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304期
2026 6
JILIN LINYE KEJI

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 001
文章编号:1005-7129(2026)06-0001-05　　中图分类号:S718. 43　　文献标识码:A

模拟干旱胁迫对龙桑一号幼苗生长及光合特性的影响

舒荟宇[1], 葛 杨[2], 徐 清[3], 刘学芝[1], 朱文旭[4]
(1. 白山市林业科学研究院, 吉林 白山 134300; 2. 汪清县国有林总场, 吉林 延边 133200; 3. 白山市浑江区河口街道综合服务中心, 吉林 白山 134300; 4. 沈阳农业大学林学院, 辽宁 沈阳 110866)

摘 要: 本文以东北地区主要栽培桑树品种龙桑一号(*Morus alba* cv. Longsang No. 1)为研究对象,进行水培试验,以 PEG 6000 模拟干旱胁迫,营养液中 PEG 6000 的浓度分别为 0(CK)、5 g·L^{-1}(轻度胁迫)、10 g·L^{-1}(中度胁迫)、20 g·L^{-1}(重度胁迫)。处理 30 d 后测定其生长指标和光合参数,探讨龙桑一号幼苗对干旱胁迫的响应及适应机制。轻度干旱胁迫下,龙桑一号幼苗的茎鲜重与 CK 相比无变化,株高、叶鲜重、叶干重和茎干重较 CK 有所升高但差异不显著;中度和重度干旱胁迫下,各生长指标均显著下降;叶片对干旱胁迫更为敏感;整体表现出轻度胁迫促进干物质积累、重度胁迫显著抑制生长的特征。轻度干旱胁迫下各光合参数变化不显著,中度干旱胁迫下净光合速率、水分利用效率显著下降,重度干旱胁迫下净光合速率、蒸腾速率、气孔导度显著下降,胞间 CO_2 浓度显著上升,表明光合速率下降的主要限制因素为非气孔因素,即叶肉细胞光合活性受损所致。综上所述,龙桑一号幼苗在轻度和中度干旱条件下能够通过维持气孔开度、保持相对稳定的光合能力和水分利用效率来适应水分亏缺,表现出一定的抗旱能力;但在重度干旱胁迫下,其光合系统受到明显损伤,生长受到严重抑制。本研究结果为龙桑一号幼苗在干旱、半干旱地区的推广种植提供了理论依据。

关键词: 龙桑一号;干旱胁迫;生长性状;光合特性;抗旱性

Effects of Simulated Drought Stress on Growth and Photosynthetic Characteristics of *Morus alba* cv. Longsang No. 1 Seedlings

SHU Huiyu[1], GE Yang[2], XU Qing[3], LIU Xuezhi[1], ZHU Wenxu[4]
(1. Forestry Science Academy of Baishan City, Baishan 134300, China; 2. State-owned Forest Farm of Wangqing County, Yanbian 133200, China; 3. Comprehensive Service Center of Hekou Subdistrict in Hunjiang District of Baishan City, Baishan 134300, China; 4. College of Forestry of Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: *Morus alba* cv. Longsang No. 1, the main cultivar in Northeast China, was taken as the research object in this paper. The hydroponic experiment was conducted to simulate drought stress with PEG 6000. The concentrations of PEG 6000 in the nutrient solution were 0 (CK), 5 g·L^{-1}(mild stress), 10 g·L^{-1}(moderate stress), 20 g·L^{-1}(severe stress). After 30 days of treatment, growth indexes and photosynthetic parameters were measured to investigate the response and adaptive mechanism of the seedlings to drought stress. Under mild drought stress, the stem fresh weight was the same as that of CK, the plant height, leaf fresh weight, leaf dry weight and stem dry weight were higher than those of CK with not significant difference. Under moderate and severe drought stress, the growth indexes decreased significantly. The leaf was

收稿日期:2026-07-29
第一作者:舒荟宇(1998—),男,助理工程师,主要从事林木遗传育种研究工作,E-mail:215774308@qq. com。
通信作者:刘学芝(1972—),男,正高级工程师,从事林木遗传育种和林下经济植物开发与利用,E-mail:1647383116@qq. com

more sensitive to drought stress. The mild stress promoted dry matter accumulation, and the severe stress significantly inhibited the growth. Under mild drought stress, the photosynthetic parameters did not change significantly. Under moderate drought stress, the net photosynthetic rate and water use efficiency decreased significantly. Under severe drought stress, the net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance decreased significantly, and the intercellular CO_2 concentration increased significantly. The main limiting factor for the decrease of photosynthetic rate was non-stomatal factor, and that was the damage of the photosynthetic activity of mesophyll cells. In summary, the seedlings could adapt to water deficit by maintaining stomatal opening, preserving relatively stable photosynthetic capacity and water use efficiency under mild and moderate drought conditions. That showed the certain drought resistance. Under severe drought stress, the photosynthetic system suffered significant damage and the growth was severely inhibited. The results of this study could provide the theoretical basis for the promotion and cultivation of *Morus alba* cv. Longsang No. 1 seedlings in arid and semi-arid areas.

Keywords: *Morus alba* cv. Longsang No. 1; drought stress; growth traits; photosynthetic characteristics; drought resistance

干旱胁迫是限制植物生存和生长的关键因素,为适应干旱胁迫,植物在长期进化中形成了一系列形态结构、生理生化和分子水平的适应机制[1, 2]。植物的生长发育和形态特征可作为鉴定其抗旱性的重要指标[3]。干旱胁迫下植物生长对水分亏缺的响应与干旱程度密切相关,轻度干旱在一定程度上促进生长,而重度干旱则显著抑制植株生长发育,导致苗高降低、叶面积减小[4, 5]。不同器官对干旱胁迫的敏感程度存在差异,叶片比茎更敏感,随着胁迫程度加剧,植株出现叶片卷曲、失绿枯黄甚至死亡等旱害症状[6-8]。干旱胁迫还会显著影响植物的光合生理特性,表现为叶绿素含量降低,净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等光合参数发生明显变化[9, 10]。植物抗旱性涉及形态结构适应、光合生理调节和抗氧化防御等多层面协同作用。桑树(*Morus alba*)是一种分布广泛、抗逆性强、具有重要经济价值的树种,其抗逆性及生态适应机理受到广泛关注[11]。本文以东北地区主要栽培的桑树品种龙桑一号(*Morus alba* cv. Longsang No. 1)幼苗为研究对象,从生长性状、光合生理特性等方面探讨其对干旱胁迫的响应机理,以期为龙桑一号在东北地区的推广种植提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料和处理方法

1.1.1 试验材料

试验材料为 1 年生龙桑一号幼苗,由黑龙江省蚕业研究所提供。去掉幼苗分枝以及须根,主茎和主根各保留 3 cm,主茎上保留 2 个饱满芽点。将处理后的幼苗移至直径 20 cm、高 18 cm 的水培箱内培养,每个水培箱内 3 株幼苗,水培箱外侧包裹黑色避光纸,采用电动气泵持续通气。

1.1.2 试验方法

培养初期幼苗在加注蒸馏水的水培箱中适应生长 48 h,之后更换为 1/2 Hoagland 完全营养液继续培养。7 d 后以 PEG 6000 模拟干旱胁迫,营养液中 PEG 6000 的浓度分别为 0(CK)、5 g·L^{-1}(轻度胁迫)、10 g·L^{-1}(中度胁迫)、20 g·L^{-1}(重度胁迫),每个处理设置 3 次重复。培养室光照强度为 220~250 μmol·m^{-2}·s^{-1},昼夜温度 25 ℃/20 ℃,试验期间每间隔 5 d 更换一次营养液,胁迫处理 30 d 后,测定样本的生长指标与光合参数。

1.2 测定项目和方法

1.2.1 生长指标的测定

用刻度尺准确测量植株的高度;将不同处理组的龙桑一号植株清洗干净,吸干植株表面附着的水分,测定叶片和茎秆的鲜重;之后将茎秆、叶片分别放入铝盒,经 105 ℃、30 min 杀青,60 ℃、30 h 烘干处理至恒重后称量干重。

1.2.2 光合参数的测定

每个处理选取 3 株幼苗,采用 LI-6400R 便携式光合系统分析仪,上午 9:00—11:00 对植株第 3 片完全展开的功能叶进行相关指标测定。在测定过程中,叶室温度(25±1)℃,光照强度为 800 μmol·m^{-2}·s^{-1}(仪器自带光源)。测定的光合参数包括净光合速率、蒸腾速率、气

孔导度和胞间 CO_2 浓度,净光合速率与蒸腾速率的比值即为水分利用率。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 与 SPSS 26.0 软件进行数据统计分析,通过单因素方差分析(One-way ANOVA)结合最小显著差异法(LSD)对不同处理组的数据进行比较检验。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对龙桑一号幼苗生长的影响

各处理下龙桑一号幼苗生长指标如表 1 所示。

轻度胁迫下,株高较 CK 高 2.82 %,差异不显著($P > 0.05$)。随着干旱胁迫程度增强,株高呈下降趋势。中度和重度胁迫下株高分别比 CK 低 17.62 %和 38.05 %,重度胁迫下株高显著低于其他处理,中度胁迫下株高显著低于轻度胁迫与 CK。结果表明,中度和重度干旱胁迫会显著抑制龙桑一号幼苗株高生长。

轻度胁迫下,茎鲜重与 CK 相比无变化,叶鲜重、叶干重、茎干重与 CK 差异不显著($P > 0.05$),较 CK 分别高 2.56 %、46.43 %、31.67 %。随着干旱胁迫程度增强,叶鲜重、叶干重、茎鲜重、茎干重均呈下降趋势。中度胁迫下各指标分别比 CK 低 29.49 %、32.14 %、21.95 %、20.00 %,与 CK 均差异显著。重度胁迫下各指标分别比 CK 低 69.23 %、69.64 %、65.85 %、68.33 %,各指标与 CK 均差异显著。轻度、中度、重度胁迫之间各指标均差异显著。结果表明,叶比茎更易受干旱胁迫影响,一定干旱程度下龙桑一号幼苗可通过减少地上部分水分散失适应干旱。

表 1 干旱胁迫对龙桑一号幼苗生长的影响

Fig. 1 Effect of drought stress on the growth of *Morus alba* cv. Longsang No. 1 seedlings

处理	株高/cm	叶鲜重/g	叶干重/g	茎鲜重/g	茎干重/g
CK	18.45±1.05a	1.56±0.03a	0.56±0.12a	0.41±0.04a	0.120±0.012a
轻度胁迫	18.97±1.38a	1.60±0.07a	0.82±0.17a	0.41±0.04a	0.158±0.016a
中度胁迫	15.20±1.30b	1.10±0.23b	0.38±0.04b	0.32±0.07b	0.096±0.012b
重度胁迫	11.43±1.81c	0.48±0.12c	0.17±0.05c	0.14±0.02c	0.038±0.007c

