚光,何利明,等. 水曲柳复幼——微繁技术研究[J]. 林业科技, 2016, 41(2): 4-8.

[8] 殷东生,李颖,张建瑛. 平茬处理对水曲柳苗木生

长和光合特性的影响[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2025, 26(3): 381-387.

[9] 杨舜垚,张贵芳,张曦,等. 湿加松个体老化模式与平茬复幼的机理[J]. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(8): 1146-1165.

[10] 张泽宁,郭彩云,郭胜伟,等. 平茬高度对中国沙棘根蘖能力的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(3): 21-25.

[11] 张建国,李应罡,徐新文,等. 平茬对塔里木沙漠公路沙拐枣防护林生长与土壤水盐分布的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(6): 1462-1468.

[12] 崔天民,格日乐,毅勃勒,等. 沙棘根系固土力学特性对其平茬复壮响应[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(1): 108-114.

[13] 裴东,谷瑞升. 树木复幼的研究概述[J]. 植物学通报, 2005, 22(6): 753-760.

[14] 梁金波,胡双玲,姚健,等. 基于正交试验的修剪施肥组合处理对茶树产量与生化品质的影响[J]. 茶叶学报, 2024, 65(2): 45-53.

[15] 王丹,李亚麒,陈林,等. 平茬季节对云南松苗木萌蘖与内源激素关系的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(5): 853-861.

[16] 杨越,梅秀艳,祁云飞,等. 不同程度的短截处理对文冠果 1a 生移栽苗成活和生长的影响[J]. 林业与生态科学, 2019, 34(2): 152-157.

[17] 常春. 柠条生长季刈割关键技术研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010: 40-43.

[18] 杨丹怡,吉文丽,杨静萱,等. 平茬措施对凤丹生长、光合生理和结实的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2019, 28(1): 43-51.

[19] 杨柳,李思琪,付庆新,等. 文冠果生长及光合特性对平茬高度的响应[J]. 经济林研究, 2025, 43(2): 43-51.

(本篇专家编审:陶晶)

著作权声明

本刊已许可《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司、北京世纪超星信息技术发展有限责任公司分别在中国知网、万方数据—数字化期刊群、维普资讯—中文科技期刊数据库、超星期刊域出版平台及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意上述声明。

《吉林林业科技》编辑部

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.003

文章编号:1005-7129(2026)05-0012-04

中图分类号:S794.4

文献标识码:A

不同环割时间对岑软 2 号油茶开花结果的影响

宋雪婷, 李金玲, 何振革, 杨再玺, 叶燕萍

(广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545004)

摘 要: 为研究环割技术对油茶当年、翌年开花结实和坐果率的影响,本文以 7 年生岑软 2 号油茶为研究对象,设置 5 月生长旺期环割(T1)、9 月花蕾期环割(T2)、11 月初花期环割(T3)、次年 3 月生理落果前环割(T4)4 个处理,以不环割为对照(CK),统计各处理当年及翌年的开花数量、结果数量和坐果率。当年开花数量方面,T3 处理最高,显著高于 CK、T1 处理和 T2 处理,T4 处理与 T3 处理无显著差异。当年结果数量和坐果率方面,T3 处理显著高于 CK 及其他处理。翌年开花数量方面,T3 处理和 T4 处理间无显著差异,均显著高于 CK 和 T1 处理。翌年结果数量和坐果率方面,T3 处理最高,显著高于 CK、T1 处理和 T2 处理,T4 处理与 T3 处理无显著差异。研究结果可为岑软 2 号油茶环割保花保果、丰产高效栽培提供技术参考。

关键词: 油茶;环割;开花结实;坐果率

Effects of Different Girdling Stages on Flowering and Fruiting of *Camellia oleifera* ‘Cenruan 2’

SONG Xueting, LI Jinling, HE Zhenge, YANG Zaixi, YE Yanping

(Guangxi Eco-engineering Vocational and Technical College, Liuzhou 545004, China)

Abstract: In order to study effects of girdling technology on the flowering, fruiting, and fruit setting percentage of *Camellia oleifera* in the current year and the following year, 7-year-old *Camellia oleifera* ‘Cenruan 2’ was selected as the research object. Four girdling treatments were set up including girdling during growth period in May (T1), girdling during bud period in September (T2), girdling during early blooming stage in November (T3), and girdling in March of the following year before physiological fruit drop (T4), with no girdling as the control (CK). The flowers number, fruits number, and fruit setting percentage of each treatment in the current year and the following year were calculated. The flowers number of T3 in the current year was the maximum. That of T3 was significantly higher than that of CK, T1, and T2. There was no significant difference between that of T3 and T4. The fruits number and fruit setting percentage in the current year of T3 were significantly higher than those of CK and other treatments. There was no significant difference between the flowers number of T3 and T4 in the following year. That of T4 and T3 was significantly higher than that of CK and T1. The fruits number and fruit setting percentage of T3 in the following year were the maximum. Those of T3 were significantly higher than that of CK, T1 and T2. There were no significant differences between those of T3 and T4. The research results could provide the technical reference for flower and fruit protection and high yield and high efficiency cultivation of *Camellia oleifera* ‘Cenruan 2’ through girdling.

Keywords: *Camellia oleifera*; girdling; flowering and fruiting; fruit setting percentage

收稿日期:2026-05-08

基金项目:广西生态工程职业技术学院青年教师专项(2023QN02)

第一作者:宋雪婷(1993—),女,讲师,主要从事森林调查和森林培育方面的研究,E-mail:1980292395@qq.com。

通信作者:李金玲(1995—),女,讲师,主要从事植物生理和森林培育方面的研究,E-mail:2501983127@qq.com。

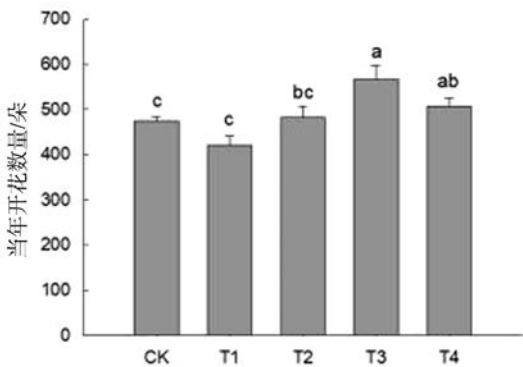
油茶(*Camellia oleifera*)为山茶科山茶属植物,是我国特有的木本食用油料树种,油茶籽油富含不饱和脂肪酸,营养价值高,有“东方橄榄油”之称。截至2024年,广西油茶种植面积已达70万hm²,位居全国前列,但油茶单产偏低的问题限制了广西油茶产业发展。研究表明,生理过程中水分和养分失衡易导致油茶发生落蕾现象,花期不遇、授粉亲和力和不高、自交不亲和、开花期间营养不良、昆虫授粉情况不佳等均会造成油茶落花,病虫害以及降雨量过多等因素易导致油茶大量落果^[1, 2]。现有研究主要集中在药剂处理、植物生长调节剂、营养元素、叶面肥等对油茶保花保果的影响等方面^[3-7],关于环割技术的研究较少。本研究探讨了在不同发育阶段进行环割对油茶植株花果生长的影响,旨在为提高油茶坐果率和高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验样地与试验材料

试验样地位于广西生态工程职业技术学院教学林场实验基地,属亚热带季风气候,光照时间长,年均日照时数为1 647.6 h,年均太阳辐射总量为102.54 kcal·cm⁻²。7—8月气温最高,1—2月最低,年平均气温20.6℃;雨量充沛,年均降水量1 500 mm。土壤类型为黄壤,适合油茶生长。

选用7年生岑软2号油茶为试验材料,油茶株行距为2 m×3 m,参与环割试验的油茶长势相对一致,经营管理措施相同。



注:图中不同小写字母表示各处理间在误差0.05水平下差异显著,下同。

图1 不同时期环割处理对岑软2号油茶当年和翌年开花数量的影响

Fig. 1 Effects of girdling treatments at different stages on flowers number of *Camellia oleifera* ‘Cenruan 2’ in the current year and the following year

2.2 不同时期环割对岑软2号油茶结果的影响

由图2可知,各处理间当年、翌年结果数量

1.2 试验设计与调查方法

试验于2024年开始,采用单因素完全随机试验设计。选择开花期相同、树形相似、生长势一致并已到结果年龄的油茶,设置5月生长旺期环割(T1)、9月花蕾期环割(T2)、11月初花期环割(T3)、次年3月生理落果前环割(T4)4个处理,每个处理选择5株油茶,以不环割为对照(CK),对照选择4株油茶,重复3次,共计72株油茶。环割位置均为油茶不同分枝上距离分枝点15~20 cm处,对枝干整圈实施环割,切口完整闭合,环割宽度3 mm^[8]。对试验植株进行挂牌标记,统计花芽数量,并在盛果期统计果实数量。

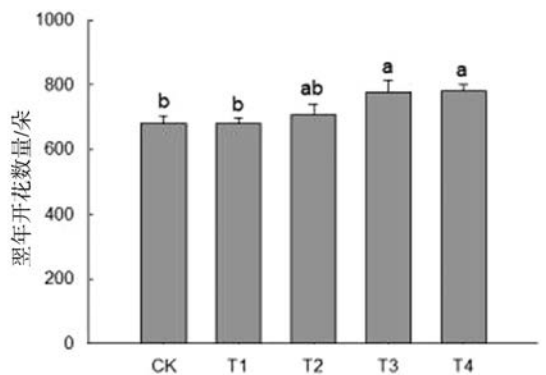
1.3 数据处理分析

使用Excel 2019软件对数据进行整理,采用SPSS 26.0软件对数据进行方差分析和相关性分析,采用Sigma Plot 14.0软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同时期环割对岑软2号油茶开花的影响

由图1可知,各处理间当年、翌年开花数量差异显著($P < 0.05$)。当年开花数量方面,T3处理最高,显著高于CK、T1处理、T2处理;T4处理与T3处理无显著差异,但显著高于CK、T1处理。说明T3处理对当年开花的促进作用最强。翌年开花数量方面,T3处理、T4处理间无显著差异,均显著高于CK、T1处理;T2处理与CK、T1处理、T3处理、T4处理均无显著差异。说明T3处理、T4处理对翌年开花的促进作用更突出且趋于一致。



差异显著($P < 0.05$)。当年结果数量方面,T3处理最高,显著高于CK、T1处理、T2处理、T4

处理;CK、T1 处理、T2 处理、T4 处理间无显著差异。说明 T3 处理对当年结果的促进作用显著,其他处理效果与对照相近。翌年结果数量方面,T3 处理最高,显著高于 CK、T1 处理、T2 处理;T4 处理与 T3 处理无显著差异,二者显著

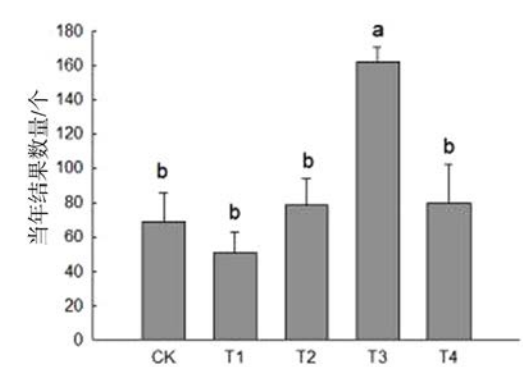
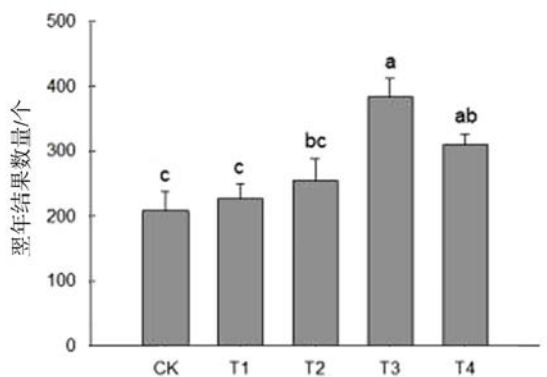


图 2 不同时期环割处理对岑软 2 号油茶当年和翌年结果数量的影响

Fig. 2 Effects of girdling treatments at different stages on fruits number of *Camellia oleifera* 'Cenruan 2' in the current year and the following year

2.3 不同时期环割对岑软 2 号油茶坐果率的影响
由图 3 可知,各处理间当年、翌年坐果率差异显著($P < 0.05$)。当年坐果率方面,T3 处理最高,显著高于 CK、T1 处理、T2 处理、T4 处理;CK、T1 处理、T2 处理、T4 处理间无显著差异。说明 T3 处理对当年坐果的促进作用显著,其他

高于 CK、T1 处理。说明翌年 T3 处理的促果优势持续,且 T4 处理的效果逐步显现并趋近于 T3。无论当年结果数量还是翌年结果数量均表现为 T3 处理效果最好,显著高于 CK。



处理效果与对照相近。翌年坐果率方面,T3 处理仍最高,显著高于 CK、T1 处理、T2 处理;T4 处理仅低于 T3 处理,与其他处理间均无显著差异。说明翌年 T3 处理的促坐果优势持续强化,且 T4 处理的效果逐步显现并趋近于 T3 处理。

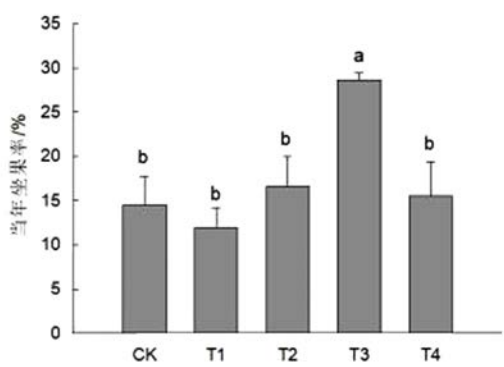
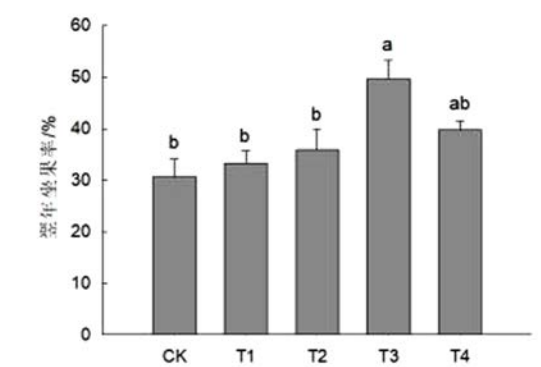


图 3 不同时期环割处理对岑软 2 号油茶当年和翌年坐果率的影响

Fig. 3 Effects of girdling treatments at different stages on fruit setting percentage of *Camellia oleifera* 'Cenruan 2' in the current year and the following year



3 结论与讨论

本研究以 7 年生岑软 2 号油茶为材料,比较不同时期环割对油茶当年及翌年开花数量、结果数量及坐果率的影响。当年开花数量、结果数量与坐果率方面,11 月初花期环割均最高。翌年开花数量方面,11 月初花期环割、次年 3 月生理落果前环割处理显著高于 CK。翌年结果数量及坐果率方面,11 月初花期环割最

高,次年 3 月生理落果前环割处理与其无显著差异。整体来看,11 月初花期环割与次年 3 月生理落果前环割对促花、促果及提升坐果率的效果较好,生长旺期与花蕾期环割效果相对较弱。

环割作为一种物理调控手段,其作用机制在于通过暂时阻断韧皮部养分向下运输,调控光合产物在地上部分的分配。廖志鹏等^[8, 9]研究表明,环割可显著影响油茶树体营养分配,促进挂果并提高产量。王毓曼等^[10]也指出,环割

可提升油茶果实经济性状及单株产油量,且生理落果前环割的增产效果更优。本研究结果与上述结论基本一致。从数据可以看出,当年数据中11月初花期环割表现突出,这可能与该时期正值油茶秋季根系生长高峰期、环割后地上部分光合产物得到更为有效的截留与再分配有关,但由于环割部位损伤愈合需要一定时间,该时期实施环割亦可能在一定程度上干扰花期的授粉受精过程,从而影响了其促果效果的持续稳定性。

生产实践中,为显著提升岑软2号油茶坐果率与产量,当年推荐选择11月初花期进行环割,翌年采用11月初花期或次年3月生理落果前环割,于不同分枝上距分枝点15~20 cm处实施宽度3 mm的环割操作。本研究明确了环割时间对油茶开花结实与坐果率的调控效应,为油茶保花保果与高效栽培提供了技术参考。后续可结合环割弧度、环割次数、施肥及植物生长调节剂等开展复合调控研究,进一步完善油茶丰产栽培技术体系。

参考文献

[1]陈庆潮,邱劲柏,林金凤.油茶落花落果成因及防控技术[J].湖南林业科技,2016,43(5):158-130.

[2]黄祥元,蒋艾青.油茶落花落果成因及保花保果技

(上接第7页)

[18]Wu Xiaoyi, Du Xuhua, Fang Shiyan, et al. Impacts of competition and nitrogen addition on plant stoichiometry and non-structural carbohydrates in two larch species [J]. *Journal of Forestry Research*, 2021, 32(5): 2087-2098.

[19]陈图强,徐贵青,刘深思,等.干旱胁迫下梭梭水力性状调整与非结构性碳水化合物动态[J].植物生态学报,2023,47(10):1407-1421.

[20]刘元玺,王丽娜,吴俊文,等.云南松幼苗生物量和非结构性碳水化合物特征的干旱响应[J].林业科学,2024,60(6):71-85.

[21]代永欣.干旱、低温等逆境条件下不同树种的水分平衡—碳代谢关系[D].北京:中国林业科学研究院,2017:79-86.

[22]毛子军,贾桂梅,刘林馨,等.温度增高、CO₂浓度升高、施氮对蒙古栎幼苗非结构碳水化合物积累及其分配的综合影响[J].植物生态学报,2010,34(10):1174-1184.

[23]王颖,翟偲涵,袁继红,等.种间竞争对两种湿地植物非结构性碳水化合物含量的影响研究[J].东北师大学报(自然科学版),2018,50(4):109-115.

术[J].现代农业科技,2019(3):129,132.

[3]胡恩旗,胡香英,林尤奋.不同药剂喷施处理对海南油茶保花保果效果的影响[J].热带农业科学,2017,37(2):58-61.

[4]杨钧钰.不同植物生长调节剂处理对油茶开花与座果率的影响[D].桂林:广西师范大学,2022:23-25.

[5]高超,袁德义,袁军,等.花期喷施营养元素及生长调节物质对油茶坐果率的影响[J].江西农业大学学报,2012,34(3):505-510.

[6]袁德义,王瑞,袁军,等.不同营养元素及配比对油茶花粉萌发率的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2010,39(5):471-474.

[7]文野,郎南军,李甜江.浅谈叶面肥在油茶保花保果上的应用[J].山东林业科技,2014,44(2):120-122.

[8]廖志鹏,邹中华,胡冬南,等.环割时间和弧度对盛果期油茶树体营养分配及结实的影响[J].江西农业大学学报,2024,46(5):1244-1255.

[9]廖志鹏,王毓曼,廖康平,等.环割时期和施肥对油茶树体营养分配及生长结实的影响[J].中国油料作物学报,2026,48(2):231-247.

[10]王毓曼,吴怀远,谢双岭,等.环割时间和环割量对油茶果实养分及经济特性的影响[J].江西农业大学学报,2023,45(6):1443-1453.

(本篇专家编审:陶晶)

[24]赵姣,范慧慧,张杰,等.坡位对芳樟矮林生物量空间分配和精油产量的影响[J].中南林业科技大学学报,2020,40(4):9-13.

[25]郭子武,杨丽婷,林华,等.坡位对毛竹林下黄花远志生物量积累与分配及其异速生长关系的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(6):79-84.

[26]Pregitzer K S, Deforest J L, Burton A J, et al. Fine root architecture of nine north American trees [J]. *Ecological Monographs*, 2002, 72(2): 293-309.

[27]Ma Zeqing, Guo Dali, Xu Xingliang, et al. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits[J]. *Nature*, 2018, 555(7694): 94-97.

[28]Guo Dali, Xia Mengxue, Wei Xing, et al. Anatomical traits associated with absorption and mycorrhizal colonization are linked to root branch order in twenty-three Chinese temperate tree species [J]. *New Phytologist*, 2008, 180(3): 673-683.