注:表内数据为“平均值±标准差”;不同小写字母代表组间差异显著($P < 0.05$)。下同。

2.2 干旱胁迫对龙桑一号幼苗光合特性的影响

各处理下龙桑一号幼苗光合参数如图 1 所示。

轻度胁迫下,净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率分别较 CK 低 3.45 %、2.17 %、3.08 %,差异均不显著。随着干旱胁迫程度增强,3 个参数均呈下降趋势。中度胁迫下各参数分别比 CK 低 24.14 %、4.35 %、16.92 %,净光合速率、水分利用效率与 CK 差异显著,蒸腾速率与 CK 差异不显著。重度胁迫下各参数分别比 CK 低 65.52 %、51.09 %、27.69 %,各参数与 CK 差异显著。轻度、中度、重度胁迫之间净光合速率差异显著;重度胁迫下蒸腾速率显著低于轻度、中度胁迫,轻度、中度胁迫间蒸腾速率差异不显著;轻度胁迫下水分利用效率显著高于中度胁迫和重度胁迫,中度、重度胁迫间水分利用效率差异不显著。结果表明,中度和重度干旱胁迫下龙桑一号幼苗叶片净光合速率、蒸腾速率、水分利用效率会明显降低,干旱胁迫下蒸腾速率、水分利用效率变化幅度小于净光合速率,光抑制作用显著。

轻度胁迫下,气孔导度较 CK 低 3.13 %,差异不显著。说明轻度干旱胁迫下龙桑一号幼苗叶片气孔可维持一定张开度,保障蒸腾与光合作用。中度胁迫下,气孔导度较 CK 低 6.25 %,差异不显著,说明中度干旱胁迫对叶片气孔影响不大。重度胁迫下,气孔导度较 CK 下降 53.13 %,与其他处理差异显著,说明重度干旱下气孔开度极小,蒸腾与光合作用被明显抑制,利于减少水分损失。

轻度胁迫下,胞间 CO_2 浓度较 CK 高 4.84 %,差异不显著。随着干旱胁迫程度增强,胞间 CO_2 浓度呈升高趋势。中度和重度胁迫下,胞间 CO_2 浓度较 CK 分别高 9.68 %、29.03 %,重度胁迫下胞间 CO_2 浓度显著高于其他处理,其他处理间差异不显著。

综上,轻度干旱胁迫对龙桑一号幼苗光合参数无显著影响,中度干旱胁迫对净光合速率、水分利用效率影响显著,对其他参数影响不显著,植株具备一定抗旱能力;重度干旱抑制作用显著,表现为净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、水分利用效率显著下降,胞间 CO_2 浓度显著升高,此时光合作用受抑制的主要因素为非气孔因素,即叶肉细胞光合活性受损所致。

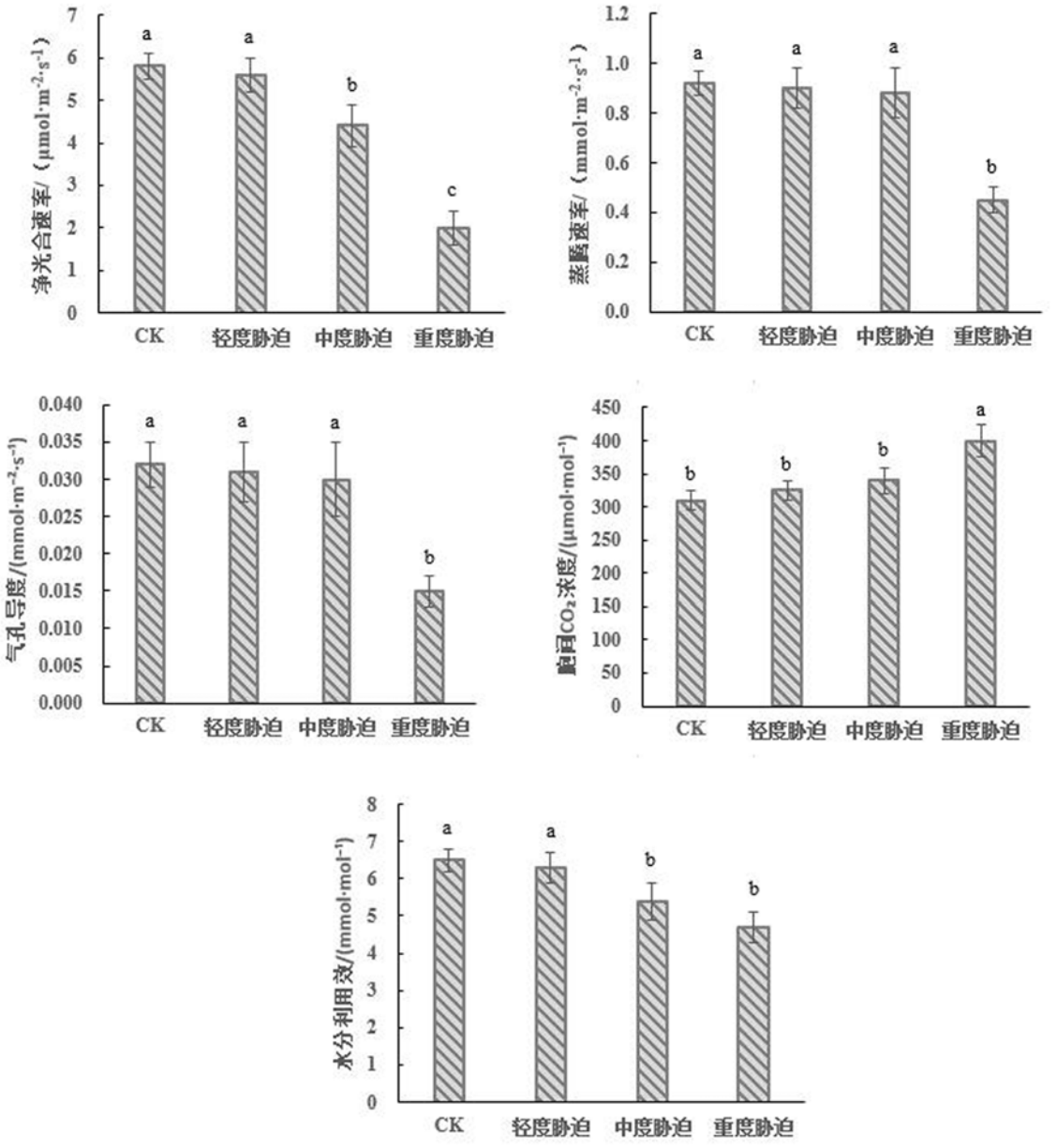


图 1　干旱胁迫对龙桑一号幼苗光合参数的影响

Fig. 1　Effects of drought stress on photosynthetic indexes of *Morus alba* cv. Longsang No. 1 seedlings

3 结论与讨论

植物的生长发育和形态特征都可作为鉴定植物抗旱性的指标。植物在干旱的环境下,幼苗的生长对水分很敏感,水分亏缺是限制林木幼苗生长发育的关键非生物胁迫因子[12]。本研究结果表明,轻度干旱胁迫下龙桑一号幼苗茎鲜重与 CK 相比无变化,株高、叶鲜重、叶干重和茎干重较 CK 有所升高但差异不显著,说明龙桑一号幼苗在一定干旱程度下能减少地上部分水分散失来适应干旱的环境,适度干旱可激发苗木抗逆潜能,并不会造成生长损伤。随着干旱胁迫程度持续加剧,中度、重度干旱胁迫下龙桑一号幼苗株高、叶鲜重、叶干重、茎鲜重

和茎干重均显著下降,且胁迫程度越高,抑制效应越明显。干旱胁迫会抑制植物细胞伸长与分裂,减少光合产物积累,进而导致株高生长停滞,这也是干旱环境下苗木生长受限的普遍生理机制[13]。本研究还发现,龙桑一号幼苗叶片对干旱胁迫的响应敏感度高于茎部,不同程度干旱胁迫下叶鲜重、叶干重下降幅度更大。其原因是叶片为植物水分蒸腾与外界环境交互的主要器官,组织结构柔嫩、水分代谢旺盛,对水分环境变化更为敏感[14];而茎部主要起支撑和输导作用,抗逆稳定性相对更强。龙桑一号幼苗通过优先抑制叶片生长、减少叶片物质积累的方式降低植株蒸腾耗水,是其适应干旱环境的重要生长调节机制,体现了该品种幼苗良好的干旱适应能力。

光合作用是植物体内重要的生理代谢过程,光合速率能表征植物的生长发育和对胁迫环境的抵抗力[15]。有研究指出,轻度缺水不会直接影响植物的光合作用,当叶片水势降低到一定数值,光合作用才开始减弱,之后会随干旱胁迫的加深迅速下降[16]。也有一些学者认为,光合作用对干旱胁迫较敏感,受到轻度的干旱胁迫植物的净光合速率会降低,同时植物的生长受到抑制[17]。本研究发现,随着干旱程度的增强,龙桑一号幼苗叶片净光合速率呈下降的趋势,轻度干旱胁迫下净光合速率与 CK 相比有所下降但差异不显著,中度和重度干旱胁迫下净光合速率显著降低。在水分胁迫环境下,植物可以通过合理协调碳同化和水分消耗之间的关系进而调节叶片水分利用效率的变化,这是植物抗旱策略的重要组成部分[18]。本研究中,水分利用效率以轻度干旱胁迫下最大,中度干旱胁迫次之,重度干旱胁迫较低,重度、中度干旱胁迫下水分利用效率显著低于轻度干旱胁迫,二者差异不显著,这说明在一定干旱程度下龙桑一号幼苗水分利用效率能保持相对稳定。

气孔作为高等植物与外界环境进行水汽和 CO_2 气体交换的主要通道,其在调节植物的碳同化、蒸腾作用,以及调控土壤—植物—大气连续体系统中水循环与碳循环等方面具有重要的作用。气孔导度指单位时间内通过单位面积气孔的水汽蒸腾速率,气孔导度越大则气孔开放程度越大,气孔导度对环境因子变化十分敏感,所有影响植物光合作用和叶片水分状况的因素都可能改变气孔导度。本研究表明,轻度和中度干旱胁迫对龙桑一号幼苗气孔导度影响不大,在进行光合作用时气孔张开,吸收 CO_2 导致胞间 CO_2 浓度增加,蒸腾作用增强,但蒸腾速率、水分利用效率变化幅度小于净光合速率,光抑制作用显著。重度干旱胁迫下,龙桑一号幼苗虽然气孔张开度很小,蒸腾速率下降,但是胞间 CO_2 浓度持续上升。根据 Farquhar 和 Sharkey 的气孔限制判断标准,重度干旱胁迫下胞间 CO_2 浓度上升而净光合速率下降,表明光合速率下降的主要限制因素为非气孔因素,即叶肉细胞光合活性受损所致。

综合生长与光合指标可知,龙桑一号幼苗对轻度、中度干旱胁迫具有较好的适应性,可通过生长分配调整、水分利用调控及气孔生理调节维持正常生长与光合代谢;但重度干旱胁迫会显著破坏其生长发育与光合系统功能。龙桑一号幼苗整体抗旱性较好,适合在轻度干旱立地条件下栽培应用。

参考文献

[1]赵雅静, 翁伯琦, 王义祥, 等. 植物对干旱胁迫的生理生态响应及其研究进展[J]. 福建稻麦科技, 2009, 27(2): 45-50.

[2]Li F L, Bao W K, Wu N. Effects of water stress on growth, dry matter allocation and water-use efficiency of a leguminous species, *Sophora davidii*[J]. *Agroforestry Systems*, 2009, 77(3): 193-201.

[3]陈雅君, 冯淑华, 陈桂芬. 植物抗旱性鉴定指标的研究现状与进展[J]. 中国林副特产, 2005(6): 62-63.

[4]陈香, 谭家得, 丁岳炼, 等. 干旱胁迫对竹节树幼苗生长的影响[J]. 福建林业科技, 2016, 43(2): 129-133.

[5]王豪杰, 侯月爽, 陈静, 等. 干旱胁迫对白花泡桐幼苗根、叶形态特征和生理变化的影响[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(5): 784-793.

[6]陈博, 范继红, 李玉舒, 等. 金野紫穗槐对干旱胁迫的响应[J]. 湖北农业科学, 2023, 62(7): 89-94.

(下转第 19 页)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 002
文章编号:1005-7129(2026)06-0006-06　　中图分类号:S718. 55　　文献标识码:A

沙地杨树人工林生物量和碳储量特征分析

付志祥[1], 鲁 英[1], 孙 鹏[1], 金培林[1], 李振洲[1], 孙 伟[2]
(1. 白城市林业科学研究院, 吉林 白城　137000; 2. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春　130033)

摘　要: 森林生态系统作为陆地生态系统的核心组成部分,是最大的陆地碳库,储存了陆地生态系统近 2/3 的碳。我国人工林面积居世界首位,在全球碳循环中具有不可替代的作用。吉林省西部沙地杨树人工林是区域内面积最大的森林类型,但其生物量与碳储量特征尚未得到系统研究。本研究以科尔沁沙地东部通榆县瞻榆镇的沙地杨树人工林为研究对象,通过设置不同林龄、不同径级的典型样地,测定叶、枝、干、根等器官的生物量与含碳率,构建生物量估算模型,并结合区域杨树清查数据,系统估算了该区域杨树人工林的碳储量。结果表明:基于胸径平方与树高乘积构建的幂函数生物量模型拟合精度高($R^2 > 0.90$),其中树干和树枝模型的决定系数分别达 0.982 6 和 0.978 2;各龄组杨树人工林平均含碳率排序为幼龄林(54.13 %)>近熟林(49.93 %)>成熟林(49.00 %)>中龄林(48.80 %)>过熟林(48.69 %);区域杨树人工林总生物量达 8.51×10^6 t,总碳储量为 4.23×10^6 t,其中成熟林和过熟林贡献了主要的生物量与碳储量。本研究构建的生物量模型与碳储量数据,为吉林省西部沙地森林碳循环评估、碳交易核算及杨树人工林可持续经营提供了科学依据。

关键词: 沙地杨树人工林;生物量模型;含碳率;碳储量;通榆县

Analysis of Biomass and Carbon Storage Characteristics of Poplar Plantations in Sandy Land

FU Zhixiang[1], LU Ying[1], SUN Peng[1], JIN Peilin[1], LI Zhenzhou[1], SUN Wei[2]
(1. Academy of Forestry Science of Baicheng City, Baicheng 137000, China; 2. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: As the core component of terrestrial ecosystem, forest ecosystem is the largest terrestrial carbon pool, storing nearly two-thirds of the carbon in terrestrial ecosystem. The area of China's plantation ranks first in the world. It plays an irreplaceable role in global carbon cycle. Poplar plantation in the sandy land of western Jilin Province is the forest type with the largest area in the region. Its biomass and carbon storage characteristics have not been systematically studied. The poplar plantation in sandy land in Zhanyu Town of Tongyu County, located in the eastern part of Horqin Sandy Land, was taken as the research object in this study. The biomass and carbon content of leaves, branches, stems and roots were measured by

收稿日期:2026-06-30
基金项目:白城市科技发展计划项目(202209);白城市指导性科技发展计划项目(2023036);白城市指导性科技发展计划项目(2025016);白城市指导性科技发展计划项目(2026010);吉林省第二十批创新创业人才资助项目
第一作者:付志祥(1984—),男,副研究员,研究方向为森林培育、林木育种、林业碳汇,E-mail:Fzx. 397930899@163. com。

setting typical plots with different stand ages and different diameter classes. The biomass estimation model was constructed. Combined with the regional poplar inventory data, the carbon storage of poplar plantation in the region was systematically estimated. The power function biomass model based on the product of square of DBH and tree height had excellent fitting effect ($R^2 > 0.90$). The determination coefficients of stem model and branch model were 0.982 6 and 0.978 2, respectively. The average carbon content of poplar plantation with different stand age was as follow: young forest (54.13 %) > near-mature forest (49.93 %) > mature forest (49.00 %) > half-mature forest (48.80 %) > over-mature forest (48.69 %). The total biomass of poplar plantation in the region was 8.51×10^6 t, and the total carbon storage was 4.23×10^6 t. The mature forest and over-mature forest contributed the main biomass and carbon storage. The biomass model and carbon storage data in this study could provide scientific basis for the carbon cycle assessment and carbon trading accounting of the forest in the sandy land of western Jilin Province and the sustainable management of poplar plantation.

Keywords: poplar plantation in sandy land; biomass model; carbon content; carbon storage; Tongyu County

全球气候变化对生态系统已产生严重影响,森林生态系统作为陆地生态系统中最重要的碳库,其碳汇功能在缓解全球变暖、调节碳循环过程中发挥着关键作用[1]。人工林作为森林资源的重要组成部分,凭借其生长周期短、碳积累速率快等优势,已成为提升区域碳汇能力、应对气候变化的重要途径[2]。我国是人工林面积最大的国家,人工林碳汇潜力的挖掘对于实现“双碳”目标具有重要战略意义。

吉林省西部位于科尔沁沙地东缘,是我国北方生态安全屏障的重要组成部分,该区域生态环境脆弱,土地沙化问题突出。杨树因具有耐旱、耐贫瘠、生长迅速等特性,是该区域主要造林树种。目前关于吉林省西部沙地杨树人工林的研究多集中于品种选育和栽培、生理特性等方面,针对其生物量分配规律与碳储量特征的系统性研究尚较为缺乏。

本文以通榆县瞻榆镇的沙地杨树人工林为研究对象,构建沙地杨树人工林不同器官(叶、枝、干、根)和整株的生物量模型,依据通榆县杨树人工林资源清查数据,利用生物量模型估算林分生物量,结合实测器官含碳率,进一步计算得到通榆县杨树人工林碳储量,以期为全国森林碳汇核算提供基础数据,为区域杨树人工林的科学经营管理(如林分结构优化、采伐周期确定等)提供理论支撑,同时为该区域参与碳交易、实现生态效益与经济效益双赢提供数据保障。

1 研究区概况

研究区位于吉林省西部的通榆县瞻榆镇,是科尔沁沙地最东部,为典型的风积沙区。该地区属温带大陆性季风气候,年平均日照时间 2 932 h,年平均气温 5.2 ℃,年降水量 345~360 mm,无霜期约 146 d,有效积温 3 000 ℃,空气干燥度 1.2。海拔 160 m,土壤类型为风积沙土,土壤 pH 均值为 7.95,土壤中水解性氮含量均值为 32.8 mg·kg^{-1}、速效磷含量均值为 2.7 mg·kg^{-1}、速效钾含量均值为 109.2 mg·kg^{-1}。

2 研究方法

2.1 样地设置、调查及采样

依据已有的研究设置 2 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm、16 cm、20 cm、26 cm、32 cm、40 cm 等 10 个径级[3],按照径级选择 10 个典型杨树人工林林分,覆盖不同龄组。在林分内随机布设调查样地,样地大小为 20 m × 20 m,设置的样地数量见表 1。

采用测树学方法对样地内树木进行每木调查,记录每个样地内植株数量、树高、胸径、冠幅等数据,每个样地选取 1 株标准木,共选取 22 株标准木,每个径级所选择的标准木数量见表 1。

表 1　各径级所选择的标准木基本测树信息

Tab. 1　Basic dendrometric information of selected model trees in each diameter class

径级	样地数量/个	标准木数量/株	标准木信息	
			胸径/cm	树高/m
2 cm	1	1	2.1	3.1
4 cm	2	2	4.0	4.1
			4.1	4.2
6 cm	2	2	6.0	6.4
			6.1	6.5
8 cm	3	3	8.1	8.4
			8.0	8.6
			8.1	8.5
12 cm	3	3	12.0	13.3
			12.2	13.6
			12.4	13.5
16 cm	3	3	16.0	14.2
			16.3	14.5
			16.2	14.3
20 cm	3	3	20.0	15.4
			20.1	15.1
			20.0	14.9
26 cm	2	2	26.0	15.2
			26.1	15.5
32 cm	2	2	32.2	16.2
			32.1	16.5
40 cm	1	1	40.5	18.2

伐倒标准木后,将主干从基部到梢头按 2 m 解析木法分段取样,截取 5~8 cm 厚的圆盘,逐段称重,之后累加得到树干鲜重。将树枝分离成小枝(直径<5 cm)、中等枝(直径 5~20 cm)和大枝(直径>20 cm)3 组,每组分离出叶和枝条,然后分别称鲜重。根系采用全根挖掘法,挖出后去除根表面的土壤、杂质,称全部根的鲜重。分别选取标准木各器官(枝条、叶片、根系)的混合样品各 3 份(根随机取 3~5 段)带回实验室,截取的圆盘全部带回。

2.2 生物量测定及模型构建

将采集的不同器官样品放入 85 ℃的恒温箱中烘至恒重,计算样品含水率。再根据各器官含水率和鲜重计算各器官干重(生物量)。$W_0 = W_1(1 - C)$。式中:W_0 为器官干重/g;W_1 为器官鲜重/g;C 为器官含水率。然后推算整株生物量,其为各器官生物量之和。基于 22 株标准木的实测生物量数据,以胸径平方与树高乘积构建叶、枝、干、根及整株生物量的幂函数模型[4, 5]。

2.3 含碳率测定

将已烘干的样品粗粉碎后按四分法研磨粉碎并均匀混合,采用湿烧法(重铬酸钾法)测定杨树各器官含碳量,再转化为含碳率,含碳率为测定得到的碳质量占参试样品质量的百分比。

2.4 碳储量及碳密度估算

依据生物量模型计算得到单株生物量,结合测定得到的含碳率数据以及 2020 年森林资

源清查数据中的通榆县杨树人工林面积和植株密度，估算得到通榆县杨树人工林不同龄组碳储量。$C_i = B_i \times C_F \times D_i \times A_i$。式中：$C_i$ 为碳储量/kg；B_i 为单株生物量/(kg · 株$^{-1}$)；C_F 为平均含碳率；D_i 为植株平均密度/(株 · hm^{-2})；A_i 为人工林面积/hm^2。区域杨树人工林总碳储量为各龄组碳储量之和，其除以区域杨树人工林面积即为区域杨树人工林碳密度。

2.5 数据处理

利用 Excel 2016 进行数据处理及制图。

3 结果与分析

3.1 沙地杨树人工林生物量模型

叶、枝、干、根及整株生物量的幂函数模型及拟合效果见表 2。结果显示，所有模型的决定系数均大于 0.90，表明模型拟合效果良好，能够准确预测沙地杨树人工林不同器官的生物量。其中，树干生物量模型的 R^2 最高(0.982 6)，其次为树枝模型(0.978 2)，叶片和根系模型的 R^2 分别为 0.916 0 和 0.913 9。

表 2　沙地杨树人工林不同器官生物量模型

Tab. 2　Biomass models of different organs of poplar plantations in sandy land

器官	生物量模型	R^2
叶	$W_{叶} = 22.896(D^2H)^{0.595\,0}$	0.916 0
枝	$W_{枝} = 24.677(D^2H)^{0.788\,8}$	0.978 2
干	$W_{干} = 55.562(D^2H)^{0.815\,6}$	0.982 6
根	$W_{根} = 51.547(D^2H)^{0.705\,1}$	0.913 9
整株	$W_{总} = 150.560(D^2H)^{0.766\,9}$	0.972 4