[29]Xia Mengxue, Guo Dali, Pregitzer K S. Ephemeral root modules in *Fraxinus mandshurica* [J]. *New Phytologist*, 2010, 188(4): 1065-1074.

(本篇专家编审:杨雨春)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.004

文章编号:1005-7129(2026)05-0016-07

中图分类号:S758

文献标识码:A

多级半径滚球法的林木激光点云三维重构

孙 健¹, 刘媛媛¹, 王 君²

(1. 吉林农业大学信息技术学院, 吉林 长春 130118; 2. 吉林农业大学工程技术学院, 吉林 长春 130118)

摘 要: 针对传统单一半径滚球法在阔叶树地面激光雷达点云重建中难以同时保证树干连续性与枝叶细节的问题,本文提出一种多级半径滚球重建方法。以单株枫树为对象,经统计滤波、体素降采样和随机抽样一致性地面剔除得到 16 825 个高质量单木点云。采用主成分分析法估计法向量并优化邻域参数。核心算法采用多级半径 (0.08~0.30 m) 分层递进三角化,小半径优先在密集区构建可靠面片以保留枝叶特征,大半径跨过稀疏区空隙连接树干,从而在不依赖全局密度均匀假设的前提下,兼顾结构完整与细节保真。后处理之后退化三角面占比降至 0,整体重建耗时 0.40 s,胸径测量误差 1.22 %。与泊松法和 Alpha 形状法的对比试验表明,本方法重建速度提升 33.33 %,三角面数量减少 64.72 % 和 23.93 %,胸径精度提升 75.56 %,同时完全消除了 Alpha 形状法的树干断裂问题。本研究可为阔叶树单木参数自动化测量提供可靠的技术参考。

关键词: 激光雷达;点云重建;多级半径;滚球法

Three-dimensional Reconstruction of Laser Point Clouds of Forest Tree Using Multi-level Radius Ball Pivoting Algorithm

SUN Jian¹, LIU Yuanyuan¹, WANG Jun²

(1. College of Information and Technology of Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. College of Engineering and Technology of Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: The multi-level radius ball pivoting algorithm was proposed for reconstructing terrestrial laser scanning (TLS) point clouds of broad-leaved trees, overcoming the trade-off between trunk continuity and branch/leaf detail inherent in fixed-radius ball pivoting algorithm. The point clouds of a maple tree were filtered, down-sampled and processed with RANSAC ground removal, yielding 16 825 high-quality points. The normal vector was estimated using PCA with the optimized neighborhood size. The core algorithm applied five progressively larger radii (0.08–0.30 m). Small radii first reconstructed dense regions to preserve fine features, while large radii bridged sparse gaps to connect the trunk. This strategy achieved structural completeness and detail fidelity without assuming globally uniform density. After post-processing, degenerate triangles were eliminated (0), reconstruction time was 0.40 s, and DBH measurement error was 1.22 %. Compared with Poisson reconstruction and the Alpha-shape method, the reconstruction speed of the proposed algorithm increased by 33.3 %, the number of triangles decreased by 64.72 % and 23.93 % respectively, the DBH accuracy increased by 75.56 %. The proposed algorithm entirely avoided trunk breakage observed in Alpha-shape results. This study would provide the reliable technical reference for automated individual-tree parameter measurement of broad-leaved trees.

Keywords: LiDAR; point cloud reconstruction; multi-level radius; ball pivoting algorithm

收稿日期:2026-06-26

基金项目:吉林省科技厅重点研发项目(20220203004SF)

第一作者:孙健(2003—),男,主要研究智慧农业,E-mail:2958087900@qq.com。

通信作者:王君(1980—),女,讲师,研究生导师,主要研究领域为农业机械,E-mail:49359168@qq.com。

精准获取林木三维结构是开展森林资源调查、碳汇计量以及智慧林业建设等的核心基础。传统的人工实测耗时费力,获取的参数也十分有限,无法直接呈现树木的空间形态特征。地面激光雷达技术可以快速获取高密度三维点云数据,为单木尺度的精细化建模提供了可能。但阔叶树点云天然存在“树干区域点云稀疏、枝叶区域点云密集”的非均匀分布的特点,给点云曲面重建算法带来了挑战。

目前主流的重建方法各有优势与局限。泊松曲面重建基于全局隐式函数,模型拓扑完整性高,但处理扫描数据时易产生封闭的虚假表面,丢失枝叶细节较多。Alpha 形状法通过全局 Delaunay 剖分和单一半径筛选三角面,计算高效,但林木点云疏密差异较大,实用性一般。经典滚球法(Ball Pivoting Algorithm)利用小球在点云表面滚动生成三角网格,局部细节保真度高,但传统单一半径模式不能同时保证树干连续性和枝叶完整性。卢军等^[1]利用地面激光点云实现了单木高保真建模,但多数研究仍使用固定参数,对低密度阔叶树的优化不足^[2]。

针对这些问题,本文以典型阔叶树枫树为研究对象,提出了一种多级半径滚球法重建策略。通过设置梯度化的多个滚球半径,分层次完成稀疏树干区域和密集枝叶区域的三角化处理,并构建了与之适配的预处理和后处理流程。通过与泊松法、Alpha 形状法进行定量对比,同时开展低密度样本的鲁棒性验证,全面评估该方法的综合性能,以期阔叶树单木点云的高效高精度重建提供切实可行的解决方案。

1 研究方法与评价指标

1.1 研究方法

1.1.1 点云预处理

试验数据选自国家林业和草原科学数据中心公开的枫树地面激光雷达点云集,从中截取一株树高约 33.3 m、胸径约 24.5 cm 的枫树作为主要研究对象。原始单木点云包含 30 032 个点,由于林区环境复杂,数据中存在离群噪声、地面点干扰等问题,直接用于重建会严重影

响网格质量与处理速度,因此需进行系统性的预处理。

首先采用统计滤波去除离群噪声^[3, 4]。对每个点搜索其 k 近邻并计算平均距离,若该距离超出整体均值 ± 2 倍标准差,则视作噪声滤除。试验共剔除 472 个离群点,占原始数据的 1.57%,有效点的主体结构未受损坏。

随后采用体素栅格降采样均匀化点云^[5]。经试验对比,栅格边长取 0.08 m 时,可在不损失结构信息的前提下有效消除冗余点,降采样后点云数量为 29 202 个。

最后运用随机抽样一致性(RANSAC)算法剔除地面点^[6, 7]。通过 3 000 次迭代和 1.69 m 距离阈值,准确拟合林地基准平面,将斜坡地面点与林木点完整分离,最终得到 16 825 个高质量单木点云,为后续重建提供干净的输入数据。预处理前后对比如图 1 所示。

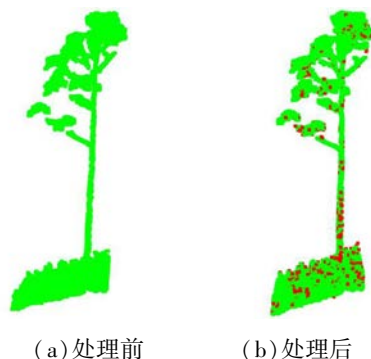


图 1 预处理前后对比

Fig. 1 Point cloud comparison before and after preprocessing

1.1.2 法向量估计与优化

处理后的点云需先赋予每个点一个法向量,这是滚球法构建三角面的前提。采用主成分分析法(PCA)进行局部曲面拟合^[8]。对点云中任一点,搜索其空间中最邻近的 k 个点,构造 3×3 协方差矩阵,该矩阵最小特征值对应的特征向量为该点处局部平面的法向量。

邻域点数 k 是影响法向量对噪声敏感度与细节捕捉能力的关键参数^[9]。为评估其敏感性,以枫树点云为对象, k 在 10~150 范围内等间距取样(k 为 10、30、50、70、110、130、150)进行测试。

测试时结合目视观察发现,随着 k 增大,法向量整体呈现出“粗糙→平滑→过模糊”的渐变规律。为减少赘叙且更好说明对比效果, k 选取 10、70、150 三个代表值,分别对应低、中、高邻域水平,效果如图 2 所示。

k 为 10 时,邻域过小,协方差矩阵受噪声和离群点干扰严重,导致法向量方向散乱、冠层表面毛刺密集,后续重建极易产生大量破碎三角面。 k 增至 70 时,噪声被有效抑制,法向量整体平滑,枝杈末梢的方向依然保持独立,树干

区域法向量基本垂直于表面,同时能准确反映细枝弯曲走向。 k 为 150 时,邻域过大,将偏离局部平面的点也纳入计算,造成枝杈边缘和叶片错层处的法向量被过度平滑,末梢细节被磨平,树干的法向量方向出现了轻微偏移。

上述对比反映出 k 值对法向量质量的敏感程度,偏小时毛刺主导,偏大则细节缺失。综合目视对比, $k = 70$ 恰好处于平滑与细节的平衡位置,既不过糙也不过糊,因此本文后续计算统一固定 $k = 70$ 。

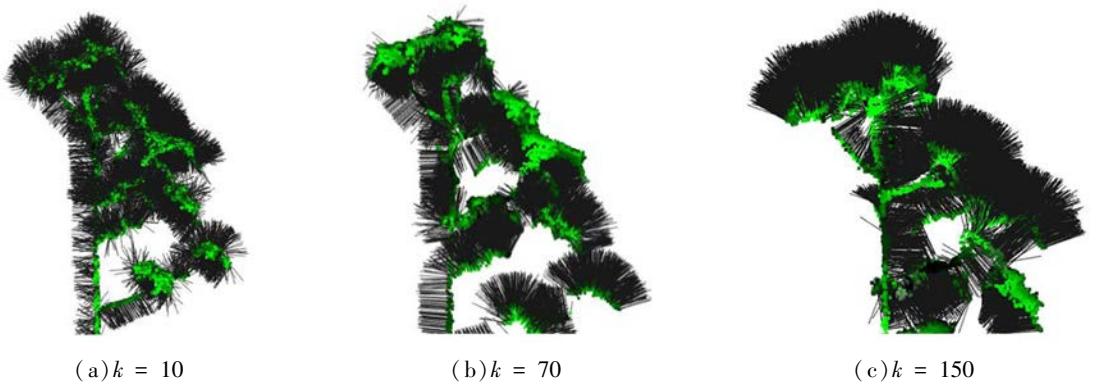


图 2 法向量效果

Fig. 2 Normal vector visualization

1.1.3 多级半径滚球法重建

单一半径的经典滚球法难以适应林木点云疏密不均的特性。半径过小,树干等稀疏区产生孔洞;半径过大,叶片和细枝会被糊掉。因而采用多级半径递进重建^[10-12],半径取值由点云实际决定。最小半径采用与体素降采样栅格边长一致的 0.08 m,能够保证点云密区有足够近邻点参与构面;最大半径采用 0.30 m,为树干区域平均最大点间距(约 0.28 m,由 CloudCompare 测得)加裕度,为了优先保证树干的整体连通性,允许局部细小的枝叶被适度平滑,保证滚球能跨过最宽的缝隙;中间三档依据点云实际密度分布,兼顾细枝至主干的尺度变化,依次选取 0.10 m、0.15 m、0.25 m,让半径从细枝、中等枝条到主干平滑递增,不出现尺度断档。

重建时从最小半径起步,先在叶片、枝梢等密处生成精细三角面,稀疏处暂留空白,然后再逐级调入 0.10 m、0.15 m、0.25 m 填补中等枝条和局部树干,最后用 0.30 m 贯通主干等大面

积空缺。每级仅在前一级未覆盖的边界邻域上往外扩^[13],既不依赖密度均匀假设,也无需预先分区。在一般应用时,最小半径可取降采样栅格边长的 1.0~1.5 倍,最大半径取目标区最大点间距的 1.1~1.3 倍,中间按间隔插入 3 或 4 档即可稳定重建。

1.2 评价指标

试验在 Microsoft Windows 11 操作系统下运行,CPU 为 AMD Ryzen 7 5800H,主频 3.2 GHz,16 GB 内存。算法基于 Python 3.8.2 与 Open3D 0.18.0 实现。

为客观评价重建质量,除目视检查外,统一记录四项指标。重建耗时仅测量从输入有法向量的点云到输出三角网格这一核心过程的耗时。模型规模包括顶点数量和三角面数量,三角面数量越少且结构完整表示效率越高。退化三角面占比为退化三角面数量占三角面数量的百分比,反映网格的几何质量^[14]。胸径误差为在重建模型树干 1.3 m 高度处截取横断面使用

RANSAC 圆拟合断面点云得到直径与 Cloud-Compare 测量胸径 (24.5 cm) 的相对误差百分比,该指标直接对应林业单木参数提取的实际需求。

除了上述四项指标外,另定义一个辅助指标“重建完整度”,用于定性评判重建结果的拓扑可用性。完整表明树干连续无断裂,主要一级分枝完整可辨;基本完整表明树干大致连续,局部有小范围缺失;部分完整表明树干部分完整,局部缺失部分较多;不完整表明树干断裂成互不连通的多段,或被封闭曲面大面积包裹。

2 结果与分析

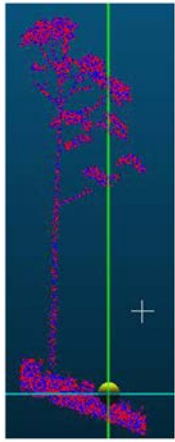


图3 枫树原始点云

Fig. 3 Raw maple tree point cloud

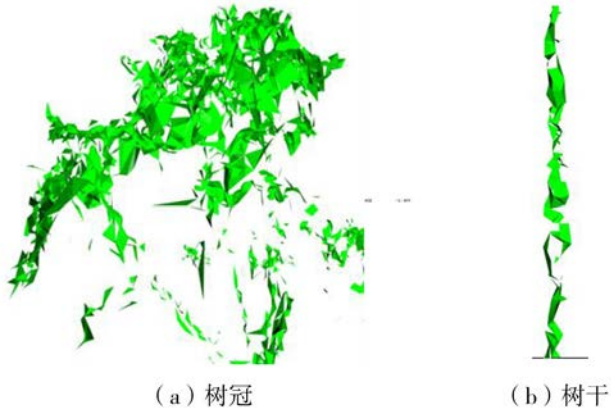


图4 多级半径滚球法重建后细节放大

Fig. 4 Enlarged view after reconstruction by ball pivoting algorithm

2.2 算法对比

为验证多级半径滚球法的有效性,选取泊松曲面重建^[15, 16]和 Alpha 形状法^[17, 18]两种广泛使用的方法作为对照。三种方法均在同一组预处理后的枫树点云上运行,软硬件环境完全一致。泊松法采用默认深度 8 级参数配置,兼顾重建细节与封闭性;Alpha 形状法的 α 值经反复试验取 0.15 m,该值能在枝叶保留与树干连通之间取得相对最佳的折中效果。

图 5、图 6 展示了三种方法的重建效果。多级半径滚球法的网格从树根底部延伸至树梢顶端,无结构性断裂,树干曲面连续平滑,枝杈分叉处过渡自然。泊松法输出封闭的“水密”曲面^[19],树木被包裹成类似蚕茧的绿色面片,真实的结构基本丧失,细枝丢失严重,树干被多

2.1 重建效果

枫树原始点云如图 3 所示,多级半径滚球法重建后放大细节如图 4 所示。重建后网格从树根底部一直延伸至树梢顶端,无结构性断裂。树干部分曲面连续平滑,无横向错层,有点云质量问题,仅产生极少的孔洞;在树枝分杈处,过渡形态自然,没有出现面片扭曲。量化指标方面,重建耗时 0.40 s,产出 18 497 个三角面,退化三角面占比为 0,文件大小 1.05 MB。胸径测量值为 24.2 cm,相对误差 1.22 %。在重建速度、数据体量、测量精度上,均能满足单木精细化参数提取的要求。

余的封闭网格二次包裹。Alpha 形状法在树干及主要枝杈处出现多处黑色断裂空洞,说明单一的 $\alpha = 0.15$ m 的半径无法有效兼顾疏密差异显著的各个区域。

三种方法的定量指标如表 1 所示。在重建效率上,多级半径滚球法耗时 0.40 s,泊松法和 Alpha 形状法均为 0.60 s,速度提升 33.33 %。在模型规模方面,多级半径滚球法产出 18 497 个三角面,泊松法为 52 424 个,Alpha 形状法为 24 316 个,多级半径滚球法较二者分别减少 64.72 % 和 23.93 %,且 18 497 个三角面足以完整表征树木形态结构,体现了更高的建模效率。从网格质量看,多级半径滚球法退化三角面占比为 0,泊松法为 0.30 %,Alpha 形状法虽也为 0,但后者是因 α 阈值偏小而导致大量本

应生成的三角面未能生成,并非真正意义上的网格质量优良,两种 0 的意义截然不同。胸径测量方面,多级半径滚球法相对误差 1.22 %,

泊松法和 Alpha 形状法均为 4.50 %,精度提升 75.56 %。综合以上指标,多级半径滚球法在完整性、精细度和精度上均表现出明显优势。



图 5 整体重建效果对比

Fig. 5 Comparison of overall reconstruction effects

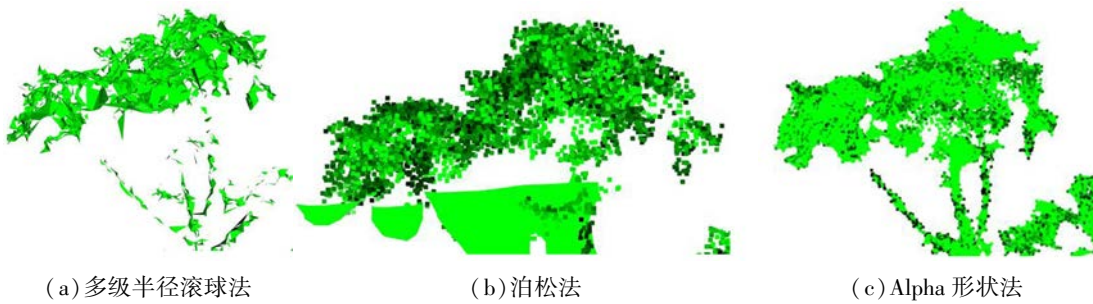


图 6 顶部冠层重建效果对比

Fig. 6 Comparison of top canopy reconstruction effects

表 1 多级半径滚球法、泊松法、Alpha 形状法重建效果定量对比

Tab. 1 Quantitative comparison of reconstruction performance among multi-level radius ball pivoting algorithm, Poisson method, and Alpha shape method

方法	重建时间/s	顶点数量/个	三角面数量/个	文件大小/MB	退化三角面占比/%	胸径误差/%
多级半径滚球法	0.40	16 825	18 497	1.05	0	1.1
泊松法	0.60	26 489	52 424	1.94	0.3	4.5
Alpha 形状法	0.60	11 680	24 316	0.87	0	4.5

2.3 低密度点云的鲁棒性测试

为验证多级半径滚球法对点云密度不均匀情况的适应能力,从同一数据集中另选一株木兰树作为低密度样本。受点云采集质量限制,该样本点云预处理后,点云总数为 3 303 个,点云质量较差,树干下半段的最大点间距超过 0.5 m,重构得到的表面积等绝对值指标会低于树木真实尺寸,以检验各方法在低质量输入下的性能下限。针对不同点云,对滚球半径或 k 值适应性微调、仅做轻度统计滤波的情况下

进行重建,三种方法重建效果如图 7 所示。由图 7 可知,多级半径滚球法与 Alpha 形状法均可保留树木主要分支结构,树干连续性表现相近。但 Alpha 形状法为维持表面连续性,在树冠等点云空缺区域生成较多冗余大三角面,表现出较强的表面包裹性,这些面片部分偏离林木真实拓扑结构,产生部分无效空间。泊松曲面重建法对低密度点云适应性较差,重构后树干出现虚假封闭,冠层结构因过度平滑完全失真,丢失了林木原有的分支拓扑特征。

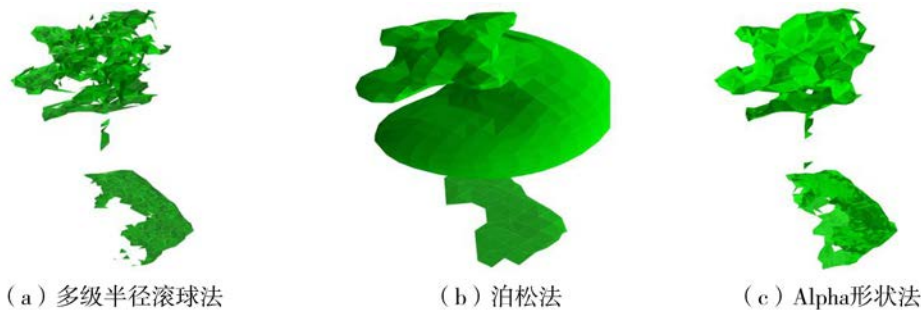


图 7 低密度点云三种方法重建效果

Fig. 7 Reconstruction effects of three methods on low-density point clouds

三种方法低质量木兰树样本表现见表 2, 低密度点云鲁棒性量化指标见表 3。表 3 中的平均贴合误差、误差标准差与 Hausdorff 距离显示,多级半径滚球法与原始点云贴合度最优,误差分布集中。Alpha 形状法因存在部分包裹面片,总表面积达 2.81 m²,较滚球法高出 20.09 %,但

面片数量多 50.55 %,说明在空缺处存在多余无效三角面,重构精度下降。泊松法因曲面过度平滑,总表面积仅 0.84 m²,Hausdorff 距离达 5.82 m,与真实结构偏差最大,无有效贴合误差统计结果。综上,多级半径滚球法能够以更少面片实现更贴近真实树木结构的表面重构。

表 2 多级半径滚球法、泊松法、Alpha 形状法低质量木兰树样本表现

Tab. 2 Low-quality magnolia sample performance with multi-level radius ball pivoting algorithm, Poisson method, and Alpha shape method

方法	重建时间/s	三角面数量/个	树干连续性	树冠结构保留	重建完整度
多级半径滚球法	0.06	2 263	一般	主要分支保留	部分完整
泊松法	0.12	2 356	虚假封闭	完全失真	不完整
Alpha 形状法	0.08	3 407	一般	主要分支保留	部分完整

表 3 多级半径滚球法、泊松法、Alpha 形状法低密度点云鲁棒性量化指标

Tab. 3 Quantitative robustness indicators of multi-level radius ball pivoting algorithm, Poisson method, and Alpha shape method on low-density point clouds

方法	平均贴合误差	误差标准差	三角面总面积/m ²	Hausdorff 距离/m
多级半径滚球法	0.40	0.77	2.34	3.86
泊松法	—	—	0.84	5.82
Alpha 形状法	0.44	0.81	2.81	4.06

3 结论与讨论

在枫树样本上,多级半径滚球法耗时 0.40 s 生成了 18 497 个三角面,退化面为 0,胸径相对误差也仅为 1.22 %,相对于泊松重建和 Alpha 形状法在完整性、精细度与精度上都表现出了明显的优势。在木兰树低密度点云上,未调整核心参数,仍保持了拓扑的合理性和局部精度,说明该方法具有较好的鲁棒性。多级半径策略为解决树木点云重建中疏密差异带来的矛盾提供了一种简单有效的途径,能够为阔叶树单木参数的自动化、无损测量提供可靠参考。

多级半径滚球法的关键是把疏、密区域的重建顺序彻底分开,密处先用小半径构面,稀疏处再用大半径逐步补全,无需确定一个全局最优参数。该方法避开了泊松重建对水密表面的依赖和 Alpha 形状法单阈值的限制,与其他改进型滚球法相比该方法未做点云分区和密度场计算,操作简单。试验测得胸径误差 1.22 %,优于《国家森林资源连续清查技术规定》要求的 3 %;单木重建时间 0.40 s,百株样本也可以在几分钟内处理完成,适合大面积作业。

多级半径滚球法适用于来自地面/无人机 LiDAR、疏密差异明显的单木或样地点云,尤其

适合树干—枝叶结构较清楚的林分(如针阔混交林、常绿阔叶纯林),点云间距若稳定,重建效果会更好。

多级半径滚球法能直接嵌入现有地面/无人机电云管线,常规电脑配置下,百株样本可在几分钟内处理完成。与传统人工相比,精度符合要求,降低大量人工成本,降本增效。其同步生成三维数字档案,便于长期定位监测。在实际林业清查时,可以搭配少量实地交叉验证,兼顾效率和结果可靠性。

多级半径滚球法也存在一定的局限性。一是多级半径的上下限和级数还需依据实际场景设定,差异过大时仍需手动调参,未完全自动化;二是冠层内部因枝条交错、遮挡造成的点云缺失会导致重建表面开孔,会影响枝长、冠幅等重要数据的提取;三是算法只能使用几何数据,区分叶片与细枝的能力偏弱,极稀疏区域可能会产生空洞。

对于点密度极端不足的区域,即便取最大半径仍会出现空洞,这是基于半径滚球原理难以完全克服的,后续可尝试引入先验骨架信息进行引导填补。多级半径滚球法目前只面向单木设计,尚不能直接用于林分尺度的多木重建,未来可结合实例分割方法加以拓展。重建网格现阶段不包含纹理与颜色信息,在一定程度上限制了可视化表现和树种识别,后续可探索多光谱影像与点云的融合重建。

参考文献

[1] 卢军, 刘宪钊, 孟维亮, 等. 基于地面激光点云数据的单木三维重建方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 193-199.

[2] Zhou Lizhi, Ma Chuanyi, Wang Yusen, et al. Research on automated 3D reconstruction method for road scenes based on LiDAR point clouds[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2026, 251: 106281.

[3] 杨豪强, 关惠军, 荀想伟, 等. 基于改进统计滤波和双边拉普拉斯的激光雷达点云去噪算法[J]. 工程机械, 2026, 57(3): 79-83, 125.

[4] 阎雨梦, 张元, 庞敏, 等. 改进的点云引导滤波算法[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(22): 203-210.

[5] 董爽, 白硕玮, 王清, 等. 基于改进体素栅格滤波算法的圆锯片基体平面度检测方法[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2025, 40(1): 57-63.

[6] 孙鹏. 基于改进 RANSAC 算法的点云结构化目标提取[J]. 测绘技术装备, 2024, 26(4): 69-73.

[7] Stankovi Ć L, Brajovi Ć M, Stankovi Ć I, et al. RANSAC-based signal denoising using compressive sensing[J]. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 2021, 40(8): 3907-3928.

[8] 郝晨曦, 高新峰, 冯晓峰, 等. 基于点激光的平面法向量估计算法[J]. 机械设计与制造工程, 2026, 55(5): 67-70.

[9] 王兆丰, 闫镔, 童莉, 等. 自适应邻域尺寸选择的点云法向量估计算法[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(4): 1322-1326.

[10] 付永健, 李宗春, 何华. 点云内在属性因子驱动的自适应滚球算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(3): 353-361.

[11] 宋宏戈, 杨瑞峰, 郭晨霞. 点云三维重建之改进的贪婪投影三角化算法[J]. 舰船电子工程, 2025, 45(8): 107-109, 155.

[12] 刘爽, 禹静, 蔡晋辉, 等. 一种双球驱动的三维重建旋转球优化算法[J/OL]. 中国测试, 2022-03-23. <https://link.cnki.net/urlid/51.1714.TB.20220322.1818.034>.

[13] Song Leibo, Gu Yanting, Jiang Quan, et al. Innovative spatial Delaunay triangulation: enhancing accuracy in point cloud-based joint models and shear strength assessments [J]. *Measurement*, 2026, 258: 119112.

[14] 李仁忠, 杨曼, 刘阳阳, 等. 一种散乱点云的均匀精简算法[J]. 光学学报, 2017, 37(7): 97-105.

[15] Lin Junyong, Chen Hongyu, Wu Runkang, et al. Calculating volume of pig point cloud based on improved Poisson reconstruction[J]. *Animals*, 2024, 14(8): 1210.

[16] 宋宏戈, 杨瑞峰, 郭晨霞. 修正点云法向量二义性的泊松重建[J]. 应用激光, 2024, 44(11): 183-190.

[17] Price C A, Papeş M, Sgouralis I, et al. Surface area to volume scaling of alpha shapes and convex hulls fit to lidar derived mangrove island point clouds[J]. *Remote Sensing Letters*, 2024, 15(12): 1259-1269.

[18] 伍阳, 王丽妍, 胡春霞, 等. 可变半径 Alpha Shapes 提取机载 LiDAR 点云建筑物轮廓[J]. 中国图象图形学报, 2021, 26(4): 910-923.

[19] 庞正雅, 周志峰, 王立端, 等. 改进的点云数据三维重建算法[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(2): 199-205.

(本篇专家编审:王帆)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.005
文章编号:1005-7129(2026)05-0023-05 中图分类号:S757.2 文献标识码:A

长白山不同海拔梯度针阔混交林资源结构特征分析

杨军元, 李明泉, 张永君, 蔡志伟, 张兴发
(吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 本文基于 2017 年长白山国家级自然保护区森林资源调查数据, 分析不同海拔梯度针阔混交林资源结构特征。针阔混交林集中分布于 900~1 700 m 海拔区间, 面积占比 90.27%, 蓄积量占比 91.00%。成熟林面积和蓄积量最高, 占比分别为 52.42% 和 56.66%。高郁闭度林分面积最大, 占比为 81.85%。随海拔梯度升高, 低、中郁闭度林分面积占比呈上升趋势, 高郁闭度林分面积占比呈下降趋势。蓄积量占比超 1% 的针叶树种共 4 种 (总蓄积量占比 48.38%), 阔叶树种共 9 种 (总蓄积量占比 46.23%), 长白鱼鳞云杉、臭松和紫椴蓄积量较高。海拔 700~900 m 红松蓄积量占比最高, 海拔>900~1 100 m 紫椴蓄积量占比最高, 海拔>1 100~1 900 m 长白鱼鳞云杉蓄积量占比最高, 海拔>1 900~2 100 m 岳桦蓄积量占比最高。不同海拔梯度林分平均胸径、平均树高差异均达到极显著水平, 海拔≤1 300 m 的林分平均胸径和平均树高均极显著高于海拔>1 300 m 的林分。研究结果可为长白山针阔混交林的科学保护与可持续经营提供依据。

关键词: 海拔梯度; 龄组; 郁闭度; 树种组成; 胸径; 树高

Analysis on Resource Structure Characteristics of Coniferous and Broad-leaved Mixed Forests at Different Altitude Gradients in Changbai Mountain

YANG Junyuan, LI Mingquan, ZHANG Yongjun, CAI Zhiwei, ZHANG Xingfa
(Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: Based on the survey data of forest resources in Changbai Mountain National Nature Reserve in 2017, the resource structure characteristics of coniferous and broad-leaved mixed forests at different altitude gradients were explored in this paper. The coniferous and broad-leaved mixed forest was predominantly distributed at the altitude of 900–1 700 m. The area accounted for 90.27%, and the volume accounted for 91.00%. For the age group, the mature forest was main. The area accounted for 52.42%, and the volume accounted for 56.66%. For the canopy density, the forest with high canopy density was main. The area accounted for 81.85%. With the increase of altitude, the area proportion of the forest with low and medium canopy density increased, and area proportion of the forest with high canopy density decreased. There were 13 species with the volume proportion exceeding 1%. The volume of the four coniferous species accounted for 48.38%, and the volume of the nine broad-leaved species accounted for 46.23%. The volumes of *Picea jezoensis* var. *komarovii*, *Abies nephrolepis*, and *Tilia amurensis* were higher. The volume of *Pinus koraiensis* was the highest at the altitude of 700–900 m. The volume of *Tilia amurensis* was the highest at the altitude of >900–1 100 m, the volume of *Picea jezoensis* var. *komarovii* was the highest at the altitude of >1 100–1 900 m, and the volume of *Betula ermanii* was the highest at the altitude of >1 900–2 100 m. There were extremely significant differences in the average DBH and average tree height of the forest at different altitude gradients. The average DBH and average tree height of the forest with the altitude ≤ 1 300 m were significantly higher than those of the forest with the altitude > 1 300 m. The results of this study could provide the basis for the

收稿日期:2026-05-27
第一作者:杨军元(1970—),男,正高级工程师,从事森林资源管理工作,E-mail:120566261@qq.com。

针阔混交林是温带森林生态系统的典型代表,物种丰富度高、结构复杂、生态服务功能强大,在维持区域生物多样性、涵养水源、固碳释氧以及调节气候等方面发挥着不可替代的作用^[1]。目前,对长白山针阔混交林的研究主要集中在群落物种多样性^[2, 3]、土壤特征^[4, 5]、立地质量评价^[6]等方面,针对不同海拔梯度针阔混交林资源分布规律的系统研究相对较少。本研究基于2017年长白山国家级自然保护区森林资源调查数据,从海拔梯度入手,系统分析不同海拔梯度针阔混交林不同龄组、不同郁闭度的面积和蓄积量,主要树种蓄积量占比以及胸径和树高生长差异,旨在揭示其资源分布规律,为长白山针阔混交林的科学保护、精准经营以及可持续发展提供理论依据和技术支撑。

1 研究地概况

长白山国家级自然保护区位于吉林省东南部,地理位置 $127^{\circ}42'55'' \sim 128^{\circ}16'48''$ E、 $41^{\circ}41'49'' \sim 42^{\circ}25'18''$ N,总面积 $196\,618\text{ hm}^2$,森林覆盖率为 95.56% ^[7]。该区域属典型的大陆性山地气候,具有冬长夏短、春秋相连的特点。年平均气温 $-7 \sim 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端最低气温可达 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$;年降水量 $700 \sim 1\,400\text{ mm}$,降水主要集中在6—9月,占全年降水量的 70% 以上。保护区内有国家重点保护野生植物东北红豆杉(*Taxus cuspidata*)、长白松(*Pinus sylvestris* var. *sylvestrifomis*)等。保护区主要乔木树种包括长白鱼鳞云杉(*Picea jezoensis* var. *komarovii*)、臭松(*Abies nephrolepis*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、枫桦(*Betula costata*)、落叶松(*Larix gmelinii*)、大青杨(*Populus ussuriensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、色木槭(*Acer pictum* subsp. *mono*)、岳桦(*Betula ermanii*)、白桦(*Betula platyphylla*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、山杨(*Populus davidiana*)等。保护区植被类型丰富,拥有世界上最完整的温带山地植被垂直带谱,从低海拔到高海拔依次分布着阔叶林带、针阔混交林带、针叶林带、岳桦林带和高山苔原带,形成了物种丰富、结构稳定、生

态功能完善的森林生态系统。

2 研究方法

2.1 数据来源及海拔梯度划分

本研究的数据来源于2017年长白山国家级自然保护区森林资源本底调查资料。为有效反映不同海拔下植被群落、土壤类型及环境因子的差异,本研究采用 200 m 作为海拔梯度间隔。利用 Arcgis 10.8 提取的各小班高程点可知,针阔混交林在海拔 $766 \sim 2\,018\text{ m}$ 的海拔区间有所分布。本研究共划分7个海拔梯度, $700 \sim 900\text{ m}$ (H1)、 $>900 \sim 1\,100\text{ m}$ (H2)、 $>1\,100 \sim 1\,300\text{ m}$ (H3)、 $>1\,300 \sim 1\,500\text{ m}$ (H4)、 $>1\,500 \sim 1\,700\text{ m}$ (H5)、 $>1\,700 \sim 1\,900\text{ m}$ (H6)、 $>1\,900 \sim 2\,100\text{ m}$ (H7)。

2.2 数据处理与分析

为探讨不同海拔梯度针阔混交林资源结构特征,统计不同海拔梯度下针阔混交林林班数量、小班数量以及不同龄组、不同郁闭度等级($0.2 \sim <0.4$ 为低郁闭度, $0.4 \sim <0.7$ 为中郁闭度, 0.7 以上为高郁闭度)的林分面积、蓄积量。为探讨针阔混交林的主要树种分布,统计主要树种在单个小班中的蓄积量,将同一海拔梯度下所有小班同一树种的蓄积量进行汇总,计算该海拔梯度下单一树种总蓄积量在所有小班总蓄积量的占比。为对比不同海拔梯度针阔混交林胸径和树高的生长差异,对不同海拔梯度的针阔混交林平均胸径和平均树高进行方差分析和多重比较。

采用 Excel 2016 软件进行数据统计,采用 SAS 9.4 软件对数据进行方差分析和最小二乘法(LSD)多重比较。

3 结果与分析

3.1 森林资源分布特征

不同海拔梯度针阔混交林分布情况如表1所示。H2 海拔梯度林分面积和蓄积量最高, H7 海拔梯度林分面积和蓄积量最低。针阔混交林的面积和蓄积量随海拔梯度升高呈先升高后下降的趋势。

表 1 不同海拔梯度针阔混交林分布

Tab. 1 Distribution of coniferous and broad-leaved mixed forests at different altitude gradients

海拔 梯度	林班数 量/个	小班数 量/个	面积/hm ²	蓄积量/m ³
H1	19	85	2 838.46	990 887
H2	130	744	23 865.16	7 984 070
H3	120	507	17 487.50	5 178 620
H4	105	407	9 654.44	2 187 900
H5	95	405	7 918.33	1 516 719
H6	66	195	3 329.52	652 081
H7	8	20	181.56	25 502

不同海拔梯度针阔混交林不同龄组、不同郁闭度等级林分的面积和蓄积量如表 2 和表 3 所示。成熟林面积和蓄积量最高(占比分别为 52.42 %和 56.66 %),其次为过熟林、近熟林、中龄林和幼龄林。H1、H2、H3、H4 海拔梯度成

表 2 不同海拔梯度针阔混交林不同龄组、不同郁闭度等级林分面积

Tab. 2 Areas of coniferous and broad-leaved mixed forests with different age groups and canopy density classes at different altitude gradients

海拔 梯度	面积/hm ²														
	幼龄林			中龄林			近熟林			成熟林			过熟林		
	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度
H1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	82.15	0.00	0.00	437.64	0.00	50.82	1 922.44	0.00	0.00	345.41
H2	0.00	41.23	76.17	0.00	29.37	1 468.49	0.00	54.43	1 920.22	0.00	451.73	12 328.49	0.00	557.94	6 937.09
H3	0.00	0.00	271.63	8.29	29.47	965.45	22.45	193.10	2 061.76	9.07	908.05	9 770.27	8.44	424.75	2 814.77
H4	430.45	592.12	189.79	105.39	337.28	764.25	17.49	334.17	942.54	40.81	1 635.06	3 758.61	1.78	288.35	216.35
H5	286.02	890.53	203.09	162.62	354.42	796.47	7.79	839.65	2 113.54	102.72	977.90	1 124.56	0.00	59.02	0.00
H6	49.54	27.98	31.35	101.72	237.85	180.78	59.04	363.07	1 163.77	159.70	488.21	446.42	0.00	0.00	20.09
H7	0.00	0.00	0.00	10.16	5.61	11.73	2.93	22.92	4.17	7.41	21.69	10.59	0.00	38.37	45.98

表 3 不同海拔梯度针阔混交林不同龄组、不同郁闭度等级林分蓄积量

Tab. 3 Volumes of coniferous and broad-leaved mixed forests with different age groups and canopy density classes at different altitude gradients

海拔 梯度	蓄积量/m ³														
	幼龄林			中龄林			近熟林			成熟林			过熟林		
	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度	低郁 闭度	中郁 闭度	高郁 闭度
H1	0	0	0	0	0	13 476	0	0	149 310	0	8 639	683 157	0	0	136 305
H2	0	7 009	16 196	0	3 951	319 678	0	11 295	526 547	0	115 118	4 188 893	0	184 125	2 611 258
H3	0	0	32 629	829	5 157	189 044	1 436	43 943	584 821	961	225 298	3 029 200	1 384	122 602	941 316
H4	6 719	25 488	17 305	5 196	39 232	127 888	1 487	59 544	237 364	4 872	392 646	1 117 206	151	77 843	74 959
H5	4 176	45 366	18 130	5 509	43 156	154 734	778	133 657	572 012	9 508	172 419	344 476	0	12 798	0
H6	528	1 473	941	4 593	27 502	40 833	6 016	60 122	301 397	16 342	74 096	111 791	0	0	6 447
H7	0	0	0	508	477	2 346	311	3 163	1 326	785	4 920	2467	0	3 236	5 963