注：$W_{叶}$ 为叶生物量/g；$W_{枝}$ 为枝生物量/g；$W_{干}$ 为干生物量/g；$W_{根}$ 为根生物量/g；$W_{总}$ 为整株生物量/g；D 为胸径/cm；H 为树高/m。

3.2 沙地杨树人工林不同龄组不同器官含碳率

从图 1 可以看出，随着树木年龄的增长，不同龄组之间杨树人工林含碳率有一定的差异。幼龄林的平均含碳率(54.13 %)明显高于其他龄组，其他 4 个龄组平均含碳率大小依次为近熟林(49.93 %)、成熟林(49.00 %)、中龄林(48.80 %)、过熟林(48.69 %)。

杨树人工林各器官含碳率为 45.12 %～58.87 %，杨树人工林同一龄组不同器官含碳率存在差异，同一器官含碳率在不同龄组间也明显不同。幼龄林叶片含碳率偏低，中龄林达到峰值，近熟林有所回落，成熟林与过熟林小幅回升；幼龄林枝条含碳率较高，中龄林下降，近熟林回升并在成熟林、过熟林维持高位；幼龄林主干含碳率较高，中龄林下降，近熟林有所回升，成熟林和过熟林维持高位；幼龄林根系含碳率为同期各器官最高，中龄林下降，近熟林回升，成熟林、过熟林呈下降趋势。

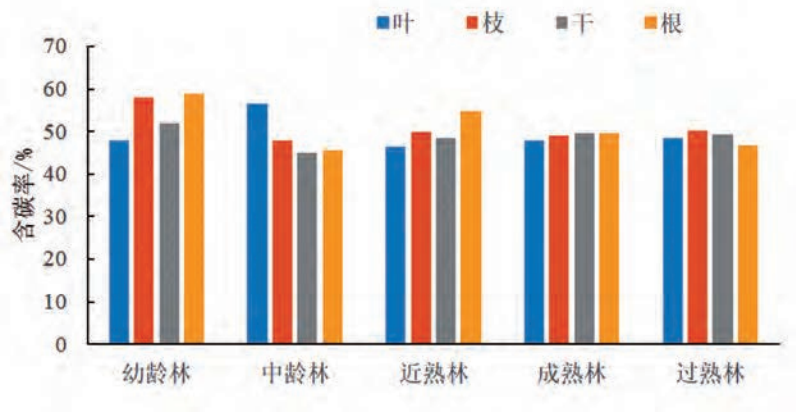


图 1　杨树人工林不同龄组不同器官含碳率

Fig. 1　Carbon content of different organs of poplar plantations with different ages

3.3 沙地杨树人工林生物量和碳储量

通榆县不同龄组杨树人工林生长指标、面积和密度如表 3 所示,不同龄组杨树人工林各器官生物量如表 4 所示,不同龄组杨树人工林各器官碳储量如表 5 所示。

区域杨树人工林总生物量为 8.51×10^6 t,其中过熟林生物量最高,占总生物量的 27.64 %;其次为成熟林,占比 25.98 %;幼龄林、中龄林、近熟林生物量占比分别为 16.08 %、15.94 %、14.36 %。从器官分配来看,树干生物量占比最高(55.87 %),其他器官生物量占比由大到小为根(20.59 %)、枝(19.82 %)、叶(3.72 %)。幼龄林、中龄林、近熟林器官生物量表现为干>根>枝>叶的分配格局,成熟林和过熟林器官生物量表现为干>枝>根>叶的分配格局。

区域杨树人工林总碳储量为 4.23×10^6 t,根据 2020 年通榆县森林资源清查数据可知杨树人工林共有 13.55 万 hm^2,计算该区域杨树人工林碳密度为 31.22 t · hm^{-2}。不同龄组碳储量排序为过熟林>成熟林>幼龄林>中龄林>近熟林,占比分别为 27.23 %、25.83 %、17.66 %、14.82 %、14.46 %。从器官分配来看,树干碳储量占比最高(55.09 %),其他器官碳储量占比由大到小为根(20.99 %)、枝(20.23 %)、叶(3.69 %),与生物量分配格局一致。各龄组器官碳储量分配格局也与生物量一致。

表 3 通榆县不同龄组杨树人工林面积及密度

Tab. 3 Area and density of poplar plantations with different ages in Tongyu County

指标	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
平均胸径/cm	8.0	12.3	16.4	21.3	23.5
平均树高/m	7.1	13.5	17.5	20.7	21.2
面积/hm^2	65 854.77	21 808.79	10 683.92	16 716.12	20 434.37
平均密度/(株 · hm^{-2})	1 300.81	1 215.36	1 168.57	787.43	576.42

注:面积及平均密度数据是依据 2020 年森林资源清查数据。

表 4 不同龄组杨树人工林各器官生物量

Tab. 4 Biomass of various organs of poplar plantations with different ages

器官	生物量/10^5 t					
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	总计
叶	0.75	0.57	0.44	0.70	0.71	3.17
枝	2.64	2.67	2.43	4.42	4.71	16.87
干	7.00	7.38	6.86	12.71	13.62	47.57
根	3.30	2.95	2.50	4.29	4.49	17.53
总计	13.69	13.57	12.23	22.12	23.53	85.14

表 5 不同龄组杨树人工林各器官碳储量

Tab. 5 Carbon storage of various organs of poplar plantations with different ages

器官	碳储量/10^5 t					
	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林	总计
叶	0.36	0.32	0.20	0.33	0.35	1.56
枝	1.53	1.28	1.22	2.17	2.36	8.56
干	3.64	3.33	3.33	6.30	6.71	23.31
根	1.94	1.34	1.37	2.13	2.10	8.88
总计	7.47	6.27	6.12	10.93	11.52	42.31

4 结论与讨论

本研究以通榆县沙地杨树人工林为研究对象,通过样地调查、样品测定与模型拟合,系统分析了其生物量与碳储量特征。

本研究基于胸径平方与树高乘积构建的沙地杨树人工林生物量模型,所有器官及整株模型的 R^2 均大于 0.90,其中树干和树枝模型的 R^2 高于其他器官,分别为 0.982 6 和 0.978 2,表明模型具有较高的拟合精度与预测能力,能够准确预测通榆县沙地杨树人工林不同器官及整株生物量。这与曾伟生[6]等的研究结果一致,说明胸径平方与树高乘积作为生物量模型自变量的合理性与广泛性。相较于单一胸径变量,此种模型综合考虑了树木的胸径和树高,能全面反映林木的生长状况与生物量积累水平,因此模型拟合效果更优。本研究构建的模型参数与我国其他地区杨树人工林生物量模型[6]存在一定差异,这可能与研究区立地条件有关。通榆县沙地水分条件限制林木径向生长,同径级杨树树高显著低于湿润平原区,生物量积累效率与湿润地区存在差异,导致模型参数有所不同。本研究构建的模型更适用于干旱沙地地区杨树人工林生物量估算,可为同类立地条件下的生物量研究提供参考。

本研究中杨树各器官含碳率为 45.12 %~58.87 %,与胥辉等[4]报道的杨树含碳率(45 %~55 %)基本一致。不同器官含碳率存在差异,这主要与器官的功能特性有关。树干和根系以木质素、纤维素为主,含碳量较高;叶片和小枝含有较多的蛋白质、水分等,含碳量相对较低[5]。龄组对含碳率的影响较大,各龄组杨树人工林平均含碳率排序为幼龄林(54.13 %)>近熟林(49.93 %)>成熟林(49.00 %)>中龄林(48.80 %)>过熟林(48.69 %)。幼龄林平均含碳率最高,原因可能是幼龄林生长速率快,光合作用产物积累迅速,木质化程度较低。一方面幼龄树木木材木质素及非结构性碳水化合物(糖、淀粉)含量更高,生物量分配上高含碳的细枝、细根占比更大;另一方面幼树木材灰分低,无机物对有机碳的稀释作用弱。随着林龄增加,树木呼吸作用增强,有机碳消耗增多,同时木质素分解速率加快,造成中龄林与过熟林含碳率有所下降。近熟林和成熟林的含碳率维持在较高水平,说明这两个龄组是杨树人工林碳积累的关键阶段。

通榆县沙地杨树人工林总生物量 8.51×10^6 t,总碳储量 4.23×10^6 t,过熟林和成熟林贡献了主要的生物量与碳储量,分别占总碳储量的 27.23 %和 25.83 %。该地区沙地杨树人工林碳密度为 31.22 t · hm^{-2},低于第九次森林资源清查数据(2014—2019 年)所估算的我国森林平均碳密度(36.86 t · hm^{-2})[7],这主要受研究区立地条件限制。沙地土壤肥力低、水分不足,导致杨树生长速率较慢,生物量积累水平低于全国平均水平。但从龄组分布来看,成熟林和过熟林碳储量占总碳储量的 53.06 %,表明区域杨树人工林已进入碳积累的稳定阶段。通榆县沙地杨树人工林中过熟林面积较大,占比较高。应避免大面积皆伐,采用择伐、小块渐伐方式开展抚育,清除衰老受害林木;通过林隙补植实现渐进式更新,提高幼、中龄林比例,优化林分龄组结构;结合沙地脆弱立地,实行差异化经营,实现森林碳汇持续提升。

参考文献

[1]刘世荣, 王晖, 李海奎, 等. 碳中和目标下中国森林碳储量、碳汇变化预估与潜力提升途径[J]. 林业科学, 2024, 60(4): 157-172.

[2]刘晓曼, 王超, 高吉喜, 等. 服务双碳目标的中国人工林生态系统碳增汇途径[J]. 生态学报, 2023, 43(14): 5662-5673.

[3]罗云建, 王效科, 逯非. 中国主要林木生物量模型手册[M]. 北京: 中国林业出版社, 2015.

[4]胥辉, 张会儒. 林木生物量模型研究[M]. 昆明: 云南科学技术出版社, 2002.

[5]刘婷岩. 不同结构的水曲柳与落叶松人工林碳储量研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012: 7-24.

[6]曾伟生, 陈新云, 杨学云. 我国人工杨树生物量建模和生产力分析[J]. 林业科学, 2019, 55(11): 1-8.

[7]李虹谕, 杨会侠, 丁国权, 等. 中国森林碳储量分析[J]. 林业科技通讯, 2022(12): 29-32.

(本篇专家编审:何怀江)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 003
文章编号:1005-7129(2026)06-0012-08 中图分类号:S771. 8 文献标识码:A

基于 GEDI 与 Sentinel 多源遥感的温带混交林树高结构反演及影响因素分析

杨成江[1], 张 岩[2], 魏 东[3], 丁铭铭[3,4], 刘 婷[3,4], 林 涵[5]
(1. 吉林省重点国有林技术服务中心, 吉林 长春 130022; 2. 蛟河市国有林总场, 吉林 吉林 132500; 3. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 4. 吉林省森林可持续经营国际联合研究中心, 吉林 长春 130033; 5. 吉林省林业技术推广站, 吉林 长春 130022)

摘 要: 森林冠层高度和垂直结构是评价温带混交林生长状态、经营质量和生态功能的重要指标,但传统样地调查和局地激光雷达观测难以同时兼顾垂直信息精度与区域连续覆盖。本文以吉林省典型温带森林树高结构为研究对象,联合 GEDI(Global Ecosystem Dynamics Investigation,全球生态系统动力学调查) L1B/L2A 波形数据、双季相无人机激光雷达数据和 Sentinel-1/2 遥感变量,构建基于 GEDI 结构约束的冠层高度与垂直结构参数反演流程。通过 GEDI 足迹匹配与高度一致性质量控制,获得 564 个有效结构样本,提取冠层高度(CH)、垂直占据度(VOS)和垂直结构指数(VSI),并以 GEDI 结构指标为模型标签,构建包含 Sentinel 光谱、红边、水分、雷达、季节差异和纹理特征的多源遥感变量体系,比较随机森林(RF)和 XGBoost 模型对不同结构指标的反演能力。结果表明,在轨道分组交叉验证条件下,CH 的 XGBoost 模型表现最优,R^2 为 0. 805、RMSE 为 3. 154 m;VOS 和 VSI 最优模型为 RF,R^2 分别为 0. 717 和 0. 713。变量组相对贡献分析表明,季节性和冠层水分变量对 CH 反演贡献较大,VOS 主要受季节性与局部纹理变量影响,VSI 中季节性变量贡献最高,同时冠层水分、局部纹理和 SAR 结构变量也具有一定作用。研究形成了 CH、VOS 和 VSI 的 10 m 连续空间制图,可为温带混交林树高制图、垂直结构分区、样地布设和森林经营提供参考。
关键词: GEDI;Sentinel-1/2;无人机激光雷达;冠层高度;垂直结构;温带混交林

Inversion and Influencing Factor Analysis of Forest Height Structure in Temperate Mixed Forests Using GEDI and Sentinel Multi-source Remote Sensing

YANG Chengjiang[1], ZHANG Yan[2], WEI Dong[3], DING Mingming[3], LIU Ting[3], LIN Han[4]
(1. Key State-owned Forest Technology Service Center of Jilin Province, Changchun 130022, China; 2. State-owned Forest Farm of Jiaohe City, Jilin 132500, China; 3. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 4. Jilin Provincial International Joint Research Center for Sustainable Forest Management, Changchun 130033, China; 5. Jilin Provincial Forestry Technology Popularizing Station, Changchun 130022, China)

Abstract: Forest canopy height and vertical structure are important indicators for evaluating the growth status, management quality, and ecological functions of temperate mixed forests. However, traditional field surveys and local-scale LiDAR observations are difficult to simultaneously achieve high-precision characterization of vertical structural information and contin-

收稿日期:2026-07-05
基金项目:吉林省科技厅国际合作项目(20240402030GH)
第一作者:杨成江(1983—),男,工程师,主要从事林业生态研究工作,E-mail:31993285@ qq. com。
通信作者:林涵(1971—),男,正高级工程师,主要从事林业生态研究工作,E-mail:564047248@ qq. com。

uous regional coverage. In this study, typical temperate mixed forests in Jilin Province were selected as the research area. GEDI L1B/L2A waveform data, dual-season UAV LiDAR data, and Sentinel-1/2 remote sensing variables were integrated to establish a GEDI-constrained framework for retrieving canopy height and vertical structural parameters. Through GEDI footprint matching and height-consistency quality control, 564 valid structural samples were obtained. Canopy height (CH), vertical occupation score (VOS), and vertical structure index (VSI) were derived from GEDI waveform data. Using these GEDI-derived structural indicators as model labels, a multi-source remote sensing feature system was constructed, including Sentinel spectral, red-edge, moisture, radar, seasonal difference, and texture feature. Random forest (RF) and XGBoost models were compared to evaluate their performance in retrieving different structural parameters. Under orbit-group cross-validation, the XGBoost model achieved the best performance for CH, with R^2 of 0.805 and RMSE of 3.154 m. RF model achieved the best performance for VOS and VSI, with R^2 of 0.717 and 0.713. Relative contribution analysis of variable groups indicated that seasonal and canopy moisture variables contributed most to CH retrieval, VOS was mainly influenced by seasonal and local texture variables, and seasonal variables showed the highest contribution to VSI, while canopy moisture, local texture, and SAR structural variables provided additional information. Finally, continuous 10 m spatial products of CH, VOS, and VSI were generated, providing valuable information for canopy structure mapping, vertical structure zoning, field plot design, and forest management of temperate mixed forests.

Keywords: GEDI; Sentinel-1/2; UAV LiDAR; canopy height; vertical structure; temperate mixed forest

森林冠层高度和垂直结构是表征林分生长状态、碳储量、生境质量和经营管理水平的重要结构属性[1-3]。冠层高度能够反映林分发育阶段和主林层空间格局,垂直结构反映不同高度层次中的叶量分布、枝干组成和植被空间配置特征,对生物量估算、森林恢复评价、野生动物栖息地识别和经营分区具有基础意义[1, 2]。传统样地调查能够获得较高精度的森林结构信息,但受空间范围和调查成本限制,难以满足大区域连续监测需求;机载或无人机激光雷达能够精细刻画森林三维结构,但通常受数据获取范围和重复观测能力限制[2, 3]。将激光雷达提供的垂直剖面信息转化为可由卫星影像连续预测的结构标签,是森林结构遥感由足迹观测走向区域制图的关键。

GEDI(Global Ecosystem Dynamics Investigation,全球生态系统动力学调查)搭载于国际空间站,可提供近全球尺度的大足迹波形激光雷达观测,为区域和全球森林冠层高度及垂直结构研究提供了新的结构样本[4]。已有研究通过融合 GEDI 与 Landsat 等连续遥感数据实现大范围冠层高度制图,证明了基于激光雷达结构信息与卫星遥感数据融合的森林参数反演方法具有可行性[5]。Sentinel-2 的可见光、近红外、红边和短波红外波段能够表征冠层色素、水分及物候差异[6];Sentinel-1 C 波段合成孔径雷达则对冠层含水状态、粗糙度和散射结构具有补充敏感性[7]。相关研究也表明,Sentinel 多光谱和机器学习方法能够有效表达林分属性的空间梯度[8, 9]。因此,结合 GEDI 的直接垂直观测与 Sentinel-1/2 的连续、多维特征,是兼顾结构含义与 10 m 空间覆盖的可行途径。

现有基于 GEDI 与连续遥感数据融合的森林结构研究多以 RH95、RH98 等冠层高度指标作为主要预测目标,而对于波形能量分层表达的垂直分布特征表征的冠层内部垂直占据范围和能量分配均匀度关注相对不足,若忽略轨道分组和空间相关性,模型泛化精度可能被高估[10]。本文以吉林省蛟河市典型温带混交林为研究对象,利用无人机激光雷达对 GEDI 足迹位置及结构指标进行质量控制,在此基础上提取冠层高度(CH)、垂直占据度(VOS)和垂直结构指数(VSI),结合 Sentinel-1/2 多时相遥感特征开展 10 m 空间反演,进而构建 GEDI 约束的三类树高结构样本及 Sentinel 特征体系,比较不同模型和变量组对 CH、VOS 和 VSI 的反演能力,最终形成三类 10 m 冠层结构参数的空间制图,并分析不同遥感变量对结构参数反演的贡献差异。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省蛟河市,地处长白山西麓,属于温带大陆性季风气候区。区域地形以

低山丘陵为主,气候条件适宜森林植被生长,是东北东部温带针阔混交林的重要分布区域。受地形、水热条件及长期森林演替和经营活动影响,区域森林资源丰富,林分结构具有较强的空间异质性。

研究区森林组成以天然次生林和人工林为主,主要树种包括长白落叶松(*Larix olgensis*)、红松(*Pinus koraiensis*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)等。不同树种在冠层高度、枝叶分布和垂直层次结构方面存在差异,形成了较为复杂的森林冠层结构特征。研究区森林类型丰富、林分结构差异明显,能够较好代表东北温带森林垂直结构特征,适合作为森林冠层高度和垂直结构遥感反演研究区域。

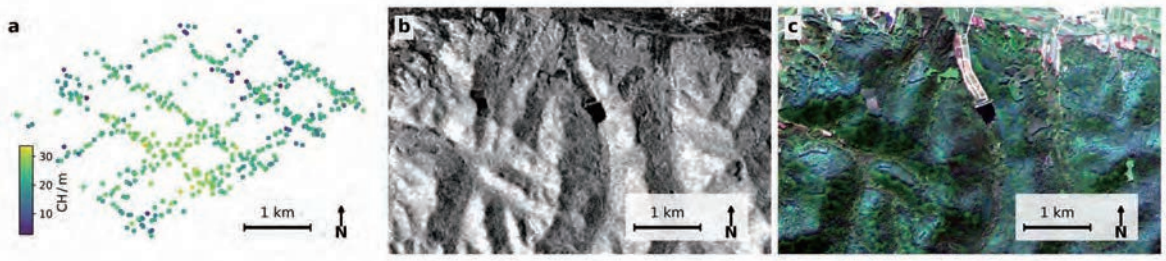
1.2 数据来源及处理

研究使用 GEDI L1B 波形和 L2A 相对高度产品、双季相无人机激光雷达、Sentinel-1/2 多时相影像、林型图和地形辅助数据(见表 1)。首先对不同来源数据进行空间参考统一、格式转换和尺度匹配,空间分析统一采用 UTM 52N 坐标系统。GEDI 数据经过质量控制筛选有效足迹,并基于 L1B 波形提取 CH、VOS 和 VSI 等结构指标;无人机激光雷达数据经点云预处理和高度归一化后,用于 GEDI 足迹匹配和结构指标一致性检验。Sentinel-2 影像基于 Google Earth Engine 平台进行云掩膜、多时相合成及光谱指数计算,提取光谱、红边、水分和季节变化特征;Sentinel-1 数据经预处理后提取 VV、VH、RVI 等雷达变量。林型图基于无人机影像利用人工解译方法,根据优势植被种类比例及冠层高度分为阔叶林(BM)、长白落叶松林(LAR)、蒙古栎林(OAK)、红松人工林(KP)以及低矮植被(LOW)5 个类型,林型图和地形数据经统一投影和栅格化处理后,用于林型差异分析和辅助解释。最终构建多源遥感数据集,用于 GEDI 结构参数的 10 m 空间尺度预测。研究区 GEDI 样本分布与 Sentinel 遥感影像如图 1 所示。

表 1　数据来源及基本信息

Tab. 1　Data sources and basic information

数据类型	获取时间	空间特征	数据来源
GEDI L1B/L2A	2019—2024 年	约 25 m 足迹	NASA/USGS LP DAAC 公开数据产品
激光雷达点云	2023 年 11 月、2024 年 6 月	平均点密度 113 点·m^{-2}	飞马 D2000S 无人机现场采集
Sentinel-2	2023—2024 年生长季	10 m 栅格	欧洲空间局(ESA)Copernicus 开放数据平台
Sentinel-1	2023 年度合成	10 m 栅格	欧洲空间局(ESA)Copernicus 开放数据平台
林型图	2023 年 11 月	10 m 栅格	研究区林型人工解译结果
地形数据	2023 年 11 月	10 m 栅格	无人机激光雷达数据