熟林面积和蓄积量最高,H5、H6 海拔梯度近熟林面积和蓄积量最高,H7 海拔梯度过熟林面积和蓄积量最高。高郁闭度林分面积最高,面积为 53 426.06 hm²,中郁闭度林分面积次之,为 10 255.09 hm²,低郁闭度林分面积仅为 1 593.82 hm²。H1、H2、H3 海拔梯度低郁闭度和中郁闭度针阔混交林分布较少,高郁闭度针阔混交林占比均为 90 %以上,表明低海拔区域有利于针阔混交林的生长。随着海拔升高,低、中郁闭度针阔混交林的占比逐渐增加,H4 海拔梯度以上中郁闭度林分面积占比超过 30 %,H7 海拔梯度中郁闭度林分占比达 48.79 %、高郁闭度林分占比降至 39.92 %。这主要是由于高海拔地区气候寒冷、风力较大,树木生长受到抑制,同时自然灾害干扰(如风倒、雪压)较为频繁。

3.2 主要树种分布特征

不同海拔梯度针阔混交林主要树种的蓄积量占比如表 4 所示。长白山针阔混交林的树种组成丰富,蓄积量占比超过 1 % 的针叶树种 4 种(总蓄积量占比 48.38 %),阔叶树种 9 种

(总蓄积量占比 46.23 %)。H1 海拔梯度红松的蓄积量占比最高,H2 海拔梯度紫椴的蓄积量占比最高,H3、H4、H5、H6 海拔梯度长白鱼鳞云杉的蓄积量占比最高,成为第一优势树种,H7 海拔梯度岳桦的蓄积量占比最高。

表 4 不同海拔梯度针阔混交林主要树种组成蓄积量占比分布

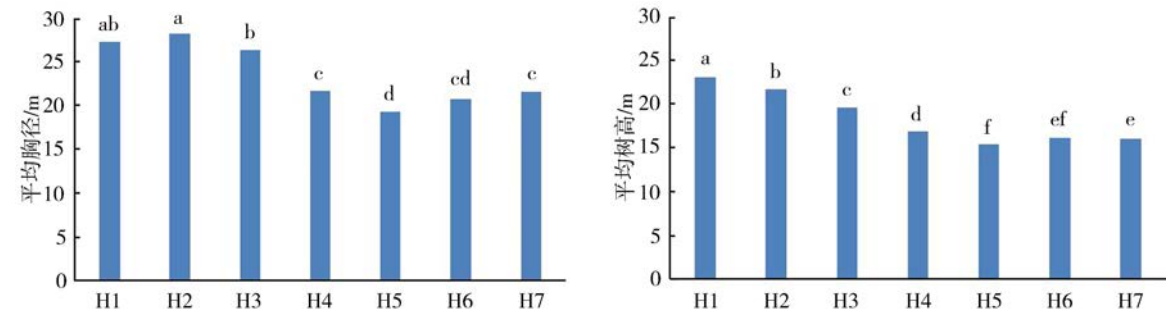
Tab. 4 Distribution of volume proportions of major tree species in coniferous and broad-leaved mixed forests at different altitude gradients

树种	蓄积量占比/%							总体蓄积量占比/%
	H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7	
长白鱼鳞云杉	1.99	8.47	20.51	28.71	36.93	36.70	15.45	17.21
臭松	8.29	14.14	18.60	19.18	16.26	14.98	12.24	15.87
紫椴	22.67	19.50	15.26	6.12	0.24	0.09	0.00	14.62
红松	30.22	15.17	6.62	1.05	0.04	0.00	0.00	10.13
枫桦	0.80	5.33	13.73	17.52	10.68	9.05	5.77	9.44
落叶松	1.77	7.42	3.27	5.05	2.89	3.12	19.95	5.17
大青杨	1.90	4.78	7.26	3.27	0.79	0.24	0.57	4.65
蒙古栎	7.35	8.15	1.88	0.02	0.00	0.00	0.00	4.43
色木槭	9.13	5.81	3.09	1.64	0.00	0.00	0.00	4.05
岳桦	0.00	0.00	0.09	6.03	24.76	30.78	42.09	3.90
白桦	1.87	3.12	2.68	4.11	1.90	0.30	0.00	2.84
水曲柳	5.75	1.65	0.64	0.03	0.00	0.00	0.00	1.20
山杨	0.46	0.99	1.14	2.31	0.58	0.30	0.00	1.10
合计	92.20	94.53	94.77	95.04	95.07	95.56	96.07	94.61

3.3 胸径、树高差异

如图 1 所示,不同海拔梯度的针阔混交林平均胸径和平均树高的差异均达到极显著水平 ($P < 0.01$),说明海拔对林分平均胸径和平均树高的影响较大。H1、H2、H3 海拔梯度的林分平均胸径和平均树高均极显著高于 H4、H5、

H6、H7 海拔梯度。H2 海拔梯度的平均胸径最大(28.2 cm),除了与 H1 海拔梯度的平均胸径差异不显著,与其他海拔梯度的平均胸径差异均达到极显著水平。H1 海拔梯度的平均树高最大(22.8 m),与其他海拔梯度的平均树高差异均达到极显著水平。



注:图中不同小写字母表示不同海拔梯度间平均胸径、平均树高差异极显著 ($P < 0.01$)。

图 1 不同海拔梯度平均胸径和平均树高

Fig. 1 Average diameter at breast height and average tree height of coniferous and broad-leaved mixed forests at different altitude gradients

4 结论与讨论

海拔会影响水热分布,进而影响土壤的理化性质,从而影响林分的生长发育与群落组成。长白山国家级自然保护区内针阔混交林总面积 65 274.97 hm²,总蓄积量 18 535 779 m³,集中分布于>900~1 700 m 海拔区间,面积与蓄积量占比分别为 90.27 %和 91.00 %,针阔混交林的面积和蓄积量随海拔升高呈先升高后降低的单峰分布趋势。成熟林面积与蓄积量最高,占比分别为 52.42 %和 56.66 %,林分整体偏老龄化,中、幼龄林占比较低。不同海拔各龄组面积和蓄积量占比不同,>700~1 500 m 海拔区间成熟林面积和蓄积量最高,>1 500~1 900 m 海拔区间近熟林面积和蓄积量最高,>1 900~2 100 m 海拔区间过熟林面积和蓄积量最高。针阔混交林高郁闭度林分面积最高,占比为 81.85 %,随海拔上升,低、中郁闭度林分占比逐步升高,高海拔地区因气候与自然灾害影响,林分郁闭度明显下降。树种组成方面,蓄积量占比超 1 %的针叶树种共 4 种、阔叶树种共 9 种,长白鱼鳞云杉、臭松和紫椴蓄积量较高,阔叶树种种类虽占优势,但总蓄积量要略小于针叶树种。优势树种随海拔梯度变化发生更替,700~900 m 以红松为主,>900~1 100 m 以紫椴为主,>1 100~1 900 m 长白鱼鳞云杉占比最高,>1 900~2 100 m 岳桦成为优势树种,这是由于不同海拔区间水热条件适合相应的优势树种的生长。袁德强^[8]研究指出三岔子林业有限公司紫椴集中分布于海拔 600~900 m 的中海拔带,可能与地理位置以及气候条件有关。张杰等^[9]研究指出,长白山岳桦林主要分布在海拔 1 500~2 100 m,这与本研究在 1 500~2 100 m 海拔区间长白山针阔混交林中岳桦蓄积量占比较高的结果一致,体现了岳桦林对高海拔严寒、强风环境的特殊适应性。葛静茹等^[10]研究了随海拔变化长白山阔叶红松林群落的结构特征,指出随海拔上升树木的平均胸径未表现出明显变化趋势,平均树高在 700~

750 m 海拔区间相对较小,在 850~900 m 海拔区间最大。本研究中,海拔对平均胸径和平均树高的影响较大,不同海拔梯度平均胸径和平均树高差异极显著,海拔≤1 300 m 林分的平均胸径和平均树高均极显著高于海拔>1 300 m 的林分,这主要是由于海拔≤1 300 m 的林分中成、过熟林的面积比例较高,此外受环境影响,高海拔区域的林木径向和树高生长均较为缓慢。本研究揭示了长白山不同海拔梯度针阔混交林资源分布规律,可为其科学保护与可持续经营提供依据。

参考文献

[1]潘婷,雷云,申玲芝,等. 针阔混交林生态系统特征及生态效益分析[J]. 山地农业生物学报, 2021, 40(5): 40-47.

[2]李其斌,张春雨,赵秀海. 长白山不同演替阶段针阔混交林群落物种多样性及其影响因子[J]. 生态学报, 2022, 42(17): 7147-7155.

[3]李建,李晓宇,曹静,等. 长白山次生针阔混交林群落结构特征及群落动态[J]. 生态学报, 2020, 40(4): 1195-1206.

[4]宋彦彦,张言,管清成,等. 长白山云冷杉针阔混交林土壤有机碳与土壤理化性质的相关性[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(10): 70-74.

[5]时钟瑜,李婕. 长白山不同林型土壤水源涵养功能特征[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 158-164.

[6]刘鑫. 长白山天然云冷杉针阔混交林立地质量评价研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2017: 37-39.

[7]杨军元,侯闯. 吉林长白山国家级自然保护区确界研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2020, 43(6): 50-52.

[8]袁德强. 三岔子林区天然紫椴空间分布与伴生关系研究[J]. 内蒙古林业调查设计, 2025, 48(5): 57-61, 78.

[9]张杰,张海涛,李奇. 不同海拔岳桦林分布特征分析[J]. 林业勘查设计, 2025, 54(1): 19-23, 42.

[10]葛静茹,张荣霞,张金峰,等. 长白山阔叶红松林植物多样性的海拔梯度分异[J]. 林业科学, 2026, 62(2): 230-240.

(本篇专家编审:何怀江)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.006
文章编号:1005-7129(2026)05-0028-05 中图分类号:S718.5 文献标识码:A

采伐干扰对东北天然次生近熟林凋落物分解的影响

孙越¹, 韩姣^{2,3}, 王红博^{2,3}, 罗方⁴, 崔永贵⁵, 罗也^{2,3}

(1. 吉林省林木种子调制储备中心, 吉林 长春 130703; 2. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 3. 吉林省退化森林生态系统恢复与重建跨区域合作科技创新中心, 吉林 长春 130033; 4. 吉林省林木种苗管理站, 吉林 长春 130022; 5. 和龙市自然资源和林业局, 吉林 延边 133599)

摘 要: 为系统了解采伐干扰对凋落物分解过程的影响,以吉林省蛟河市近熟针阔混交林为研究对象,采伐处理分别为对照(CK,0%)、轻度采伐(LT,17%)、中度采伐(MT,34%)和重度采伐(HT,51%),研究采伐强度和分解时间对凋落物分解量、分解残留率的影响。随着分解时间的增加,各采伐强度下调落物分解量均呈逐渐升高趋势。随着采伐强度的增大,凋落物分解量呈逐渐升高的趋势。采伐强度和分解时间单一因素以及两者交互对凋落物分解量均具有极显著影响($P < 0.001$)。各采伐强度下,凋落物分解残留率均随分解时间的增加呈逐渐降低的趋势。随着采伐强度的增大,凋落物分解残留率呈现逐渐下降的趋势。凋落物分解速率指数衰减模型拟合精度均达到极显著水平($P < 0.0001$),CK、LT、MT 和 HT 处理下分解 95%所需时间为 21.43 a、18.78 a、17.23 a 和 15.54 a。综上,采伐可在一定程度上提高凋落物分解速率,且分解速率与采伐强度呈正比,凋落物在 3.5 a 之前分解迅速,分解率为 50%左右,之后分解速率明显下降。本研究为了解东北地区针阔混交林的凋落物分解规律提供了依据。

关键词: 采伐强度;天然次生林;凋落物分解;指数衰减模型

Effects of Cutting Disturbance on Litter Decomposition in Natural Secondary Near-mature Forests in Northeast China

SUN Yue¹, HAN Jiao^{2,3}, WANG Hongbo^{2,3}, LUO Fang⁴, CUI Yonggui⁵, LUO Ye^{2,3}

(1. Forest Seed Processing and Reserve Center of Jilin Province, Changchun 130703, China; 2. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 3. Jilin Province Cross-regional Collaborative Science and Technology Innovation Center of Degraded Forest Ecosystem Restoration and Reconstruction, Changchun 130033, China; 4. Forest Seedling Management Station of Jilin Province, Changchun 130022, China; 5. Natural Resources and Forestry Bureau of Helong City, Yanbian 133599, China)

Abstract: In order to systematically understand the effects of cutting disturbance on the litter decomposition process, the near-mature coniferous and broad-leaved mixed forest in Jiaohe City of Jilin Province was taken as the research object. The different cutting intensities of control (CK, 0% cutting), light cutting (LT, 17%), moderate cutting (MT, 34%), and heavy cutting (HT, 51%) were set up to study the effects of cutting intensity and decomposition time on litter decomposition amount and remaining rate. With the increase of decomposition time, the litter decomposition amount under each cutting intensity increased gradually. With the increase of cutting intensity, the litter decomposition amount showed the gradual increase trend. The cutting intensity, decomposition time, and their interaction had extremely significant effects on litter

收稿日期:2026-04-26
基金项目:吉林省科技发展计划项目(20220101323JC)
第一作者:孙越(1988—),女,助理研究员,主要从事森林生态和经营研究。
通信作者:罗也(1991—),男,副研究员,主要从事森林培育和经营研究,E-mail:1549348929@qq.com。

decomposition amount ($P < 0.001$). Under each cutting intensity, the litter remaining rate decreased gradually with the increase of decomposition time. With the increase of cutting intensity, the litter remaining rate showed the gradual decrease trend. The accuracy of the exponential decay models for litter decomposition rate reached extremely significant level ($P < 0.0001$). Under CK, LT, MT, and HT, the time for 95 % decomposition was 21.43 a, 18.78 a, 17.23 a, and 15.54 a, respectively. In summary, cutting could accelerate litter decomposition to a certain extent, and the decomposition rate was proportional to cutting intensity. Litter decomposed rapidly in the first 3.5 a, with the decomposition rate of about 50 %, and then the decomposition rate decreased significantly. These findings could provide the theoretical basis for understanding the litter decomposition patterns of coniferous and broad-leaved mixed forests in Northeast China.

Keywords: cutting intensity; natural secondary forest; litter decomposition; exponential decay model

凋落物是森林生态系统的重要组成部分,是联结地上植被层和地下土壤层实现物质和能量交换的载体,是树木生长所需的有机和无机养分的来源,在保持水土、减缓径流、促进林分幼苗更新等方面发挥着重要作用^[1-6]。凋落物分解速率影响森林土壤养分供给和有机质转化,受区域位置、林分类型、初始养分状况、土壤理化性质以及土壤微生物等因素的显著影响^[7-9]。研究表明,天然林凋落物分解速率高于人工林^[10],阔叶林高于针叶林^[11],混交林高于纯林^[12],主要原因是天然林环境条件复杂多样,土壤微生物及林分条件有利于凋落物的分解和养分归还,阔叶林相对叶面积比针叶林更大,混交林物种多样性对凋落物分解具有一定的促进作用^[13]。了解林分凋落物分解规律,对于提升森林生态服务功能具有重要作用。

抚育采伐是森林经营作业中常用措施。在当前天然林禁止商业性采伐的前提下,通过控制合理抚育采伐强度开展森林经营是今后林业工作的重心。抚育采伐通过降低林分密度和改变物种组成,直接影响林分保留木生长、生物多样性和功能稳定性^[14, 15],是实现林分环境改善、林分结构调控、森林质量提升和功能发挥的重要技术手段^[16, 17]。已有研究表明,适度采伐通过影响林分环境条件和土壤层理化性质可以加速凋落物分解过程,而过度采伐短期内改变了现有林分凋落物输入,并造成林分环境的急剧变化,在一定程度上减缓了凋落物养分循环。采伐方式及强度、林分所处区域位置及类型、采伐时间等因素显著影响凋落物现存量、分解量等,从而使原有凋落物分解过程产生位移^[18, 19]。

采伐影响凋落物的分解过程,目前对东北天然次生林的影响过程及其规律尚不明确。本文选取吉林省蛟河市近熟针阔混交林为研究对

象,对不同采伐强度下地面凋落物分解量、分解残留率进行分析,分析采伐强度、分解时间对凋落物分解过程的影响及相关性,为了解东北地区针阔混交林的凋落物分解规律提供依据。

1 研究区概况

研究区位于吉林省林业实验区国有林保护中心,地理位置 $127^{\circ}35' \sim 127^{\circ}51' \text{ E}$ 、 $43^{\circ}51' \sim 44^{\circ}05' \text{ N}$,长白山系张广才岭南部,地势由北向南倾斜,平均海拔 506 m。该区处于中纬度北温带,属于大陆性季风气候,春季干燥多风,夏季炎热多雨,秋季短暂多晴,冬季漫长寒冷,年平均气温 3.5°C ,年均降水量 696.5 mm,降水多集中在 6—8 月,无霜期 120~150 d。土壤类型主要为森林土和暗棕壤。该区植被属长白山植物区系,主要林分类型为天然针阔混交林,植被种类复杂。乔木树种主要包括白桦 (*Betula platyphylla*)、白牛槭 (*Acer mandshuricum*)、春榆 (*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、胡桃楸 (*Juglans mandshurica*)、水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、蒙古栎 (*Quercus mongolica*)、紫椴 (*Tilia amurensis*)、红松 (*Pinus koraiensis*)、沙松 (*Abies holophylla*)、红皮云杉 (*Picea koraiensis*) 等,灌木主要包括东北茶藨子 (*Ribes mandshuricum*)、东北山梅花 (*Philadelphus schrenkii*) 和毛榛 (*Corylus mandshurica*) 等,草本植物主要包括宽叶薹草 (*Carex siderosticta*)、蚊子草 (*Filipendula digitata*)、美汉草 (*Meehanian urticifolia*) 和粗茎鳞毛蕨 (*Dryopteris crassirhizoma*) 等。

2 研究方法

2.1 样地设置

以 2011 年设置的天然次生林采伐样地为研究对象,样地海拔为 429~507 m,坡向均为东

坡,按照 CTFS 标准在地形和林分状况大体一致的近熟林内设置 4 块面积为 1 hm² (100 m × 100 m) 的固定样地,为消除边缘效应,每块样地相隔 50 m。4 块样地的采伐处理分别为对照 (CK,胸高断面积采伐强度 0 %)、轻度采伐 (LT,胸高断面积采伐强度 17 %)、中度采伐 (MT,胸高断面积采伐强度 34 %)和重度采伐 (HT,胸高断面积采伐强度 51 %)。

2.2 凋落物分解试验设计

在每个样地内,设置凋落物收集器 32 个,2022 年 5 月底于各凋落物收集器东侧和西侧 0.5 m 处分别放置凋落物分解袋 3 个,每个样地放置凋落物分解袋 192 个,放置时应去除表面凋落物层,漏出土壤层,按照每 3 个为一簇,用铁钉固定在土壤中,并确保 3 个分解袋相互不重叠。每个凋落物分解袋内装入相同质量的混合叶凋落物,同时将一部分凋落物带回实验室测定其含水率。分别于放置后的 3 个月 (0.25 a)、6 个月 (0.5 a)、12 个月 (1 a)、18 个月 (1.5 a)、24 个月 (2 a)、30 个月 (2.5 a)、36 个月 (3 a)和 42 个月 (3.5 a)取样,共计取样 8 次,每次取分解袋 48 个 (每个样地 12 个)。

每次取样后,除去凋落物表面杂草和土壤,带回实验室用水冲洗,风干后封装到信封中,在 85 ℃烘箱内烘干至恒重称取剩余凋落物干重。采用以下公式计算凋落物分解量和分解残留率。

$$W_r = W_0 - W_t$$
$$R = 100 \times W_t / W_0$$

表 1 不同采伐强度在不同分解时间下的凋落物分解量

Tab. 1 Litter decomposition amount under different cutting intensities at different decomposition times