(a)高评分且高度一致 GEDI 样本分布　(b)Sentinel-1 C 波段雷达影像　(c)Sentinel-2A 真彩色影像

图 1　研究区 GEDI 样本与 Sentinel 遥感影像

Fig. 1　GEDI samples and Sentinel remote sensing images in the study area

2 研究方法

2.1 GEDI 足迹匹配与结构样本筛选

为保证 GEDI 结构样本与对应 Sentinel 像元之间的空间一致性,首先利用无人机激光雷达数据对 GEDI 足迹位置进行优化匹配。以 GEDI 报告中心为初始位置,在邻域候选中心上按 25 m 足迹直径提取无人机激光雷达模拟波形。将候选波形与 GEDI L1B 裁剪归一化波形进行比较,采用 Pearson 相关系数和 Jensen-Shannon 相似度组成的复合评分 C_r,JS 确定最佳位置。根据评分结果确定各 GEDI 足迹的最佳匹配位置,可降低足迹定位偏差及冠层空间异质性对结构参数提取的影响[11, 12]。在完成足迹匹配的基础上,进一步开展结构一致性筛选。由于 GEDI 与无人机激光雷达数据获取时间存在一定差异,采用 RH98 一致性作为样本质量控制依据。其中,RH(relative height)表示 GEDI 波形相对高度指标,RH98 为累计植被能量达到 98 %时对应的相对高度,可近似表征冠层顶部高度。保留 GEDI 与无人机激光雷达 RH98 差异不超过 4 m 的足迹样本,以减少潜在结构变化对建模样本可靠性的影响。

最终空间主表包含 1 503 个 GEDI 足迹,经波形匹配评分、RH98 高度一致性筛选,保留 C_r,JS≥0.80 且|RH98_GEDI-RH98_UAV|≤4 m 的样本,剔除缺少有效波形结构指标或 Sentinel 特征的记录,最终获得 564 个建模样本,覆盖 10 条 GEDI 轨道和 5 类植被类型,以 GEDI 计算的 CH、VOS 和 VSI 作为后续模型的因变量。无人机激光雷达指标、筛选阈值、林型和 GEDI-UAV 高度差仅用于样本筛选与一致性检验,不作为模型输入变量。

2.2 树高结构指标计算

候选位置确定后,统一对 GEDI 波形进行地面回波识别、地面回波去除、植被波形单位能量归一化和累计能量计算,提取 RH25、RH50、RH75、RH95 和 RH98。将 CH 定义为 RH98;将 VOS 定义为(RH95-RH25)/RH95,用于表征主要冠层能量在垂直方向的相对占据范围;VSI 根据下、中、上三层植被能量比例(P_i)的归一化熵计算,用于描述垂直能量分配均匀度(见表 2)。上述指标分别从冠层顶部高度、垂直占据范围和层间能量分配均匀度等方面描述森林冠层结构特征,能够从不同维度表征森林垂直结构差异[2, 12]。

表 2　树高结构指标定义

Tab. 2　Definition of the forest height structure index

指标	定义	生态含义
CH	RH98	近似冠层顶部高度
VOS	(RH95-RH25)/RH95	主要冠层能量的相对垂直占据范围
VSI	$-\Sigma(P_i \ln P_i)/\ln 3$	下、中、上三层植被能量分配均匀度

2.3 Sentinel 特征构建与联合反演

以 564 个 GEDI 结构样本作为模型预测目标,在对应最佳足迹位置提取 Sentinel 遥感特征。Sentinel-2 影像基于 Google Earth Engine 平台进行预处理,选取 2023—2024 年覆盖研究区的生长季、秋季、休眠期和春季低云量影像,提取光谱波段、红边和短波红外波段,并构建 NDVI(normalized difference vegetation index,归一化植被指数)、EVI(enhanced vegetation index,增强型植被指数)、GNDVI(green normalized difference vegetation index,绿光归一化植被指数)、红边叶绿素指数及季节差值等特征;Sentinel-1 采用同期 C 波段 GRD 数据,经过预处理后提取 VV、VH、VV-VH、RVI 和入射角统计量。为降低 GEDI 足迹尺度与 10 m 像元之间的差异,对主要波段和指数计算中心像元、邻域均值、邻域标准差及灰度共生矩阵纹理特征[6-8, 13, 14]。不同特征组基于相同样本和相同交叉验证折进行比较,以分析光谱、物候、水分、雷达和空间纹理对 CH、VOS 和 VSI 三类结构参数预测的互补作用。

模型比较以 GEDI 轨道编号为分组单元开展 GroupKFold 交叉验证,确保同一轨道样本不同时进入训练集和验证集,降低空间相关性造成的精度高估[10]。分别建立随机森林(RF)、XGBoost 模型,以 R^2、RMSE、MAE 和 Pearson 相关系数评价模型预测性能[9, 13]。模型优选以交叉验证 R^2 为主要依据,同时参考 RMSE 和

MAE 进行综合判断。在交叉验证中完成缺失值处理和模型参数优化,并基于最优模型的变量重要性结果汇总不同变量组的相对贡献。为便于不同变量组之间比较,对同一结构指标下的变量组重要性汇总值进行归一化,使各变量组相对贡献率之和为 100 %。最后用最佳模型对 Sentinel 特征栅格进行 10 m 空间尺度预测,完成 CH、VOS 和 VSI 连续空间制图。

2.4 林型差异与影响因素

在最终样本和 10 m 制图基础上,按林型统计 CH、VOS 和 VSI 分布,汇总不同变量组的重要性。变量组依据变量来源和信息特征划分为季节性、冠层水分、SAR 结构和局部纹理 4 类,其中季节性变量主要来自多时相影像及季节差值,冠层水分变量主要由 NDMI、NBR 和短波红外相关变量组成,SAR 结构变量来自 Sentinel-1 后向散射及 RVI,局部纹理变量来自邻域统计和 GLCM 纹理。通过比较归一化后的变量组相对贡献率,分析不同遥感特征对 CH、VOS 和 VSI 反演结果的贡献差异。

3 结果与分析

3.1 GEDI 结构指标一致性检验

为检查质量控制后 GEDI 结构指标的一致性,本文利用 GEDI 计算的 CH、VOS 和 VSI 与 UAV LiDAR 计算的相同指标进行比较(见表 3)。564 个有效样本覆盖 10 条轨道和 5 类植被类型。GEDI 计算的 CH、VOS 和 VSI 与 UAV LiDAR 对应指标的 R^2 分别为 0.912、0.801、0.836,RMSE 分别为 1.650、0.157 和 0.149,表明质量控制后的 GEDI 结构指标与 UAV LiDAR 结果具有较好的一致性,可用于后续 Sentinel 反演。

表 3　高一致性样本主要指标分布

Tab. 3　Distribution of main indicators of high consistency samples

指标	来源	最小值	中位数	均值	最大值
CH/m	GEDI	2.734	22.768	22.236	33.685
	UAV	2.880	23.181	22.803	32.590
VOS	GEDI	0.229	0.407	0.439	0.928
	UAV	0.271	0.453	0.447	0.957
VSI	GEDI	0.320	0.783	0.771	0.999
	UAV	0.367	0.811	0.763	0.974

3.2 GEDI-Sentinel 联合反演及 10 m 制图

不同结构指标的反演精度存在一定差异(见表 4)。按交叉验证 R^2 确定最优模型,CH 的 XGBoost 模型表现最优,R^2 为 0.805、RMSE 为 3.154 m;VOS 和 VSI 最优模型为 RF,R^2 分别为 0.717 和 0.713。总体上,Sentinel 多源特征对冠层高度和垂直结构均具有一定反演能力。

表 4　轨道分组交叉验证下主要模型精度

Tab. 4　Main model accuracy under orbit-group cross-validation

指标	模型	R^2	RMSE	MAE
CH/m	RF	0.741	3.353	2.549
	XGBoost	0.805	3.154	2.407
VOS	RF	0.717	0.121	0.096
	XGBoost	0.638	0.129	0.099
VSI	RF	0.713	0.167	0.102
	XGBoost	0.706	0.151	0.108

将最佳模型应用于完整 Sentinel 特征栅格后,获得 CH、VOS 和 VSI 三类 10 m 制图(见图 2)。CH 空间分布与林型和冠层连续性具有较好对应关系,较高值主要位于成熟混交林和高大阔叶林斑块,低值多见于低矮植被或冠层破碎区。VOS 和 VSI 空间分布也表现出一定的林

型差异,其中 VOS 较高值出现在阔叶混交林、低矮林分等垂直分布幅度较大的区域,低值多见于红松、蒙古栎等冠层结构相对简单的林分。VSI 与 VOS 在部分区域表现出相似的空间变化,说明两类指标在反映垂直结构差异方面具有一定一致性。

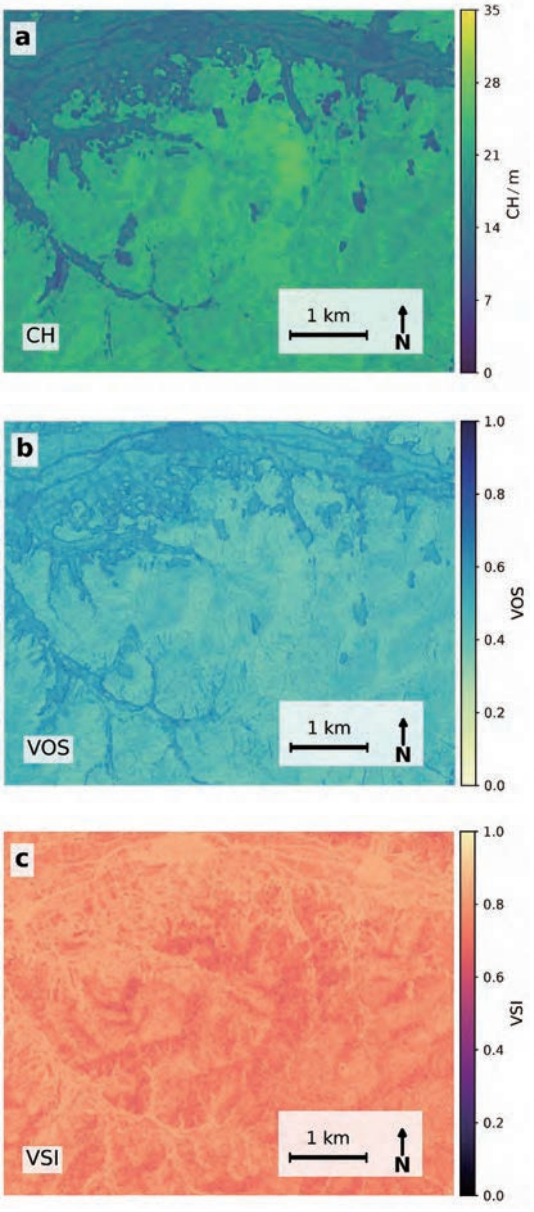


图 2　CH、VOS 和 VSI 的 10 m 空间分布

Fig. 2　Continuous 10 m maps of CH, VOS, and VSI

3.3 林型差异与影响因素

不同林型间 CH、VOS、VSI 差异明显(见图 3)。LAR 的 CH 均值最高,为 26.420 m;OAK、KP 和 BM 分别为 22.208 m、22.029 m 和 21.888 m,LOW 仅为 5.670 m。该梯度与图 2a 中的高大长白落叶松林主体和低矮斑块分布趋势基本一致,表明 GEDI-Sentinel 模型能够反映主要不同林型间的冠层高度差异。LOW 的 VOS 均值最高,为 0.648;BM 为 0.464,高于 OAK、KP 和 BM。表明不同林型的冠层垂直分布幅度存在差异,这种差异可能与冠层郁闭程度和垂直层次有关。LOW 和 BM 的 VSI 均值分别为 0.849 和 0.795,高于 OAK、LAR 和 KP,说明 LOW 和 BM 样本的三层能量分配相对更均匀。