时间	凋落物分解量/g			
	CK	LT	MT	HT
0.25 a	0.38 ± 0.05 b	0.41 ± 0.06 ab	0.44 ± 0.07 a	0.46 ± 0.07 a
0.5 a	0.55 ± 0.06 d	1.01 ± 0.08 c	1.27 ± 0.11 b	1.36 ± 0.09 a
1 a	1.34 ± 0.12 d	1.67 ± 0.18 c	1.78 ± 0.13 b	1.96 ± 0.16 a
1.5 a	2.29 ± 0.15 d	2.79 ± 0.26 c	3.25 ± 0.34 b	3.56 ± 0.29 a
2 a	2.58 ± 0.26 d	3.02 ± 0.35 c	3.56 ± 0.41 b	3.89 ± 0.44 a
2.5 a	3.84 ± 0.24 d	4.13 ± 0.31 c	4.49 ± 0.29 b	4.69 ± 0.11 a
3 a	5.09 ± 0.16 c	5.49 ± 0.21 b	5.61 ± 0.33 b	5.98 ± 0.22 a
3.5 a	6.76 ± 0.39 d	7.34 ± 0.35 c	7.86 ± 0.28 b	8.65 ± 0.17 a

注:表中数据为平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同采伐强度间差异显著($P < 0.05$)。

$$W_0 = W_t(1 - C)$$

式中: W_t 为凋落物分解量/g; W_0 为分解袋中初始凋落物的干重/g; W_t 为不同分解时间取样的分解袋中凋落物干重/g; R 为凋落物分解残留率/%; W_t 为分解袋中初始凋落物的质量/g; C 为分解袋中初始凋落物的含水率。

凋落物衰减模型为 $R = ae^{-bt}$ 。式中: a 为拟合参数; b 为分解常数; t 为分解时间/a。凋落物分解 50 %所需时间 $t_{0.5} = \ln0.5/b$,凋落物分解 95 %所需时间 $t_{0.95} = \ln0.05/b$ 。

2.3 数据处理

利用 SPSS 19.0 软件进行方差分析,比较不同采伐强度及分解时间下调落物分解量的差异,采用 SigmaPlot 12.0 作图。

3 结果与分析

3.1 采伐强度和分解时间对凋落物分解量的影响

不同采伐强度不同分解时间凋落物的分解量见表 1。随分解时间的增加,各采伐强度下调落物分解量均呈逐渐升高趋势。相同分解时间下,随着采伐强度增大凋落物分解量呈逐渐升高的趋势。经多重比较可知,分解时间为 0.25 a 时,LT 与其它采伐处理间均无显著差异,HT 和 MT 之间无显著差异但显著高于 CK;分解时间为 3 a 时,CK 显著低于其它各处理,LT 和 MT 之间无显著差异但显著低于 HT;其它分解时间各采伐处理间差异显著。

为进一步了解采伐强度和分解时间对凋落物分解量的影响,进行双因素方差分析。从表2可以看出,采伐强度和分解时间单一因素以及两者交互对凋落物分解量均具有极显著影响 ($P < 0.001$)。

表 2 采伐强度和分解时间对凋落物分解量的影响的双因素方差分析

Tab. 2 Two-way ANOVA of litter decomposition amount with cutting intensity and decomposition time					
因素	自由度	离均差平方和	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
采伐强度	3	33.789	11.263	365.904	< 0.001
分解时间	7	937.478	133.925	4 350.876	< 0.001
采伐强度 × 分解时间	21	6.256	0.298	9.678	< 0.001

3.2 采伐强度和分解时间对凋落物分解残留率的影响

由图 1 可知,随分解时间的增加,各采伐强度下调落物分解残留率均呈逐渐降低的趋势。相同分解时间下,随着采伐强度增大凋落物分

解残留率呈逐渐降低的趋势,即采伐处理能促进凋落物的分解。分解时间为 3.5 a 时,CK、LT、MT 和 HT 处理下调落物分解残留率分别为 56.92 %、51.74 %、48.22 %和 43.67 %。

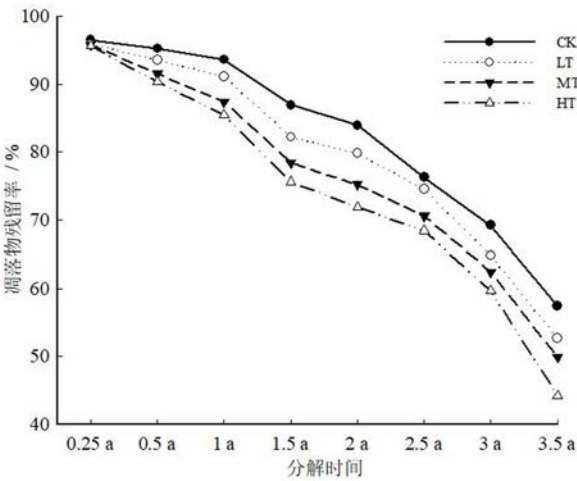


图 1 不同采伐强度在不同分解时间下的凋落物分解残留率

Fig. 1 Litter remaining rate under different cutting intensities at different decomposition times

利用指数衰减模型拟合了 4 种不同采伐强度的凋落物分解速率方程(见表 3),结果显示拟合方程精度均达到极显著水平 ($P < 0.0001$),方程相关系数均为 0.95 左右,且各参数拟合精度也均达到极显著水平 ($P < 0.0001$)。CK、

LT、MT 和 HT 处理下, $t_{0.5}$ 分别为 4.96 a、4.35 a、3.99 a 和 3.60 a, $t_{0.95}$ 分别为 21.43 a、18.78 a、17.23 a 和 15.54 a。从以上结果可以看出,采伐处理可在一定程度上提高凋落物分解速率,随着采伐强度增大分解速率逐渐升高。

表 3 不同采伐强度凋落物分解拟合方程

采伐处理	拟合方程系数		相关系数	$t_{0.5}/a$	$t_{0.95}/a$
	<i>a</i>	<i>b</i>			
CK	102.205 3***	0.139 8***	0.940 6	4.96	21.43
LT	101.670 8***	0.159 5***	0.954 6	4.35	18.78
MT	101.027 6***	0.173 8***	0.957 1	3.99	17.24
HT	100.979 1***	0.192 7***	0.958 1	3.60	15.54

4 讨论与结论

抚育采伐处理可以有效改善林木生长环境、促进树木生长,但是采伐后林分密度明显降低,对森林凋落物积累和分解产生重要影响^[11, 15, 20]。本研究表明,随分解时间的增加各采伐强度下调落物分解量均呈逐渐升高趋势,这与间伐对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林凋落物分解的影响相似^[21]。相同分解时间下,随着采伐强度增大凋落物分解量呈现逐渐升高的趋势,这与简永旗等^[22]的研究结果相似。采伐可在一定程度上提高次生林凋落物分解率,且分解率与采伐强度呈正比,即随着采伐强度增大凋落物分解率逐渐升高。

经双因素方差分析发现,采伐强度和分解时间单一因素以及两者交互均对凋落物分解量具有极显著影响($P < 0.001$)。这与中亚热带天然次生林凋落物分解进程研究的结果保持一致^[23],即二者均显著影响凋落物分解率。本研究表明,各采伐强度下调落物分解残留率均随分解时间的增加呈逐渐降低的趋势,相同分解时间下随着采伐强度增大凋落物分解残留率呈逐渐降低的趋势。这与李荣华等^[7]的研究结果一致,说明采伐处理可促进凋落物的分解,且随着采伐强度增大凋落物分解速率提高。采伐可影响林下植被群落结构,改变叶片凋落物初始养分配比,优化凋落物基质质量、降低分解阻力,进一步加速凋落物失重与养分释放过程,这也是本研究中 HT 处理分解速率持续最优、分解周期最短的主要内在原因。

此外,研究结果发现,分解时间为 3.5 a 时,CK、LT、MT 和 HT 处理凋落物分解残留率分别为 56.92 %、51.74 %、48.22 % 和 43.67 %。利用指数衰减模型拟合凋落物分解率方程可知,CK、LT、MT 和 HT 处理分解 95 % 所需时间为 21.43 a、18.78 a、17.23 a 和 15.54 a,这与辽东地区天然次生林凋落物分解规律的研究结果基本一致^[24],进一步说明高强度采伐可显著缩短凋落物分解周期、提升林地养分周转效率。本研究中凋落物分解具有明显的阶段性特征,凋落物在 3.5 a 之前分解速率快、质量损失为 50 % 左右,3.5 a 后分解速率显著放缓,呈现“前期快速降解、后期慢速稳态分解”的时序规律。这与刘明国等^[24]的研究结果基本吻合,但

本研究各采伐强度凋落物分解周期更长,产生该差异的主要原因在于立地条件与林分本底条件不同,辽东林区水热资源相较于吉林省东部更加充沛,土壤微生物全年代谢活性更高,因此凋落物降解速度更快。郭婧等^[23]对 4 种不同林分凋落物分解率和周转时间进行了分析,结果表明杉木分解率最低、周转期最长,落叶阔叶林分解率最高、周转期最短,凋落物的分解和周转随林分树种多样性增加而加快。高晶等^[25]对不同林型凋落物分解研究表明,山杨(*Populus davidiana*)凋落叶的分解速率最大,其次是白桦凋落叶,蒙古栎凋落叶的分解速率最低,蒙古栎凋落叶在混交林下的分解速率显著大于在纯林下的分解速率。凋落物的分解受到林分类型、区域环境和演替阶段等多种条件的影响,本研究通过开展采伐强度和分解时间等条件因素对凋落物分解的影响研究,可系统了解采伐干扰下东北针阔混交林凋落物分解规律,同时为进一步探讨林分类型、演替阶段等对凋落物分解的影响提供基础数据。

参考文献

- [1] 王相娥, 薛立, 谢腾芳. 凋落物分解研究综述[J]. 土壤通报, 2009, 40(6): 1473-1478.
- [2] 张琴. 红松阔叶林凋落物分解特性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014: 1-9.
- [3] Sánchez-Andrés R, Sánchez-Carrillo S, Alatorre L C, et al. Litterfall dynamics and nutrient decomposition of arid mangroves in the Gulf of California: their role sustaining ecosystem heterotrophy[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 89(3): 191-199.
- [4] Gliksman D, Haenel S, Osem Y, et al. Litter decomposition in Mediterranean pine forests is enhanced by reduced canopy cover[J]. *Plant and Soil*, 2018, 422(1-2): 317-329.
- [5] 黄彩凤, 梁晶晶, 张燕林, 等. 森林凋落物特性及对土壤生态功能影响研究进展[J]. 世界林业研究, 2021, 34(4): 20-25.
- [6] Song Shanshan, Hu Xiaokang, Zhu Jiangling, et al. The decomposition rates of leaf litter and fine root and their temperature sensitivities are influenced differently by biotic factors[J]. *Plant and Soil*, 2021, 461(1-2): 603-616.
- [7] 李荣华, 邓琦, 周国逸, 等. 起始时间对亚热带森林凋落物分解速率的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 699-706. (下转第 43 页)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.007

文章编号:1005-7129(2026)05-0033-06

中图分类号:S436.64

文献标识码:A

小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲 幼虫防治效果的研究

修冬莹¹, 于波¹, 高海燕², 汤政泽³, 张琳琳³, 张英楠³

(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 吉林森工临江林业有限公司, 吉林 白山 134600; 3. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为研究榛实象甲绿色防控技术, 本研究以榛实象甲 4 龄幼虫为靶标, 分别测定了小卷蛾斯氏线虫和苦参碱单独及联合使用的防治效果。结果表明, 二者均具备良好杀虫活性, 浓度 $200 \text{ IJs} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的小卷蛾斯氏线虫悬液处理 72 h 幼虫校正死亡率达 95.833 %, 浓度 $0.400 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的苦参碱溶液处理 72 h 幼虫校正死亡率达 84.259 %。试验浓度的苦参碱溶液对小卷蛾斯氏线虫处理 72 h 幼虫校正死亡率低于 25 %, 苦参碱对小卷蛾斯氏线虫毒性较低。两者联用时, 组合 S2K2 处理 24 h 呈增效作用, 其余组合均呈加成作用, 组合 S5K5 处理 72 h 幼虫的校正死亡率可达 100 %, 联用处理杀虫效果均优于单独使用。小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用可以降低 2 种防治资源的施用剂量, 充分发挥药剂快速致死与昆虫病原线虫长效寄生优势。本研究为榛实象甲绿色防控技术的推广与应用提供了理论依据。

关键词: 榛实象甲; 小卷蛾斯氏线虫; 苦参碱; 绿色防控

Study on the Control Efficacy of Combined Application of *Steinernema carpocapsae* and Matrine against *Curculio dieckmanni* Larvae

XIU Dongying¹, YU Bo¹, GAO Haiyan², TANG Zhengze³, ZHANG Linlin³, ZHANG Yingnan³

(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Linjiang Forestry Limited Company of Jilin Forest Industry Group, Baishan 134600, China; 3. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to study the green prevention and control technologies against *Curculio dieckmanni*, the 4th-instar (mature) larvae of *C. dieckmanni* was used as the target organism, and the control efficacies of single and combined applications of *Steinernema carpocapsae* and matrine were evaluated. The results showed that both of them exhibited favorable insecticidal activity. The corrected mortality of larvae treated with *S. carpocapsae* at the concentration of $200 \text{ IJs} \cdot \text{mL}^{-1}$ for 72 h reached 95.833 %, while the corrected mortality of larvae treated with matrine at the concentration of $0.400 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ for 72 h was 84.259 %. The corrected mortality of *S. carpocapsae* exposed to matrine for 72 h was less than 25 %. Matrine had low toxicity to *S. carpocapsae*. The S2K2 treatment for 24 h showed the synergistic effect, whereas all other combinations showed the additive effect. The corrected mortality of larvae treated with S5K5 for 72 h reached 100 %. The insecticidal efficacy of the combined application was superior to that of either single application. The combined application could

收稿日期:2026-06-22

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20240303093NC)

第一作者:修冬莹(1982—),女,副研究员,主要从事森林保护研究工作,E-mail:25086407@qq.com。

通信作者:张英楠(1982—),男,正高级工程师,主要从事林业调查规划工作,E-mail:48854434@qq.com。

reduce the application dosage and integrate the advantages of rapid knockdown by botanical agents and long-term parasitic efficacy of entomopathogenic nematodes. This study could provide the theoretical basis for the promotion and application of green prevention and control technology against *C. dieckmanni*.

Keywords: *Curculio dieckmanni*; *Steinernema carpocapsae*; matrine; green prevention and control

榛实象甲 (*Curculio dieckmanni*) 是榛园主要的蛀果害虫,具有很强的隐蔽性,防控难度大。未防控的榛园受害果率较高,造成整体减产,受害榛果果仁残缺,商品加工价值降低,严重制约了榛果产业的发展^[1]。

目前,榛实象甲的化学防治主要采用菊酯类或有机磷类药剂叶面喷施灭杀成虫和幼虫,虽见效快,但长期连续施用极易诱发抗药性,且幼虫越冬时藏匿在土壤深处,叶面药剂难以触达,需大剂量土壤灌药,导致土壤农药残留超标,严重影响榛果的食品安全^[2]。其生物防治多采用白僵菌和绿僵菌等真菌,虽环境友好,但其孢子易受土壤湿度和紫外线等因素的抑制,侵染周期较长,难以满足田间生产的防控需求^[3]。

昆虫病原线虫是昆虫的专性寄生性天敌,地下害虫防控的核心应用类群为斯氏线虫属 (*Steinernema*) 与异小杆线虫属 (*Heterorhabditis*),其中小卷蛾斯氏线虫 (*S. carpocapsae*) 是地下鞘翅目幼虫防控优势种,其对多种地下农林害虫有效,校正死亡率最高可达 90 %^[4-10]。在田间应用中存在强光紫外线下线虫活性迅速降低、土壤干燥阻碍线虫移动搜寻、低温时侵染活性大幅降低等问题,为达到理想防效需大幅提升线虫施用浓度,显著增加了防控成本。利用低毒药剂削弱害虫防御能力,提升线虫侵染效率,已成为近年来地下害虫绿色防控的研究重点。Viteri D M 等^[11]将小卷蛾斯氏线虫与氯虫苯甲酰胺复配,Negrisoil A S 等^[12]将印度异小杆线虫 (*Heterorhabditis indica*) 与虱螨脲复配,对草地贪夜蛾 (*Spodoptera frugiperda*) 的防控效果良好。苦参碱是植物源生物碱,具有降解周期短和环境残留低的优点,可降低寄主昆虫对病原线虫的机械防御,其主要作用靶标为昆虫谷氨酸门控氯离子通道,干扰 Glu-GABA 神经调控系统,削弱寄主的免疫防御系统,降低抵抗能力^[13, 14]。小卷蛾斯氏线虫与苦参碱互补的作用通路,为二者的联用奠定了扎实的理论协同基础。

本研究以榛实象甲 4 龄幼虫为靶标害虫,开展了小卷蛾斯氏线虫与苦参碱的联用防治效果研究,明确了两种防治资源的适配性与增效潜力,可为制定榛实象甲的低毒绿色防控方案提供一定的技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 供试昆虫

榛实象甲幼虫为 2024 年 9 月采自吉林省吉林市缸窑镇溪浪臻农场(地理位置 126°38'13" E、44°09'37" N)。将带虫榛果平铺于高温灭菌后的湿润土壤基质上,待榛实象甲老熟幼虫(4 龄幼虫)自然咬破果壳脱果入土后,收集全部土壤置于塑料盆中,保持土壤湿润,环境温度 (22±1) °C,放置在阴凉通风处待用。

1.1.2 供试线虫

小卷蛾斯氏线虫购自山东省潍坊宏润农业科技有限公司,采用大蜡螟 (*Galleria mellonella*) 老熟幼虫在 (25±1) °C 下进行室内扩繁,获得侵染期线虫幼虫,将其用蒸馏水清洗 3 次,配制 1 000 IJs · mL⁻¹ 的悬液,8 °C 低温冷藏保存备用,储存时长不超过 15 d。

1.1.3 供试药剂

苦参碱购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,CAS 为 519-02-8,纯度规格为分析标准品 (≥98 %)。

1.2 试验方法

1.2.1 小卷蛾斯氏线虫对榛实象甲幼虫的毒力测定

试验前将小卷蛾斯氏线虫悬液室温静置 1 h,体视镜 (20×) 检测线虫存活率 ≥95 %,配制浓度为 10 IJs · mL⁻¹、20 IJs · mL⁻¹、50 IJs · mL⁻¹、100 IJs · mL⁻¹ 和 200 IJs · mL⁻¹ 的悬液。采用培养皿滤纸浸渍法进行毒力测定,在玻璃培养皿(直径 9 cm)中平铺放置 1 张圆形滤纸,向滤纸均匀滴加 1 mL 对应浓度的处理液,使滤纸完全浸润、无多余积液,每皿放入 10 头健康且大小一致的榛实象甲 4 龄幼虫,盖上皿盖,用封口

膜密封保湿,以无菌水处理作为空白对照,置于 $(22\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 全黑暗恒温人工气候箱(RTOP-268Y,浙江托普云农科技股份有限公司)内饲养,于12 h、24 h、36 h、48 h、60 h和72 h分别调查榛实象甲幼虫死亡情况,每组试验重复3次。计算幼虫死亡率(死亡幼虫数量占初始幼虫数量的百分比)和校正死亡率($D/\%$), $D = 100 \times (D_1 - D_0)/(1 - D_0)$ 。式中: D_1 为处理区幼虫死亡率/%; D_0 为对照区幼虫死亡率/%。

1.2.2 苦参碱对榛实象甲幼虫的毒力测定

将苦参碱粉末用无菌蒸馏水配制成浓度为 $0.025\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.050\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.100\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.200\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $0.400\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的溶液,毒力测定方法同1.2.1。

1.2.3 苦参碱对小卷蛾斯氏线虫的毒力测定

在10 mL浓度为 $1\,000\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的小卷蛾斯氏线虫悬液中,分别加入0.25 mg、0.50 mg、1.00 mg、2.00 mg和4.00 mg苦参碱粉末,混合均匀,配制成苦参碱浓度为 $0.025\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.050\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.100\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.200\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $0.400\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的混合液,以不加苦参碱的小卷蛾斯氏线虫悬液作为对照,于 $(22\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 全黑暗恒温人工气候箱内培育,分别在12 h、24 h、36 h、48 h、60 h和72 h随机取0.1 mL混合液,体视镜($20\times$)下统计小卷蛾斯氏线虫存活数量,每组试验重复3次。

1.2.4 小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲幼虫的毒力测定

设置4种不同浓度组合进行复配,分别为S2K2、S2K5、S5K2、S5K5。其中,S、K分别指代小卷蛾斯氏线虫、苦参碱,2、5分别代表 LC_{25} 、 LC_{50} 浓度。毒力测定方法同1.2.1。

由 χ^2 检验判断联合作用类型^[15-17], $\chi^2 = (M_A - M_E)^2/M_E$, $M_A = D_A \times N$, $M_E = D_E \times N$, $D_E = D_N + D_B - D_B \cdot D_N$ 。式中: M_A 为联用处理实际校正死亡数量/只; M_E 为联用处理期望致死数量/只; D_A 为联用处理实际校正死亡率/%; N 为参试昆虫数量/只; D_E 为联用处理期望致死率/%; D_N 为小卷蛾斯氏线虫单独处理校正死亡率/%; D_B 为苦参碱单独处理校正死亡率/%。 $\chi^2 \geq 3.84$ 且 $M_A < M_E$ 表明二者联用毒力明显低于单独毒力总和,为拮抗作用; $\chi^2 < 3.84$ 表明二者联用毒力与单独毒力总和

相近,为加成作用; $\chi^2 \geq 3.84$ 且 $M_A > M_E$ 表明二者联用毒力显著高于单独毒力总和,为增效作用。

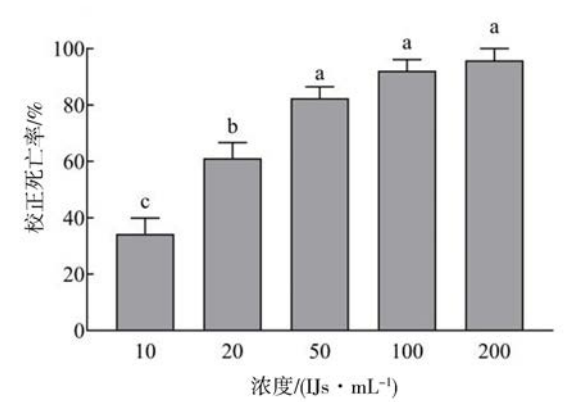
1.3 数据分析

校正死亡率百分数值均经反正弦转换后在Excel 2016与IBM SPSS Statistics 27统计软件上完成分析。处理之间采用单因素方差分析(ANOVA)以及Duncan新复极差法进行多重比较检验差异显著性。毒力回归方程及致死中浓度用Probit模型分析。

2 结果与分析

2.1 小卷蛾斯氏线虫对榛实象甲幼虫的毒力

小卷蛾斯氏线虫处理72 h榛实象甲幼虫校正死亡率如图1所示,悬液浓度对校正死亡率影响显著($P < 0.05$),校正死亡率随悬液浓度的升高而升高。 $200\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $100\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和 $50\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的校正死亡率均为80%以上,三者差异不显著,但均显著高于其他低浓度下的校正死亡率; $20\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的校正死亡率显著高于 $10\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度下的校正死亡率。处理72 h毒力回归方程为 $y = 1.456x - 1.411$,相关系数为0.975, LC_{25} 为 $3.208\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$, LC_{50} 为 $9.326\text{ IJs}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。



注:图中不同小写字母表示不同浓度间差异显著($P < 0.05$)。下同。

图1 小卷蛾斯氏线虫对榛实象甲幼虫的毒力

Fig. 1 Toxicity of *S. carpocapsae* to *C. dieckmanni* larvae

2.2 苦参碱对榛实象甲幼虫的毒力

苦参碱处理72 h榛实象甲幼虫校正死亡率如图2所示,溶液浓度对校正死亡率影响显著($P < 0.05$),校正死亡率随溶液浓度的升高而升高。 $0.400\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 、 $0.200\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 和

0.100 mg · mL⁻¹ 浓度下的校正死亡率处于较高水平(70 %以上),三者差异不显著,但均显著高于其他低浓度下的校正死亡率;0.050 mg · mL⁻¹ 与 0.025 mg · mL⁻¹ 浓度下的校正死亡率差异不显著,分别为 46.30 %和 30.09 %。处理 72 h 毒力回归方程为 $y = 1.179x + 1.663$,相关系数为 0.927,LC₂₅ 为 0.010 mg · mL⁻¹,LC₅₀ 为 0.039 mg · mL⁻¹。

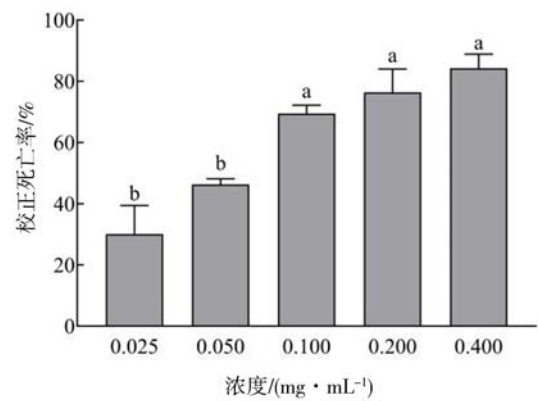


图 2 苦参碱对榛实象甲幼虫的毒力

Fig. 2 Toxicity of matrine to *C. dieckmanni* larvae

2.3 苦参碱对小卷蛾斯氏线虫的毒力

苦参碱处理小卷蛾斯氏线虫校正死亡率如图 3 所示,不同浓度溶液处理校正死亡率均随处理时间延长而升高,相同处理时间校正死亡率随溶液浓度升高而升高。0.025 mg · mL⁻¹ 和 0.050 mg · mL⁻¹ 浓度下的校正死亡率较低,12~24 h 增长平缓,36 h 小幅提高,72 h 校正死亡率分别为 3.454 %、5.882 %;0.100 mg · mL⁻¹、0.200 mg · mL⁻¹ 和 0.400 mg · mL⁻¹ 浓度下

72 h 校正死亡率分别为 12.131 %、18.382 %、22.549 %。72 h 的最高校正死亡率不超过 25 %,说明苦参碱与小卷蛾斯氏线虫的联用安全性较高。

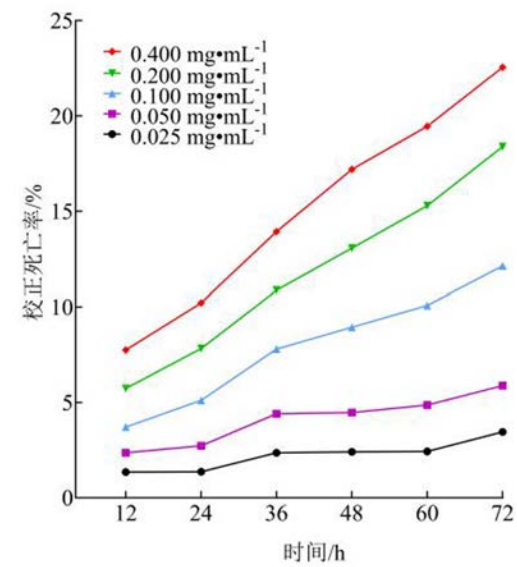


图 3 苦参碱对小卷蛾斯氏线虫的毒力

Fig. 3 Toxicity of matrine to *S. carpocapsae*

2.4 小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲幼虫的毒力

小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲幼虫的毒力如表 1 所示。组合 S2K2 处理 24 h 呈增效作用,其他处理时间呈加成作用;其余组合均呈加成作用。校正死亡率随处理时间延长而升高且差异显著($P < 0.05$)。所有复配组合校正死亡率均高于单剂处理,组合 S5K5 处理 72 h 校正死亡率可达 100 %。

表 1 小卷蛾斯氏线虫与苦参碱联用对榛实象甲幼虫的毒力

Tab. 1 Toxicity of combined application of <i>S. carpocapsae</i> and matrine to <i>C. dieckmanni</i> larvae						
组合	时间/h	D_N /%	D_B /%	D_A /%	χ^2	作用类型
S2K2	12	3.333 ± 3.333 a	0.000 ± 0.000 a	3.333 ± 3.333 a D	0.000	加成
	24	3.333 ± 7.229 ab	0.000 ± 0.000 b	17.778 ± 3.395 a C	6.259	增效
	36	7.407 ± 3.704 b	3.704 ± 3.704 b	29.630 ± 3.704 a C	3.259	加成
	48	18.519 ± 9.799 b	11.111 ± 6.415 b	45.833 ± 5.258 a B	1.209	加成
	60	25.000 ± 7.217 b	12.500 ± 7.217 b	58.333 ± 4.167 a AB	1.670	加成
	72	33.929 ± 10.463 b	21.429 ± 8.052 b	69.048 ± 5.952 a A	0.914	加成
S2K5	12	3.333 ± 3.333 a	3.333 ± 3.333 a	10.370 ± 0.370 a D	0.222	加成
	24	3.333 ± 7.229 a	7.037 ± 3.533 a	21.111 ± 5.481 a D	1.188	加成
	36	7.407 ± 3.704 b	14.815 ± 3.704 b	40.741 ± 3.704 a C	1.821	加成
	48	18.519 ± 9.799 b	23.148 ± 0.926 b	57.407 ± 4.900 a B	1.073	加成
	60	25.000 ± 7.217 b	29.167 ± 4.167 b	70.833 ± 4.167 a AB	1.225	加成
	72	33.929 ± 10.463 b	39.286 ± 1.786 b	82.143 ± 5.357 a A	0.827	加成

表 1(续)

组合	时间/h	$D_N/\%$	$D_B/\%$	$D_A/\%$	χ^2	作用类型
S5K2	12	7.037 ± 3.533 ab	0.000 ± 0.000 b	10.370 ± 0.370 a D	0.158	加成
	24	14.074 ± 7.066 ab	0.000 ± 0.000 b	21.111 ± 5.481 a D	0.352	加成
	36	22.222 ± 6.415 b	3.704 ± 3.704 c	48.148 ± 3.704 a C	2.116	加成
	48	41.667 ± 8.929 b	11.111 ± 6.415 c	68.981 ± 4.560 a B	0.901	加成
	60	50.000 ± 7.217 b	12.500 ± 7.217 c	83.333 ± 4.167 a A	1.304	加成
	72	60.119 ± 9.355 b	21.429 ± 8.052 c	95.238 ± 4.762 a A	1.028	加成
S5K5	12	7.037 ± 3.533 a	3.333 ± 3.333 a	13.704 ± 3.164 a E	0.126	加成
	24	14.074 ± 7.066 ab	7.037 ± 3.533 b	31.852 ± 5.1985 a D	0.684	加成
	36	22.222 ± 6.415 b	14.815 ± 3.704 b	59.259 ± 3.704 a C	1.929	加成
	48	41.667 ± 8.929 b	23.148 ± 0.926 b	80.556 ± 4.243 a B	1.168	加成
	60	50.000 ± 7.217 b	29.167 ± 4.167 c	95.833 ± 4.167 a A	1.512	加成
	72	60.119 ± 9.355 b	39.286 ± 1.786 c	100.000 ± 0.000 a A	0.774	加成

注:表中数据为平均值±标准误差;同行不同小写字母表示各校正死亡率之间差异显著($P < 0.05$);同列不同大写字母表示相同组合不同处理时间之间差异显著($P < 0.05$)。

3 讨论与结论

斯氏线虫的寄主昆虫范围广泛,包含膜翅目、鳞翅目和鞘翅目等诸多种类的昆虫。易松望等^[18]利用小卷蛾斯氏线虫、长尾斯氏线虫(*S. longicaudum*)和芜菁夜蛾斯氏线虫(*S. feltiae*)防治红火蚁(*Solenopsis invicta*),3种线虫对红火蚁幼虫均具有较高的致病力,处理3 d后幼虫的校正致死率均达100%。刘琴等^[19]利用小卷蛾斯氏线虫防治水稻二化螟(*Chilo suppressalis*),稻茬越冬代二化螟防效达85.2%。张彦龙等^[20]利用小卷蛾斯氏线虫和异小杆线虫防治松褐天牛(*Monochamus alternatus*),小卷蛾斯氏线虫对3龄幼虫的最高致死率可达82.22%。本试验结果表明,小卷蛾斯氏线虫对榛实象甲老熟幼虫具备较高的致病力,校正死亡率随悬液浓度的升高而升高,浓度≥50 IJs·mL⁻¹的悬液处理72 h校正死亡率为80%以上,证明小卷蛾斯氏线虫是防治榛实象甲的优势生防线虫。

榛实象甲老熟幼虫校正死亡率随苦参碱溶液浓度的升高而升高。0.025 mg·mL⁻¹和0.050 mg·mL⁻¹低浓度下的校正死亡率较低,0.100 mg·mL⁻¹浓度杀虫活性大幅提高。闫飞扬等^[21]的研究中苦参碱对核桃星尺蛾(*Ophthalmodes albosignaria*)的校正死亡率也随着浓度的升高而升高。

本试验结果显示,苦参碱对小卷蛾斯氏线虫毒性较低,72 h最高线虫校正死亡率未超过

25%,0.025 mg·mL⁻¹和0.050 mg·mL⁻¹低浓度下线虫存活率超94%,联用的安全性良好,这可能与苦参碱的作用机制有关。苦参碱竞争性结合昆虫乙酰胆碱酯酶活性位点在榛实象甲和线虫体内究竟有何区别,还有待进一步深入研究。

基于 χ^2 检验判定标准,低浓度复配组合S2K2处理24 h呈增效作用,其他复配组合均为加成作用,证实二者联用具备协同增效的潜力,且增效效应集中在害虫侵染前期。所有复配组合校正死亡率均高于单剂处理,且随处理时间的延长持续提升,72 h时S5K5组合校正死亡率达100%。复配能够大幅降低两种生防资源的使用剂量,减少线虫投入成本、降低苦参碱田间施用浓度,缓解单一制剂短板。刘章扬等^[22]、朱丽梅等^[23]和宋其岩等^[24]的研究也表明多数组合为加成作用。推测是高浓度下两种药剂各自杀虫能力已接近饱和,叠加效应不再显著放大,而低浓度复配可在害虫免疫防御尚未完全建立的前期实现增效作用^[25]。本研究兼顾了昆虫寄生性天敌长效控害与植物源药剂快速击倒优势,提高了防治效率,丰富了榛实象甲的绿色可持续防治方案,为今后田间防治选用低剂量复配方案实现低成本高效防控提供了借鉴和参考。

参考文献

[1]李维根,姜策,陈静,等. 辽宁省榛实象甲幼虫种群动态和防治适期研究初探[J]. 中国植保导刊,

- 2020, 40(11): 63–64, 76.
- [2] 刘安迪. 榛树榛实象甲化学防治与农药残留研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023: 23–40.
- [3] Batalla–Carrera L, Morton A, Santamaria S, et al. Isolation and virulence of entomopathogenic fungi against larvae of hazelnut weevil *Curculio nucum* (Coleoptera, Curculionidae) and the effects of combining *Metarhizium anisopliae* with entomopathogenic nematodes in the laboratory [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2013, 23(1): 101–125.
- [4] Ghavamabad R G, Talebi A A, Pedram M, et al. Efficacy of entomopathogenic nematodes against *Cydalima perspectalis* and *Hyphantria cunea* (Lepidoptera), two invasive forest pests in Iran [J]. *International Journal of Pest Management*, 2026, 72(3): 386–400.
- [5] Patil J, Nekkanti A, Gowda M T, et al. Entomopathogenic nematodes and fungi work synergistically to mitigate *Spodoptera frugiperda* (J. E. Smith) (Lepidoptera: Noctuidae) in maize [J]. *Crop Protection*, 2026, 207: 107672.
- [6] Liu Guanfeng, Jiang Tong, Wu Rui, et al. An integrated above–belowground biological control strategy against *Phyllotreta striolata* using entomopathogenic nematodes and fungi [J]. *Pest Management Science*, 2026, 82: 70889.
- [7] 朱华琚, 段德勇, 吴胜莲, 等. 昆虫病原线虫共生菌对二化螟体内微生物群落结构的影响 [J]. *生物技术通报*, 2026, 42(5): 213–221.
- [8] 赵奎军, 张丽坤, 宋捷, 等. 应用斯氏线虫防治 8 种鳞翅目、鞘翅目昆虫的研究 [J]. *植物保护学报*, 1996, 23(1): 20–24.
- [9] 冯翠, 衣政伟, 谢吉先, 等. 昆虫病原线虫对花生田蛱蝶防治效果评价 [J]. *江苏农业科学*, 2021, 49(8): 108–111.
- [10] 陈贤群, 刘奇志, 曹景富, 等. 两种昆虫病原线虫防治核桃云斑天牛田间效果评价 [J]. *中国生物防治学报*, 2016, 32(4): 456–461.
- [11] Viteri D M, Linares A M, Flores L. Use of the entomopathogenic nematode *Steinernema carpocapsae* in combination with low–toxicity insecticides to control fall armyworm (Lepidoptera: Noctuidae) larvae [J]. *Florida Entomologist*, 2018, 101(2): 327–329.
- [12] Negrison A S, Garcia M S, Barbosa N, et al. Efficacy of entomopathogenic nematodes (Nematoda: Rhabditida) and insecticide mixtures to control *Spodoptera frugiperda* (Smith, 1797) (Lepidoptera: Noctuidae) in corn crops [J]. *Crop Protection*, 2010, 29(7): 677–683.
- [13] 马铤. 苦参碱对豌豆蚜的毒杀作用机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022: 19–29.
- [14] 郝德君, 陆佳伟, 殷丽. 3 种生物农药对悬铃木方翅网蝽的室内毒力及解毒酶活性的影响 [J]. *林业科学*, 2012, 48(7): 86–91.
- [15] Koppenhöfer A M, Kaya H K. Additive and synergistic interaction between entomopathogenic nematodes and *Bacillus thuringiensis* for scarab grub control [J]. *Biological Control*, 1997, 8(2): 131–137.
- [16] Koppenhöfer A M, Cowles R S, Cowles E A, et al. Comparison of neonicotinoid insecticides as synergists for entomopathogenic nematodes [J]. *Biological Control*, 2002, 24(1): 90–97.
- [17] McVay J R, Gudauskas R T, Harper J D. Effects of *Bacillus thuringiensis* nuclear–polyhedrosis virus mixtures on *Trichoplusia ni* larvae [J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 1977, 29(3): 367–372.
- [18] 易松望, 李晓维, 陈利民, 等. 昆虫病原线虫对红火蚁的致病力及田间防控效果 [J]. *环境昆虫学报*, 2024, 46(3): 711–717.
- [19] 刘琴, 韩光杰, 李传明, 等. 昆虫病原线虫 N–Yz1 对水稻二化螟的控制作用 [J]. *中国生物防治学报*, 2024, 40(5): 1015–1021.
- [20] 张彦龙, 杨忠岐, 王小艺, 等. 2 种昆虫病原线虫对松褐天牛幼虫的控制力测定 [J]. *林业科学*, 2012, 48(12): 64–70.
- [21] 闫飞扬, 王思远, 王文永. 苦参碱生物杀虫剂防治核桃星尺蛾试验研究 [J]. *特种经济动植物*, 2022, 25(9): 15–17.
- [22] 刘章扬, 周勇, 刘洪, 等. 烟草废弃物的乙醇提取物对松材线虫的毒杀效果及复配增效作用 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2026, 46(1): 43–49, 103.
- [23] 朱丽梅, 张哲, 陈宇峰. 5 种杀虫剂对烟粉虱杀虫活性的比较和增效组合筛选 [J]. *金陵科技学院学报*, 2025, 41(2): 87–92.
- [24] 宋其岩, 莫苑萍, 沈建军, 等. 植物精油对松材线虫的毒杀效果及山苍子精油复配增效作用 [J]. *东北林业大学学报*, 2025, 53(5): 136–143.
- [25] 陈滢冲, 江雅琴, 陈静, 等. 天维菌素 B 杀虫活性测定及防治小菜蛾复配配方筛选 [J]. *农药学报*, 2024, 26(4): 765–772.