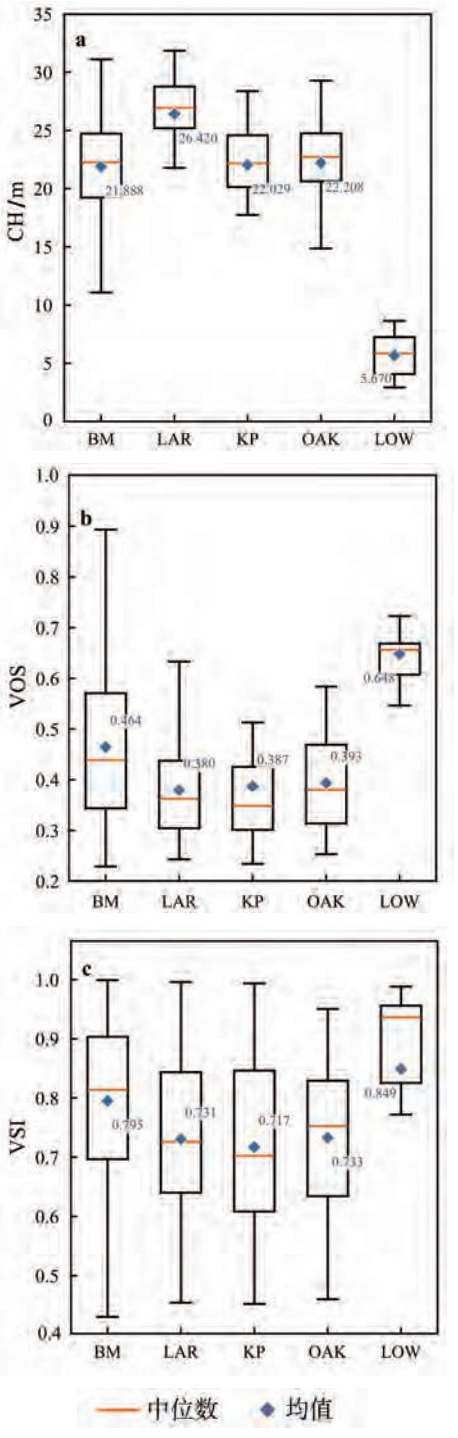


图 3　不同林型树高结构指标

Fig. 3　Forest height structure indicators of different forest types

对原变量组重要性汇总值进行归一化处理,不同变量组对 CH、VOS 和 VSI 反演的相对贡献存在明显差异。CH 模型中,季节性和冠层水分变量贡献较高,分别为 54.6 %和 34.4 %,SAR 结构和局部纹理的贡献分别为 6.4 %和 4.6 %。VOS 模型中,季节性变量贡献最高,达到 46.7 %,局部纹理、冠层水分和 SAR 结构的贡献分别为 27.5 %、15.3 %和 10.5 %。VSI 模型中,季节性、冠层水分、局部纹理和 SAR 结构的贡献分别为 43.7 %、23.1 %、17.1 %和 16.1 %。结果表明,不同结构指标所依赖的遥感信息存在差异,其中季节性信息在 3 类指标中均具有较高贡献,冠层水分、局部纹理和 SAR 结构则在不同指标中发挥补充作用。

4 结论与讨论

本研究利用 GEDI 波形提取森林冠层高度和垂直结构指标,并结合 Sentinel-1/2 影像开展空间连续反演。GEDI 能够获取森林垂直方向的结构信息,而 Sentinel 影像具有连续覆盖和多时相观测优势,可提供光谱、红边、水分、季节变化及雷达散射等信息,两类数据结合为森林结构参数的区域反演提供了较好的数据基础[4, 6-8]。结果表明,CH 的反演精度总体高于 VOS 和 VSI,这可能与不同指标反映的冠层特征有关。CH 主要表征冠层顶部高度,其变化与冠层光谱、水分状况、阴影及雷达散射等特征具有较为稳定的关系;VOS 和 VSI 则反映冠层内部能量的垂直分布,更容易受到林下植被、冠层分层、季节叶量变化以及地面回波处理等因素影响[1, 12, 15]。因此,Sentinel 数据对冠层高度的表征能力相对较强,而对冠层内部垂直结构的反演仍具有可提升空间。

不同林型的 CH、VOS 和 VSI 表现出一定差异,其中长白落叶松的 CH 较高,而低矮植被的 CH 明显较低;VOS 和 VSI 则表现出与 CH 不同的变化特征,说明冠层高度和垂直结构能够从不同方面反映林分结构差异。变量组相对贡献率表明,季节性和冠层水分变量对 CH 反演贡献较大,VOS 主要依赖季节性和局部纹理变量,VSI 模型中季节性变量贡献最高,冠层水分、局部纹理和 SAR 结构变量也具有一定作用。这说明不同遥感特征在森林冠层结构参数预测中具有互补作用,多源遥感融合有助于提高复杂森林环境下结构信息获取能力[16]。本研究获得的 CH 空间制图结果可用于林分高度分级、经营小班识别和样地布设,VOS 和 VSI 可作为森林垂直结构分区和异常区域识别的辅助指标。此外,由于本研究区域范围相对有限,GEDI 数据与无人机激光雷达、Sentinel 数据获取时间并非完全一致,虽然通过波形匹配和 RH98 高度一致性筛选尽量降低了时间差影响,但仍可能带来一定不确定性。后续将扩大研究范围,增加不同年份和林型样本,并进一步优化多时相影像和纹理特征,以提高森林垂直结构参数的反演稳定性和模型泛化能力。

综上,本研究构建了基于 GEDI 结构样本与 Sentinel-1/2 多源遥感融合的森林冠层结构参数 10 m 空间预测方法。轨道分组交叉验证结果表明,CH、VOS 和 VSI 均能够通过多源遥感变量实现空间连续预测,其中 CH 具有较高预测能力,VOS 和 VSI 能够补充描述森林垂直结构差异。该方法为区域尺度森林三维结构信息获取提供了一种有效途径。

参考文献

[1] 胡天宇, 刘小强, 吴晓永, 等. 森林冠层结构复杂性研究进展及展望[J]. 遥感学报, 2025, 29(1): 83-101.

[2] 李增元, 刘清旺, 庞勇. 激光雷达森林参数反演研究进展[J]. 遥感学报, 2016, 20(5): 1138-1150.

[3] 庞勇, 李增元, 陈尔学, 等. 激光雷达技术及其在林业上的应用[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 129-136.

[4] Dubayah R, Blair J B, Goetz S, et al. The Global Ecosystem Dynamics Investigation: high-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography[J]. *Science of Remote Sensing*, 2020, 1: 100002.

[5] Potapov P, Li X Y, Hernandez-Serna A, et al. Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data[J]. *Remote Sensing of Envi-*

ronment, 2021, 253: 112165.

[6] Drusch M, Del Bello U, Carlier S, et al. Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 25-36.

[7] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, et al. GMES Sentinel-1 mission [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, 120: 9-24.

[8] 唐少飞, 田庆久, 徐凯健, 等. Sentinel-2 卫星落叶松林龄信息反演[J]. 遥感学报, 2020, 24(12): 1511-1524.

[9] 汪静平, 吴小丹, 马杜娟, 等. 基于机器学习的遥感反演: 不确定性因素分析[J]. 遥感学报, 2023, 27(3): 790-801.

[10] Roberts D R, Bahn V, Ciuti S, et al. Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure [J]. *Ecography*, 2017, 40(8): 913-929.

[11] Hancock S, Armston J, Hofton M, et al. The GEDI simulator: a large-footprint waveform lidar simulator for calibration and validation of spaceborne missions [J]. *Earth and Space Science*, 2019, 6(2): 294-310.

[12] 曹林, 佘光辉. 基于机载小光斑全波形 LiDAR 的亚热带林分特征反演[J]. 林业科学, 2015, 51(6): 81-92.

[13] Belgiu M, Drăguţ L. Random forest in remote sensing: a review of applications and future directions [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, 114: 24-31.

[14] Haralick R M, Shanmugam K, Dinstein I. Textural features for image classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, SMC-3(6): 610-621.

[15] 刘浩, 张峥男, 曹林. 机载激光雷达森林垂直结构剖面参数的沿海平原人工林林分特征反演[J]. 遥感学报, 2018, 22(5): 872-888.

[16] 李增元, 陈尔学, 覃先林, 等. 中国林草遥感技术研究与应用: 最新进展、挑战与对策[J]. 遥感学报, 2025, 29(6): 1804-1830.

(本篇专家编审:翟畅)

(上接第 5 页)

[7] 宗小丽. 干旱胁迫对刺槐幼苗生长性状的影响[J]. 特种经济动植物, 2023, 26(7): 68-69, 77.

[8] 陈昕, 徐宜凤. 干旱胁迫对石灰花楸幼苗生长和生理指标的影响[J]. 福建林学院学报, 2011, 31(4): 330-334.

[9] 张涛. 水分胁迫对榆树和毛白杨生长及生理特性的影响[J]. 山西林业科技, 2022, 51(3): 26-28, 40.

[10] Flexas J, Bota J, Loreto F, et al. Diffusive and metabolic limitations to photosynthesis under drought and salinity in C_3 plants [J]. *Plant Biology*, 2004, 6(3): 269-279.

[11] 马建平, 牟志美. 桑树抗逆性研究进展[J]. 北方蚕业, 2006(2): 5-7.

[12] 林兆旭, 何耀武, 张璐, 等. 水分亏缺及复水对野生老芒麦成苗的影响[J]. 草学, 2025(2): 56-61.

[13] 牛忠泽, 巫利梅, 吕海英, 等. 干旱胁迫对银砂槐幼苗生长及生理特性的影响[J]. 新疆林业, 2024(1): 21-24.

[14] 王建林, 于贵瑞, 房全孝, 等. 不同植物叶片水分利用效率对光和 CO_2 的响应与模拟[J]. 生态学报, 2008(2): 525-533.

[15] Angon P B, Tahjib-Ul-Arif M, Samin S L, et al. How do plants respond to combined drought and salinity stress? A systematic review[J]. *Plants*, 2022, 11(21): 2884.

[16] 柴成武, 王方琳, 赵鹏, 等. 干旱胁迫对沙蒿叶片水分含量、光合特性及抗氧化酶的影响[J]. 西北林学院学报, 2025, 40(1): 42-50.

[17] 邬佳宝, 马明科, 张刚, 等. 文冠果对干旱胁迫的光合生理响应[J]. 干旱地区农业研究, 2014, 32(5): 55-60.

[18] 王豪杰, 侯月爽, 陈静, 等. 干旱胁迫对白花泡桐幼苗根、叶形态特征和生理变化的影响[J]. 河南农业大学学报, 2023, 57(5): 784-793.