(本篇专家编审: 李立梅)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.008

文章编号:1005-7129(2026)05-0039-05

中图分类号:S567.51

文献标识码:A

吉林向海国家级自然保护区白枕鹤 繁殖与迁徙栖息地特征研究

李红旭

(吉林向海国家级自然保护区管理局,吉林 白城 137215)

摘 要: 本文以吉林向海国家级自然保护区为研究区,基于 1993—2025 年繁殖监测与 2017—2025 年迁徙观测数据,分析白枕鹤繁殖种群时空演变、迁徙停歇生境特征。结果表明,因核心区芦苇沼泽持续发生演替,保护区白枕鹤繁殖种群繁殖巢址已由核心区大面积天然湿地全面转移至实验区沼泽湿地,繁殖区域面积缩小,近年来仅在实验区仙鹤岛维持 1 巢,目前为吉林省唯一一对繁殖的白枕鹤。白枕鹤繁殖生境面积阈值降低,主要受水源、食物和人类干扰程度的影响,保护重点应转向湿地管护、水文精准调控与低干扰栖息环境维持。迁徙种群的生境利用为湿地—农田复合模式,农田觅食占比 35.42%,且常与白鹤、白头鹤、灰鹤、丹顶鹤混群(混群次数占比 75%),种间竞争微弱。研究结果可为区域鹤类精准保护与湿地恢复提供科学依据。

关键词: 白枕鹤;繁殖栖息地;迁徙停歇地;生境多型化;吉林向海国家级自然保护区

Characteristics of Breeding and Migratory Habitat of *Grus vipio* in Jilin Xianghai National Nature Reserve

LI Hongxu

(Jilin Xianghai National Nature Reserve Administration, Baicheng 137215, China)

Abstract: Jilin Xianghai National Nature Reserve was taken as the research area in this study. Based on the breeding monitoring data from 1993 to 2025 and the migratory observation data from 2017 to 2025, the spatiotemporal variation of *Grus vipio* breeding population and the habitat characteristics of their migration stopover site were analyzed. The results showed that due to the continuous succession of the reed marsh in the core zone, the breeding nest site of the breeding population had been completely transferred from the natural wetland in the core zone to the marsh wetland in the experimental zone and the breeding area had been reduced. In recent years, only one breeding pair had persisted at Xianhe Island in the experimental zone. The area threshold of breeding habitat for *Grus vipio* reduced. *Grus vipio* was mainly affected by hydrological regimes, food and human disturbance. The conservation priorities should focus on wetland management, precise hydrological regulation and the maintenance of low-disturbance habitats. The migratory population adopted the mixed habitat strategy combining natural wetlands and farmlands, with 35.42% of their foraging activities occurring on croplands. They formed mixed-species flocks with *Grus leucogeranus*, *Grus monacha*, *Grus grus* and *Grus japonensis* in 75% of field observations, accompanied by negligible interspecific competition. The findings could provide scientific references for crane conservation and wetland restoration in the targeted region.

Keywords: *Grus vipio*; breeding habitat; migratory stopover site; habitat polymorphism; Jilin Xianghai National Nature Reserve

收稿日期:2026-05-09

作者简介:李红旭(1995—),女,助理工程师,硕士研究生,主要从事科研监测与资源保护工作,E-mail:1156058042@qq.com。

白枕鹤 (*Grus vipio*) 属鹤形目鹤科, 为易危物种 (VU, IUCN), 是国家 I 级重点保护野生动物, 其种群动态可直接反映湿地生态系统健康状况^[1-3]。吉林向海国家级自然保护区 (以下简称向海保护区) 位于吉林省通榆县西北部, 总面积 105 467 hm², 是以保护丹顶鹤 (*Grus japonensis*) 等珍稀水禽和蒙古黄榆 (*Ulmus macrocarpa* var. *mongolica*) 等稀有植物群落为主要目的的内陆湿地与水域生态系统类型的自然保护区^[4-6]。目前, 关于向海保护区白枕鹤的研究较少, 缺乏基于长时序数据的系统性分析。本文依托 1993—2025 年白枕鹤野外监测记录, 研究向海保护区白枕鹤繁殖分布格局的时空演变以及迁徙停歇种群对该区域湿地与农田资源的利用, 以期为该区域鹤类的精准保护提供科学依据。

1 野外调查与数据划分

1.1 野外调查

本研究建立了 22 个固定观测位点, 通过定点观测法在繁殖期及春秋迁徙期进行每日逐点巡逻监测。主要观测工具为单筒变焦望远镜 (16-60 × 80) 和双筒望远镜 (10 × 50)。

1.2 数据划分

参照谷彦昌等^[7]的方法, 将繁殖行为定义

为观察到配对、筑巢、孵卵, 将迁徙行为定义为非繁殖期的集群、觅食及短暂停留。

繁殖种群数据涵盖 1993—2025 年的繁殖期 (4—7 月) 记录, 包括年份、监测位置、繁殖生境主要植被类型与面积、干扰类型及行为描述。

迁徙种群数据涵盖 2017—2025 年的春秋迁徙期 (3—5 月, 9—11 月) 记录, 包括观测日期、具体位点、生境类型、行为状态及种群数量。

2 结果与分析

2.1 繁殖种群的时空动态与干扰响应

白枕鹤繁殖种群繁殖巢址与生境状况见表 1 和表 2, 可以看出白枕鹤繁殖种群呈现出明显的时空压缩趋势。早期 (1993—2008 年) 高度集中于核心区以芦苇为主要植被的沼泽湿地。此阶段人为干扰较少, 主要为较远的同发滚水坝的车辆干扰。近期 (2009—2025 年) 明显向实验区转移。特别是 2023—2025 年, 监测发现连续 3 年同 1 对白枕鹤选择在仙鹤岛观鹤台南侧繁殖 (见图 1、图 2), 为吉林省目前唯一一对繁殖的白枕鹤。其在距离旅游项目 610 m 处营巢, 尽管面临较高强度干扰, 白枕鹤并未弃巢。2025 年 4 月 16 日的记录显示 1 只白枕鹤在孵化, 1 只在距离 30 m 处放哨, 这表明亲鸟在能量分配上大幅增加了警戒投入。

表 1 白枕鹤繁殖巢址情况

Tab. 1 Breeding nest sites of *Grus vipio*

年份	繁殖巢址 (监测期间芦苇沼泽面积)	区域	繁殖巢数量/巢
1993	同发滚水坝东侧 (270.32 hm ²)	核心区	1
1994	付老文泡北侧 (106.55 hm ²)	核心区	1
2000	长龙坨西侧 (116.36 hm ²)、付老文泡北侧 (106.55 hm ²)	核心区	2
2001	同发滚水坝东侧 (270.32 hm ²)、长龙坨西侧 (116.36 hm ²)、付老文泡北侧 (106.55 hm ²)	核心区	3
2002	碱地泡 (127.50 hm ²)、同发滚水坝东侧 (270.32 hm ²)	核心区	2
2003	同发滚水坝东侧 (270.32 hm ²)	核心区	1
2008	长龙坨西侧 (116.36 hm ²)、大肚泡东闸门 (3.23 hm ²)	核心区、实验区	2
2010	大肚泡东闸门 (3.23 hm ²)	实验区	1
2011	仙鹤岛观鹤台南侧 (52.18 hm ²)	实验区	1
2023	仙鹤岛观鹤台南侧 (52.18 hm ²)	实验区	1
2024	仙鹤岛观鹤台南侧 (52.18 hm ²)	实验区	1
2025	仙鹤岛观鹤台南侧 (52.18 hm ²)	实验区	1

表 2 白枕鹤繁殖生境状况
Tab. 2 Breeding habitats of *Grus vipio*

所在区域	典型点位	历史繁殖期生境与主要植被	近五年生境类型与主要植被	干扰类型	干扰距离
核心区	长龙坨西侧	芦苇沼泽	草甸、明水边缘稀疏芦苇和香蒲混生	无	—
	付老文泡北侧	芦苇沼泽	草甸、明水边缘稀疏香蒲和芦苇混生	无	—
	同发滚水坝东侧	芦苇沼泽	草甸、少量芦苇和香蒲	坝上车辆	1 100 m
实验区	碱地泡	芦苇沼泽	以香蒲为主的沼泽	无	—
	大肚泡东闸门	芦苇沼泽	以香蒲为主的沼泽	公路交通	66 m
	仙鹤岛观鹤台南侧	芦苇沼泽	以芦苇为主的沼泽	旅游	610 m



图 1 白枕鹤繁殖的芦苇生境

Fig. 1 Reed habitat of *Grus vipio* breeding

2.2 迁徙停歇种群的生境利用

2017—2025 年的监测数据显示,向海保护区是白枕鹤迁徙路线上的重要停歇驿站,其生境利用表现出显著的广谱性。春季迁徙(3 月下旬—5 月中旬)多为小群(1~10 只)快速通过,秋季迁徙(9 月下旬—11 月中旬)则出现大规模集结。

后四家子东北和雷锋坝是白枕鹤觅食的重要基地,新发芦苇地、团结屯南甸子、付老文泡也常监测到以家庭为单位的白枕鹤种群,也是白枕鹤栖息觅食的重点区域。迁徙种群的生境利用为湿地—农田复合模式,多次记录到白枕鹤在超生屯西、粮丰桥附近以及福泰泡北玉米地中活动。2017—2025 年在向海保护区发现白枕鹤种群共 96 次,在农田觅食的次数为 34 次,占比为 35.42 %,以春季居多,为 22 次。从 2017—2025 年监测数据可以看出,白枕鹤常与白鹤 (*Grus leucogeranus*)、白头鹤 (*Grus monacha*)、灰鹤 (*Grus grus*)、丹顶鹤混群,共混群 72 次,占比 75 %。



图 2 白枕鹤栖息的沼泽湿地

Fig. 2 Marsh wetland of *Grus vipio* resting

3 讨论与结论

从繁殖生境选择来看,历史上白枕鹤在向海保护区主要依托水质优良、结构稳定的芦苇沼泽进行筑巢繁殖。但长期监测显示,核心区内同发滚水坝、付老文泡、长龙坨、碱地泡等传统繁殖湿地,因长期干旱或过度补水,已出现明显的植被演替或生境退化。其中,同发滚水坝东侧因上游补水偏离原有河道,无法补给该区域,长期干旱导致芦苇沼泽退化为草甸;付老文泡与长龙坨同样因干旱由芦苇沼泽逐渐退化为草甸,仅在 2020 年补水与降水量增加后,在明水边缘形成稀疏的香蒲、芦苇混生群落;碱地泡则因水位过高,不适宜芦苇、蘆草等低矮湿地植物生长,最终演替为以香蒲为优势种的湿地群落。向海湿地植被的演替与退化与湿地供水息息相关,王国平等^[8]研究指出,水利工程拦截导致向海保护区下游补水不足,向海湿地水位下降甚至持续干旱,湿生植物逐步演替为旱生植物,涉禽、游禽等繁殖成功率下降。张艳红

等^[9]认为,自然环境波动与人类活动共同造成的向海保护区丹顶鹤生境破碎化是适宜繁殖栖息地缩减、鹤类种群数量下降的重要原因。同发滚水坝东侧巢区有车辆干扰,但距离较远,其他核心区巢区无人干扰,可以推断出白枕鹤不在核心区繁殖主要是由于繁殖生境的演替或退化造成的。

根据 1993—2025 年繁殖监测数据,早期白枕鹤在核心区较大规模湿地内繁殖,包括同发滚水坝东侧、付老文泡北侧、长龙坨西侧及碱地泡(监测期间芦苇沼泽面积分别为 270.32 hm²、106.55 hm²、116.36 hm²、127.50 hm²)。2008 年以后,白枕鹤繁殖区逐步向实验区转移,大肚泡东闸门在 2008 年和 2010 年各有 1 巢繁殖巢且为同一对白枕鹤,监测期间大肚泡东闸门芦苇沼泽面积仅 3.23 hm²,远小于早期的大中型芦苇沼泽。白枕鹤在更小的芦苇斑块中成功繁殖,繁殖生境面积阈值降低,表明其对生境的变化具有较强的适应性。该巢区距离通榆至洮南公路仅有 66 m,车辆多、噪声大、与最近的易于觅食的大片沼泽湿地的距离大于 3.5 km,很可能是白枕鹤后期弃巢的原因。仙鹤岛湿地主要由芦苇沼泽、湖泊两类生境构成,总面积约 440 hm²。仙鹤岛观鹤台南侧芦苇沼泽为 52.18 hm²,开阔明水面与芦苇等湿地植被斑块交错相间,茂密苇丛形成天然屏障,大幅提升巢区隐蔽度,为白枕鹤筑巢、孵卵与育雏营造安全稳定的繁殖微生境,除白枕鹤繁殖外还有鸿雁(*Anser cygnoides*)、绿头鸭(*Anas platyrhynchos*)、苍鹭(*Ardea cinerea*)、草鹭(*Ardea purpurea*)等大量水鸟繁殖,食物也比较充沛,适于幼鹤采食的鱼类种类多、数量大。沼泽生态环境完好,无香蒲种群入侵演替问题。其水源引自上游水库,常年补水,水量充足,调度调控灵活。2023—2025 年,白枕鹤连续三年在仙鹤岛湿地稳定繁殖,该地为吉林省现存唯一的白枕鹤繁殖巢址。繁殖巢与最近的旅游人为活动区距离约 610 m,旅游项目为每天两次丹顶鹤放飞观赏,噪音较小,对繁殖水鸟影响很小。沼泽西部和南部通过布设高密网并依托堤坝道路设置物理隔离,显著降低人为干扰强度。巢址距最近的鹤类核心区沼泽约 1.7 km,可为白枕鹤提供充足食源与多样化栖息生境。该湿地是向海保护区实验区内生境质量最优、最适宜鹤类繁殖

的区域。白枕鹤对繁殖地的选择受水源、食物和人类干扰程度的影响,在生境退化、人为干扰加剧的情况下,白枕鹤可通过转换栖息地、调整活动范围、改变繁殖位点、增加警戒频次等行为进行代偿,展现出较强的环境适应能力。尽管实验区繁殖巢址临近旅游活动区域(610 m),参观旅游等人为活动频繁,但人为干扰因素对白枕鹤繁殖产生的实质性的干扰才是关键,设置的高密度隔离网、堤坝的隔离以及严格的旅游活动管理大大降低了这些干扰的强度,加之相对稳定的湿地水域环境和充足的食物保障,才是白枕鹤选择繁殖地的主要因素。

研究表明,春季丹顶鹤对农田觅食地的选择受食物因素和水源因素的影响,农田生境是鹤类的次要觅食生境^[10, 11]。白枕鹤迁徙种群的生境利用为湿地—农田复合模式,利用秋收后残留的玉米等农作物补充能量,特别是春季向海沼泽湿地融化之前其以农田采食为主。4 月沼泽湿地融化后,在后四家子湿地及团结屯东南甸子、小塔甸子等区域可见白枕鹤在沼泽湿地觅食,这些湿地可采食的明水沼泽面积超过 1 100 hm²,具有丰富的湿地食物。

白枕鹤生性机警、胆小,其在向海保护区种群数量少,常与其他鹤类混群停歇。与其他鹤类混群可显著减少警戒时间、增加觅食时间。白枕鹤在混群队伍中数量最少,多见于 10 只以内,并未见到有因食物争夺而出现打斗行为,种间竞争微弱。

4 保护建议

对仙鹤岛南部芦苇沼泽湿地斑块实行严格管护,维持稳定水位与适宜芦苇结构,保障吉林省唯一白枕鹤繁殖巢持续安全。针对同发滚水坝、付老文泡、长龙坨等退化湿地开展水位调控,避免长期干旱或过度淹水,促进芦苇群落恢复,扩大白枕鹤潜在繁殖生境。减少繁殖区与停歇地人为干扰,提升白枕鹤栖息地安全性,严控旅游活动、车辆通行对白枕鹤的惊扰,尤其在繁殖期与春秋迁徙期设立临时保护带,降低白枕鹤警戒压力。维持湿地—农田复合觅食格局,保留秋收后玉米留茬地,为迁徙期白枕鹤提供充足食物,重点保护后四家子、雷锋坝、团结屯南甸子等关键停歇湿地,维持鹤类栖息环境。

- [1] 赵国辉. 黑龙江七星河自然保护区白枕鹤孵化期行为及巢址生境选择研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013: 2-7.
- [2] 杨骏, 李汶泽, 孙治宇. 四川省鸟类新记录——白枕鹤[J]. 四川动物, 2023, 42(4): 399.
- [3] 温立嘉, 郭玉民, 李玉良. 内蒙古锡林郭勒盟白枕鹤的繁殖记录[J]. 动物学杂志, 2015, 50(6): 986.
- [4] 李波, 李连山, 刘蕾. 灰鹤在向海自然保护区觅食生境的选择研究[J]. 吉林林业科技, 2019, 48(4): 31-34, 36.
- [5] 刘蕾. 向海湿地鹤类栖息地环境质量与生境选择特性研究[J]. 黑龙江环境通报, 2020, 33(4): 2-3, 7.
- [6] 林宝庆, 韩晓东, 杨军, 等. 向海湿地迁徙鸟类的调查分析与保护对策[J]. 吉林林业科技, 2010, 39(2): 29-32.
- [7] 谷彦昌, 李雪竹. 黑龙江小兴安岭白枕鹤繁殖栖息地监测研究[J]. 湿地科学与管理, 2020, 16(2): 64-67.
- [8] 王国平, 张玉霞. 水利工程对向海湿地水文与生态的影响[J]. 资源科学, 2002, 24(3): 26-30.
- [9] 张艳红, 邓伟, 张树文. 向海自然保护区丹顶鹤生境结构空间特征[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3725-3731.
- [10] 李全亮. 松嫩平原丹顶鹤与白枕鹤生境利用对比研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017: 30-36.
- [11] 杨宇博. 扎龙自然保护区丹顶鹤对农田生境利用研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016: 29-34. (本篇专家编审: 韩晓东)
- (上接第 32 页)
- [8] 曲浩, 赵学勇, 赵哈林, 等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [9] 韩学勇, 赵凤霞, 李文友. 森林凋落物研究综述[J]. 林业科技情报, 2007, 39(3): 12-13, 16.
- [10] 李翔, 王海燕, 秦倩倩, 等. 采伐对天然云冷杉针阔混交林半分解层凋落物现存量、含水率及林分郁闭度空间异质性的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(6): 114-120.
- [11] 王晓荣, 雷蕾, 付甜, 等. 抚育择伐对马尾松林凋落叶分解速率和养分释放的短期影响[J]. 林业科学, 2020, 56(4): 12-21.
- [12] 周运红, 李建亮, 王利东, 等. 间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29-37.
- [13] 张嶂, 满秀玲, 刘思琪, 等. 寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65-74.
- [14] 张妍妍, 王群星, 骆雨生, 等. 抚育间伐对栓皮栎人工林及其目标树光环境的影响[J]. 林业资源管理, 2021(4): 79-85.
- [15] Wang D, Olatunji O A, Xiao J L. Thinning increased fine root production, biomass, turnover rate and understory vegetation yield in a Chinese fir plantation[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 440: 92-100.
- [16] Segura C, Fernández-Ondoño E, Jiménez M N, et al. Thinning affects the needlefall nutrient return to soil in a semiarid Aleppo pine afforestation while the nutrient dynamics remain unchanged[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 405: 257-270.
- [17] 张会儒, 唐守正. 森林生态采伐理论[J]. 林业科学, 2008, 44(10): 127-131.
- [18] 红玉, 王耀, 金鑫, 等. 抚育经营对杨桦次生林林分结构及土壤性质的影响[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(3): 61-66.
- [19] Huang Xiangfeng, Li Shuangqiang, Li Shiyang, et al. The effects of biochar and dredged sediments on soil structure and fertility promote the growth, photosynthetic and rhizosphere microbial diversity of *Phragmites communis* (Cav.) Trin. ex Steud[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 134073.
- [20] 王琦, 姜润华, 杨凯麟, 等. 不同经营措施对云冷杉林秋季凋落物量及其月变化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(5): 1160-1166.
- [21] 陈家琛, 左晓东, 陈立, 等. 间伐对杉木人工林凋落物分解和养分释放速率的影响[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(2): 119-125.
- [22] 简永旗, 吴家森, 盛卫星, 等. 间伐和林分类型对森林凋落物储量和土壤持水性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(2): 320-328.
- [23] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带 4 种森林凋落物量、组成、动态及其周转期[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4668-4677.
- [24] 刘明国, 苏芳莉, 谭学仁, 等. 不同间伐强度下天然次生林凋落物分解进程研究[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 877-881.
- [25] 高晶. 辽河源森林凋落叶分解特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016: 25-48. (本篇专家编审: 杨雨春)

DOI:10.16115/j.cnki.issn.1005-7129.2026.05.009

文章编号:1005-7129(2026)05-0044-05

中图分类号:S762.3

文献标识码:A

淄博市森林草原防灭火一体化建设策略探讨

宋媛媛, 魏文鹏, 王 兰, 孟庆军, 李 琦

(淄博市鲁山林场, 山东 淄博 255205)

摘 要: 森林草原火灾是威胁陆地生态系统安全的首要自然灾害, 本文梳理了淄博市防灭火一体化建设现状与存在的问题, 提出针对性建设策略。本文可为破解淄博市防灭火工作瓶颈、提升灾害综合防控能力提供支撑, 为国内同类丘陵山区城市森林草原防灭火一体化建设提供参考。

关键词: 淄博市; 森林草原; 防灭火一体化; 建设策略; 生态安全

Discussion on the Integrated Construction Strategy of Forest and Grassland Fire Prevention and Suppression in Zibo City

SONG Yuanyuan, WEI Wenpeng, WANG Lan, MENG Qingjun, LI Qi

(Lushan Forest Farm of Zibo City, Zibo 255205, China)

Abstract: Forest and grassland fires were the primary natural disasters threatening the security of terrestrial ecosystems. The status and existing problems of the integrated construction of fire prevention and suppression in Zibo City were sorted out in this paper. The targeted construction strategies were put forward. That could provide support for breaking the bottleneck of fire prevention and suppression in Zibo City and improving the comprehensive disaster prevention and control capacity, and provide the reference for the integrated construction of forest and grassland fire prevention and suppression in similar hilly and mountainous cities in China.

Keywords: Zibo City; forest and grassland; integration of fire prevention and suppression; construction strategy; ecological security

森林草原作为陆地生态系统的核心组成部分, 具有重要的生态、经济与社会价值, 而森林草原火灾是威胁其安全稳定的首要自然灾害^[1-3]。我国高度重视森林草原防灭火工作, 先后出台了一系列政策文件, 明确提出“全面

推进防灭火一体化”的核心要求。2026 年 1 月起施行的《森林草原防灭火条例》进一步以法规形式明确了森林草原火灾的预防、扑救、灾后处置和法律责任, 为新形势下我国森林草原防灭火实践提供了根本遵循和制度支撑。

收稿日期: 2026-03-12

基金项目: 山东省森林火灾高风险区综合治理工程项目 (SDGP370300202002000343)

第一作者: 宋媛媛 (1980—), 女, 工程师, 研究方向为森林培育、森林防火, E-mail: 1004123846@qq.com。

通信作者: 李琦 (1988—), 男, 工程师, 研究方向为森林培育、森林防火, E-mail: Liqi100122@126.com。

淄博市地处山东省中部,山区、丘陵面积占市域总面积的 71.9 %,森林覆盖率达 32.46 %,其中南部山区森林覆盖率高达 62.1 %,是山东省重要的生态屏障区。该市森林以人工林为主,松类(*Pinus spp.*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等易燃纯林占比偏高。同时,林区与群众生产生活区交错分布,农事用火、旅游用火、祭祀用火等各类火源叠加,进一步加大了火源管控难度。

近年来,淄博市逐步推进森林草原防灭火一体化建设,2024—2025 年度防火期取得“零火灾”的良好成效,但对照新形势下防灭火工作的高标准、严要求,仍存在诸多突出短板。基于此,本文结合 2021 年以来的相关研究成果与淄博市实际情况,深入探讨其防灭火一体化建设路径,对破解区域防灭火工作瓶颈、提升灾害

综合防控能力具有重要的现实意义。

1 淄博市森林草原防灭火一体化建设现状

1.1 资源底数清晰,防控重点明确

淄博市辖 5 区 3 县及 3 个功能区,总面积 5 965 km²。其中,森林面积 187 878.46 hm²,森林资源主要分布于南部山区,以鲁山林场、原山林场为核心,形成了以水土保持林和经济林为主的森林生态系统;草地面积约 1 066.7 hm²,集中分布于桓台县起凤镇、荆家镇的马踏湖区域,其余地区少量零星分布。6 个区县的 32 个乡镇(街道)为森林火险一级火险区,8 个区县的 34 个乡镇(街道)为森林火险二级火险区,5 个区县的 22 个乡镇(街道)为森林火险三级火险区;仅桓台县 2 个乡镇(街道)为草原火险极高火险区(见表 1)。

表 1 淄博市森林草原火险区划等级

Tab. 1 Forest and grassland fire risk zoning rating of Zibo City

火险等级	区县名称	乡镇(街道)数量/个	火险等级	区县名称	乡镇(街道)数量/个
森林火险一级火险区	张店区	1	森林火险二级火险区	临淄区	8
	淄川区	7		高新技术产业开发区	2
	博山区	8		经济开发区	2
	临淄区	3		文昌湖省级旅游度假区	1
	沂源县	12	森林火险三级火险区	淄川区	2
	文昌湖省级旅游度假区	1		临淄区	1
森林火险二级火险区	张店区	7		桓台县	9
	淄川区	4		高青县	9
	博山区	2		经济开发区	1
	周村区	8	草原火险极高火险区	桓台县	2

1.2 指挥体系初步建立,责任逐步压实

成立了森林草原防灭火指挥部,由市委常委、副市长担任双指挥长,明确 14 个成员单位的具体职责,逐步完善“党委领导、政府负责、部门协同、社会参与”的工作格局。严格落实市、县、镇、村“四级包保”责任制,实现林区“山有人管、火有人防、责有人担”。

1.3 监测预警体系逐步完善,防控能力稳步提升

防火期内,全市 153 路视频监控、764 处智能语音卡口、185 处检查站点、78 座瞭望台、1 500 余名巡查员和慧眼卫星遥感系统实施不间断火情监测,“空—天—地”一体化监测预警体系基本成型(见表 2)。

表 2 淄博市森林草原防火监测预警体系建设情况统计

Tab. 2 Construction of forest and grassland fire prevention monitoring and early warning system in Zibo City

区县单元	视频监控/套	语音卡口/处	防火检查站/处	瞭望台/座	区县单元	视频监控/套	语音卡口/处	防火检查站/处	瞭望台/座
张店区	3	12	6	0	沂源县	8	82	29	10
淄川区	24	105	23	40	高新技术产业开发区	8	65	21	0
博山区	6	55	22	5	经济开发区	2	9	5	0
周村区	14	26	4	1	文昌湖省级旅游度假区	1	21	4	1
临淄区	17	46	10	3	市鲁山林场	18	186	38	10
桓台县	30	4	12	1	市原山林场	22	150	10	7
高青县	0	3	1	0					

1.4 宣传引导持续深化,全民意识逐步增强

通过多媒体宣传、防灭火知识“六进”、设立“电子围栏”等多种形式,广泛普及防灭火法律法规与安全知识。积极倡导移风易俗,引导群众摒弃祭祀用火陋习,全民防火安全意识逐步提升。

2 淄博市森林草原防灭火一体化建设现存问题

2.1 体制机制协同不足,“防灭脱节”问题突出

各成员单位职责存在交叉重叠,协同配合不够顺畅,应急管理部门与自然资源部门的工作衔接不够紧密,部分区域仍存在“重扑救、轻预防”的倾向。跨区域、跨部门联防联控机制不够健全,市属林场与地方政府之间的联动协作不畅,尚未形成“防、管、灭”全链条闭环管理体系。

2.2 监测预警精准度不高,源头管控存在盲区

现有监测设备智能化水平偏低,部分视频监控存在视野局限,偏远山区、隐蔽区域仍存在监测盲区。火险预警模型多依赖气象数据,未能充分结合本地可燃物载量、植被类型等实际情况,预警信息的针对性、精准度不足。春季农事用火、节假日旅游及祭祀用火管控难度较大,源头火灾隐患未能得到有效遏制。

2.3 防控扑救能力不均衡,应急处置效能有待提升

区县、乡镇(街道)级防灭火队伍多为兼职人员组成,缺乏系统的专业培训与实战演练,应急处置能力有限。南部重点火险区的防火阻隔带、灭火蓄水池等基础设施建设滞后。“一山一案”应急处置预案不够细化,与实战需求存

在差距,难以满足复杂情况下的火灾扑救需求。

2.4 保障体系不够健全,支撑能力有待加强

防灭火资金投入仍存在缺口,在监测预警、生态防火、科技研发等领域的投入不足。科技支撑力度薄弱,现代科技手段与防灭火工作的融合不够紧密。防灭火专业人才短缺,难以满足防灭火工作高质量发展的需求。

2.5 生态防火水平偏低,可燃物管控不够科学

由于多年封育管理,林内可燃物载量大,且易燃树种占比高、针阔混交林占比低,林分结构不合理,火灾发生风险较高。可燃物清理仍以传统人工方式为主,清理效率低、成本高,先进的生态防火措施未能有效推广应用。

3 淄博市森林草原防灭火一体化建设策略

3.1 健全协同联动体制机制,构建全链条闭环管理体系

3.1.1 完善指挥协同机制

优化市森林草原防灭火指挥部架构,进一步明确应急、自然资源、公安、消防等 14 个成员单位的职责分工,建立定期会商、信息共享、联合执法、协同处置的工作机制,推动“防、管、灭”各环节无缝衔接。

3.1.2 建立跨区域联防联控机制

加强与毗邻地市的协作配合,签订跨区域联防联控协议,常态化开展联合巡护、应急演练与联合执法工作。打破市属林场与地方政府的管理壁垒,推动资源共享、力量互通、责任共担,提升重点林区火灾协同处置能力。

3.1.3 完善考核评价与责任追究机制

建立“预防为主、防灭结合”的考核评价体

系,全面落实林长制和行政首长负责制,健全权责清晰的森林防灭火“四级包保”责任体系,将火险预警精准度、隐患整改率、火灾发生率等指标纳入考核范围,实行“一票否决”制。

3.2 构建精准智能监测预警体系,强化源头防控效能

3.2.1 提升监测网络智能化水平

对现有 153 处视频监控设备进行升级改造,减少偏远山区及隐蔽区域的监测盲区,构建全域覆盖的监测体系。组建专业化无人机巡护队伍,运用“无人机+热成像”融合技术,强化复杂天气与复杂地形条件下的火情早期识别与预警能力,全面提升火情早期发现水平。

3.2.2 优化火险预警模型

强化与科研院校的产学研协同,立足淄博市气候特征、植被类型、可燃物载量等区域本底条件,构建精细化森林草原火险预警模型。通过融合气象、地形、植被等多源监测数据,实现火险等级的科学精准划分与预警信息的靶向推送。

3.2.3 强化源头火源管控

严格落实野外火源管控各项规章制度,强化对违规用火行为的排查整治与查处力度,形成常态化监管震慑效应。聚焦重点时段、重点区域、重点人群三大管控维度,在林区主要出入口合理增设防火检查站,全面推广防火码 2.0 版本的落地应用,实现野外火源全流程可追溯、全链条可管控。同时创新防灭火宣传教育模式与载体,开展针对性强的常态化防灭火宣传引导工作,强化群众防火安全意识,引导群众自觉遵守森林防火相关规定,从源头上遏制违规用火行为发生。

3.3 提升防控扑救协同能力,构建专业化应急处置体系

3.3.1 加强防灭火队伍建设

构建“市级专业、区县骨干、乡镇兼职、群众参与”的立体化防灭火队伍体系,定期组织开展专业化培训与实战化演练,提升队伍应急响应与处置能力。进一步规范生态护林员管理考核机制,着力提升巡护频次与质量,充分发挥其在森林草原防灭火工作中的“前哨”预警与初期处置作用。

3.3.2 优化基础设施布局

针对森林火险一级火险区 32 个乡镇(街道)和草原火险极高火险区 2 个乡镇(街道)的

火灾防控实际需求,重点加大防火基础设施建设的资金投入与技术支撑力度,系统优化防火阻隔带布局、蓄水池布点规划及防火通道网络化建设,进一步提升林区火灾阻隔效能与应急通行保障能力。同时引进并推广适配该区域林区地形、植被特征的先进火灾扑救装备,全面强化林区火灾应急处置的硬件支撑水平。

3.3.3 完善应急处置体系

修订并细化“一山一案”森林草原火灾应急处置预案,使其与不同林区的地形地貌、植被类型、火源分布及火险等级等实际特征紧密结合,进一步增强预案的针对性、科学性与实操性。优化火情处置全流程响应机制,精简火情发现、信息上报、应急处置各环节的冗余流程,实现快速响应,确保实现森林草原火灾“早发现、早处置、早扑灭”的防控目标,最大限度降低火灾造成的生态与经济损失。

3.4 健全多元保障体系,强化一体化建设支撑

3.4.1 加大资金投入力度

建立健全稳定的防灭火资金投入长效机制,将防灭火相关资金正式纳入市级财政年度预算管理体系,所投资金重点聚焦监测预警系统完善、防灭火基础设施升级、核心技术研发攻关、生态防火体系构建等关键领域。主动对接国家、省级防灭火资金支持方向,积极争取上级财政资金扶持,为防灭火工作高质量开展提供坚实的资金支撑与保障。

3.4.2 强化科技与人才支撑

深化与科研机构、相关企业的产学研用协同合作,推动大数据、物联网、人工智能等现代信息技术与森林草原防灭火工作深度融合,提升防灭火工作的智能化监测、精准化管控水平。加大专业人才培养,为区域防灭火工作的科学开展提供全方位专业技术支撑,助力防控能力提质增效。

3.4.3 完善多元保障模式

借鉴国内先进地区的成熟实践经验,积极探索并推行“政府+科技+保险”三位一体的灾害保障模式,有效分散火灾灾害风险,进一步提升灾害损失的精准补偿能力。系统整合监测预警、应急处置、风险保障等各类相关数据资源,打通数据共享壁垒,实现“监测—处置—保障”全流程、全链条闭环管理。不断完善防灭火物资储备体系,科学规划物资储备点布局,明确储

备标准与调配流程,确保应急物资足额储备、高效调配、及时供应。

3.5 推进生态防火建设,构建可持续防控格局

3.5.1 优化林分结构

有序推进树种更新工作,逐步降低松类、侧柏等易燃树种的种植占比,合理增加栎树(*Koelreuteria paniculata*)、核桃楸(*Juglans mandshurica*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等难燃防火树种的配置比例,提升针阔混交林覆盖度,进而增强林分整体抗火性能。强化森林抚育精细化管理,科学调整林区植被密度,有效降低可燃物载量,从源头上防控森林火灾。

3.5.2 推广科学可燃物调控模式

结合区域生态保护核心要求,坚持因地制宜原则,推行灭草除灌、计划烧除、机械清理等多元化可燃物清理技术与措施,实现可燃物精细化、科学化管控,有效降低森林草原火灾发生风险及危害程度。可应用森林防火开沟除障一体机等新型装备,提升可燃物调控的机械化水平。

3.5.3 推动生态保护与防灭火融合发展

将森林草原防灭火一体化建设与生态文明建设、乡村振兴等重大战略部署有机融合,在生态保护相关规划中统筹布局防灭火基础设施建设,推动生态保护与火灾防控工作协同发展、一体推进。坚持“专群结合”的工作思路和“依法治火”的基本原则,“一体化”协同推进护林防火工作。

4 讨论

淄博市森林草原资源丰富、火险等级偏高,近年来在防灭火一体化建设方面取得一定成效,但仍存在体制机制协同不足、监测预警精准度不高、防控扑救能力不均衡、保障体系不够健全、生态防火水平偏低等突出短板,制约了防灭火工作高质量发展。

2021年以来,国内一些地方探索形成了森林草原防灭火一体化建设的先进经验^[4-8],为淄博市提供了有益参考。综合梳理先进地区实践经验,核心可概括为四个方面。一是健全协同高效的体制机制,强化各部门、各区域协同配合,实现“防、管、灭”全链条无缝衔接;二是强

化科技赋能,推动“空天地人”一体化监测技术与防灭火工作深度融合,提升监测预警与应急处置的智能化水平;三是加强防灭火队伍与基础设施建设,夯实防控基础,提升灾害综合防控能力;四是完善多元保障体系,强化人才、资金、技术支撑,为防灭火一体化建设提供有力保障。这些经验为淄博市破解防灭火工作短板、推进一体化建设提供了重要启示。

借鉴国内先进地区防灭火一体化建设经验,结合淄博市鲁中山区地域特质,本文提出的一体化建设策略,突出“协同化、智能化、专业化、多元化、生态化”导向。一是构建“林长制+防灭火”深度融合的闭环管理机制,有效破解本土跨区域、跨部门协同不畅的难题;二是创新源头防控模式,优化适配鲁中山区的火险预警模型,结合空天地一体化监测技术,提升源头防控精准度;三是推行多元化可燃物管控模式,优化林分结构,实现生态保护与火灾防控双赢。一体化建设策略贴合淄博市实际,针对性与可操作性较强,可为国内同类丘陵山区城市森林草原防灭火一体化建设提供参考。

参考文献

- [1] 卢仁军, 黄太文. 科技现代化在森林防火中的应用研究[J]. 森林防火, 2025, 43(6): 43-45.
- [2] 张博, 郭石晴, 翟杰休, 等. 基于 CiteSpace 的森林防火热点研究[J]. 西南林业大学学报(社会科学), 2025, 9(5): 119-126.
- [3] 赵国顺, 邓勇, 张运才. 我国森林防火预警监测平台建设探析[J]. 森林防火, 2025, 43(4): 56-59.
- [4] 石岩, 章森, 叶新华, 等. 辉南县国有林区森林火灾隐患源头治理措施[J]. 吉林林业科技, 2024, 53(1): 42-45.
- [5] 姚芃甫, 金日. GIS 在森林防火中的应用现状[J]. 吉林林业科技, 2023, 52(5): 45-48.
- [6] 张晓燕. 汉源县“三网融合”森林防火智能治理案例研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2025: 79-80.
- [7] 鲜明睿, 王洪波, 杨秀时, 等. 重庆市北碚区森林防火体系建设现状及规划[J]. 林业建设, 2025, 43(5): 39-43.
- [8] 林冉, 冯艺, 朱琼宇. 新时期广东省森林火灾预防体系构建策略分析[J]. 森林防火, 2025, 43(4): 45-50.

(本篇专家编审:章林)

《吉林林业科技》编辑委员会

委 员

(按姓氏笔画为序)

山昌林	王志明	王福维	邓 祥	尹子康
尹春梅	叶雅玲	史建伟	刘玉波	刘学芝
刘彦龙	刘晓龙	安丰云	孙广仁	孙长彬
孙文生	杜凤国	杨义波	杨世海	吴景才
宋丽文	张启昌	张忠辉	陆志民	陈万毅
陈建光	陈建军	单延龙	孟庆繁	赵 云
赵珊珊	姜贵全	郭忠玲	高金贵	高峻崇
陶 晶	黄祥童	曹长清	梁万君	董 然
程广有	焦为屹	温宇光	鞠志新	

《吉林林业科技》编辑部

主 编 张建秋

责任编辑 魏松艳

英文编译 陈 玲

吉林林业科技
双月刊, 1972年创刊
第55卷 第5期 (总第303期)

Journal of Jilin Forestry Science and Technology
Bimonthly, Started in 1972
Volume 55 Number 5 (No.303)

主管单位: 吉林省林业和草原局
主办单位: 吉林省林业科学研究院
(吉林省林业生物防治中心站)
编辑出版: 《吉林林业科技》编辑部
地 址: 吉林省长春市经开区临河街3528号
邮政编码: 130033
电 话: 0431-85850400
传 真: 0431-85850400
电子信箱: jllykj2004@sina.com
出版日期: 2026年9月15日
印 刷: 吉林省信诚印刷有限公司
发 行: 《吉林林业科技》编辑部

Administered by Forestry and Grassland Bureau of Jilin Province

Sponsored by Jilin Provincial Academy of Forestry Science (Forestry Biological Control Central Station of Jilin Province)

Published by Editorial Department of Journal of Jilin Forestry Science and Technology

Address No. 3528, Linhe Street, Jingkai District, Changchun 130033, Jilin, P. R. China

Telephone 0431-85850400 **Fax** 0431-85850400

E-mail jllykj2004@sina.com

Publication date Sep. 15th, 2026

Printed by Xincheng Printing Co., Ltd. of Jilin Province

Issued by Editorial Department of Journal of Jilin Forestry Science and Technology

公开发行

定价: 10.00元

ISSN 1005-7129



9 771005 712267