(本篇专家编审:陶晶)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 004
文章编号:1005-7129(2026)06-0020-06 中图分类号:S771. 8 文献标识码:A

基于防护效应指数的防护林空间结构参数对农田作物长势的影响机制研究

魏 东[1], 赵吉胜[2], 赵晓璐[3], 卢欣影[4], 刘 婷[1,5], 张忠辉[2]
(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 吉林省林木种子调制储备中心, 吉林 长春 130703; 3. 吉林省重点国有林技术服务中心, 吉林 长春 130022; 4. 吉林省林业勘察设计研究院, 吉林 长春 130022; 5. 吉林省森林可持续经营国际联合研究中心, 吉林 长春 130033)

摘 要: 为定量分析防护林空间结构对农田作物长势的影响,以吉林省长岭县玉米农田防护林为研究对象,结合实测林分数据和遥感归一化植被指数(NDVI)数据,构建防护效应指数,采用局部加权散点平滑回归(LOESS)划分防护距离梯度,并分析林带长度、林带宽度、树高和防护林密度与防护效应指数的关系。结果表明:随着距林带的距离增加,NDVI 呈先升高、后降低并趋于稳定的变化特征,其中 0~30 m 为负影响区,30~330 m 为正影响区,330 m 以外为无影响区;研究区防护效应总体以中等正效应为主,负效应区主要零散分布在近林缘和林网缺失地块;林带长度、林带宽度和防护林密度与防护效应指数均呈极显著正相关($P < 0.001$),相关系数分别为 0.439、0.364 和 0.289,树高与防护效应指数的相关性不显著。研究构建的防护效应指数能够反映防护林对作物长势的促进或抑制作用,可为农田防护林防护效应评价及林网空间配置优化提供参考。

关键词: 农田防护林;防护效应指数;NDVI;空间结构

Study on the Influence Mechanism of Shelterbelt Spatial Structure Parameters Based on Protective Effect Index on the Farmland Crop Growth

WEI Dong[1], ZHAO Jisheng[2], ZHAO Xiaolu[3], LU Xinying[4], LIU Ting[1,5], ZHANG Zhonghui[2]
(1. Jilin Provincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Forest Seed Processing and Reserve Center of Jilin Province, Changchun 130703; 3. Key State-owned Forest Technology Service Center of Jilin Province, Changchun 130022, China; 4. Forest Survey and Design Institute of Jilin Province, Changchun 130022, China; 5. Jilin Provincial International Joint Research Center for Sustainable Forest Management, Changchun 130033, China)

Abstract: In order to quantitatively analyze the influence of shelterbelt spatial structure on farmland crop growth, the maize farmland shelterbelt in Changling County of Jilin Province was selected as the research object. Field-measured stand data and remotely sensed normalized difference vegetation index (NDVI) data were combined to construct the protective effect index. Locally estimated scatterplot smoothing (LOESS) was used to divide the distance gradients of protective effects. The relationships between the index and shelterbelt length, shelterbelt width, tree height, shelterbelt density were then analyzed. With the increase of the distance from the shelterbelt, NDVI first increased, then decreased, and finally tended to be stable. The shelterbelt had the negative influence on the zone with the distance of 0-30 m, it had the positive influence

收稿日期:2026-07-10
基金项目:吉林省重大科技专项(20230303006SF)
第一作者:魏东(1997—),男,研究实习员,主要从事林业遥感研究工作,E-mail:weidong3014@ outlook. com。
通信作者:张忠辉(1972—),男,研究员,主要从事森林生态和森林经理研究工作,E-mail:zzhgiszzh@ 163. com。

on the zone with the distance of 30-330 m, and it showed no evident influence on the zone with the distance beyond 330 m. The protective effect in the study area was generally dominated by moderate positive effects, whereas negative effect areas were mainly scattered in the plots near the forest edge and where the shelterbelt network was missing. The shelterbelt length, shelterbelt width, and shelterbelt density were extremely significant and positive correlated with the protective effect index ($P < 0.001$), with correlation coefficients of 0.439, 0.364, and 0.289, respectively. The tree height was not significantly correlated with the index. The protective effect index constructed in this study could reflect the positive or negative effects of farmland shelterbelts on crop growth. That could provide the reference for the protective effect evaluation of farmland shelterbelts and the spatial configuration optimization of farmland shelterbelt networks.

Keywords: farmland shelterbelt; protective effect index; NDVI; spatial structure

农田防护林是农田生态系统的重要生态屏障,科学合理配置林带可有效实现防风减灾、保持水土和增强农田生态系统稳定性等功能,进而降低农业灾害发生风险,提高农作物产量[1-3]。其在改善农区生态环境、促进农村经济发展、增加农民收入、推进新农村建设等方面发挥了重要作用[4]。

既往关于农田防护林防护效应的研究多集中于林带防风效能[5],常以风速变化、流场分布等作为评价指标[6, 7]。相关研究表明,农田防护林的防风效能与树高[8]、林带长度[9]、林带宽度[10]和林分密度[11, 12]等空间结构参数密切相关。近年来,随着遥感技术的发展,归一化植被指数(NDVI)被广泛用于表征植物长势,并逐步应用于农田防护效应评价[13]。但现有评价方法多侧重单一指标或局部样地,难以统一反映防护林对作物长势的正、负效应,也不利于不同地块之间的比较。为此,本研究结合实测林分数据与遥感 NDVI 数据,分析基于距林带距离的作物长势变化特征,在距离梯度分析的基础上构建防护效应指数,并探讨主要空间结构参数与该指数的关系,以期为农田防护林防护效应评价和空间配置优化提供依据。

1 研究区概况

研究区位于吉林省松原市长岭县(地理位置 123°04′~124°45′ E、43°59′~44°42′ N)。长岭县地处松嫩平原腹地,地势平坦,海拔 140~270 m,属北温带大陆性气候,年平均气温 7.5 ℃,年平均降水量 542.8 mm,年平均风速 2.9 m·s^{-1},年平均大风日数 11.5 d。试验区位于长岭县东北部(地理位置 124°04′~124°24′ E、44°08′~44°24′ N),范围为 20 km × 20 km,主要作物为玉米(*Zea mays*)。防护林由白城小黑杨(*Populus simonii* × *P. nigra* 'Baicheng')、白榆(*Ulmus pumila*)等树种组成。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

2.1.1 防护林数据

林带长度、林带宽度、树高和防护林密度等空间结构参数均来源于课题组的实地调查,防护林密度由样方内防护林带面积除以样方总面积得出。

2.1.2 NDVI 数据

NDVI 是表征植被生长状况的常用指标,本研究以 NDVI 间接反映农田防护林对作物长势的影响。数据来源于国家综合地球观测数据共享平台(https://www.nesdc.org.cn/)。对原始数据进行重投影、裁剪和异常值剔除等预处理后,形成研究区 NDVI 数据集。

2.2 局部加权回归模型构建

采用局部加权散点平滑回归(LOESS)拟合基于距林带距离的作物 NDVI 变化。LOESS 不需要预先设定固定的函数形式,适用于具有非线性和局部波动特征的数据,能够较好地反映 NDVI 随距离变化的总体趋势及局部差异。其计算公式如下。

$$w_i(x_0) = \left(1 - \left|\frac{x_i - x_0}{d(x_0)}\right|^3\right)^3$$

式中:x_0 为目标拟合点;$w_i(x_0)$ 为样本点 i 在 x_0 处的权重;x_i 为邻域内的样本观测点;$d(x_0)$ 为 x_0 局部邻域半径,为邻域内距离 x_0 最远样本点的距离。样本点距目标拟合点越远,其权重越小;当样本点超出局部邻域范围时,权重取值为 0。

2.3 防护效应指数计算

为统一表征防护林对作物长势的促进或抑制作用,在距离梯度分析的基础上构建防护效

应指数(I_{PEI})。

$$I_{PEI}=\frac{I_i-\bar{I}}{\bar{I}}\times 100\ \%$$

式中:I_i 为第 i 个位置的实测 NDVI 值;$\bar{I}$ 为研究区无防护效应区域的 NDVI 均值。

以 NDVI 正差值的最大值和负差值的最小值为端点进行线性归一化,将防护效应指数的取值范围限定为[-1,1]。指数大于 0 表示防护林对作物长势具有正效应,小于 0 表示负效应,接近 0 表示影响较弱。

2.4 Pearson 相关性分析

为分析防护林空间结构参数与防护效应指数之间的线性相关程度,采用 Pearson 相关系数进行相关性分析,计算公式如下。

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\cdot\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}$$

式中:r 为 Pearson 相关系数;n 为样本数量;x_i、y_i 分别为变量 x 和 y 的第 i 组观测值;$\bar{x}$、$\bar{y}$ 分别为两变量的样本均值。r 的取值范围为[-1,1],其绝对值越接近 1 表明变量间的线性相关性越强,其绝对值越接近 0 表明线性相关性越弱。

3 结果与分析

3.1 作物 NDVI 的变化趋势

以林带为基准,在 0~500 m 范围内按 10 m 间隔构建缓冲区,并计算各缓冲区内的平均 NDVI。结果表明,随着距林带距离增加,作物 NDVI 总体呈先升高、后降低并逐渐趋于稳定的变化趋势(见图 1)。采用尾部收敛稳态均值法分析发现,距林带 330 m 后作物 NDVI 基本稳定,表明该距离以外林带对作物长势的影响已不明显。因此,将 330 m 以外缓冲区的 NDVI 均值 0.849 1 作为无影响区基准值,并将研究范围划分为 0~30 m 负影响区、30~330 m 正影响区和 330~500 m 无影响区。

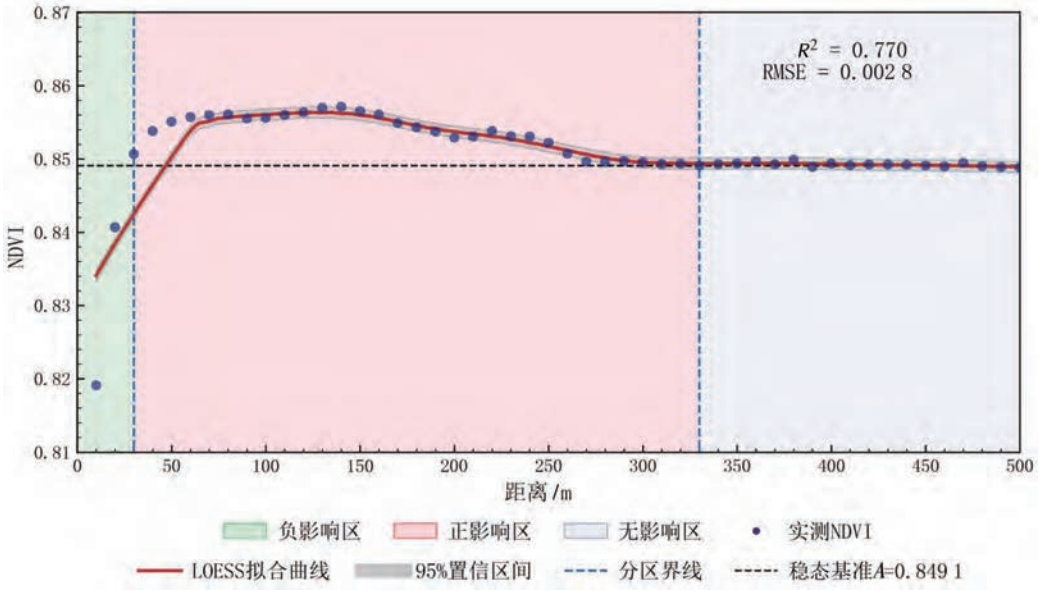


图 1 基于距防护林距离的作物 NDVI 变化趋势

Fig. 1 Variation in crop NDVI with distance from the shelterbelt

3.2 防护效应指数的空间表现

对研究区 NDVI 差值进行栅格计算,得到防护效应指数的空间分布(见图 2)。研究区防护效应指数总体以正效应为主,负效应区面积较小。中等正效应区(0.4~0.6)分布最广,构成研究区防护效应的主体;强正效应区(0.8~1.0)呈零散斑块状分布,主要位于林网相对密集的区域。负效应区(-1.0~-0.2)主要零散分布在近林缘和林网缺失地块,近林缘地块负效应可能与林木遮阴及林木根系对水分、养分的竞争有关,林网缺失地块的负效应则可能与缺少林带防护有关。过渡区(-0.2~0.2)分布较少,表明正、负效应之间的空间转换较快。总体来看,研究区现有林带呈网格状分布,正效应范围明显大于负效应范围,具有较好的综合防护效果。

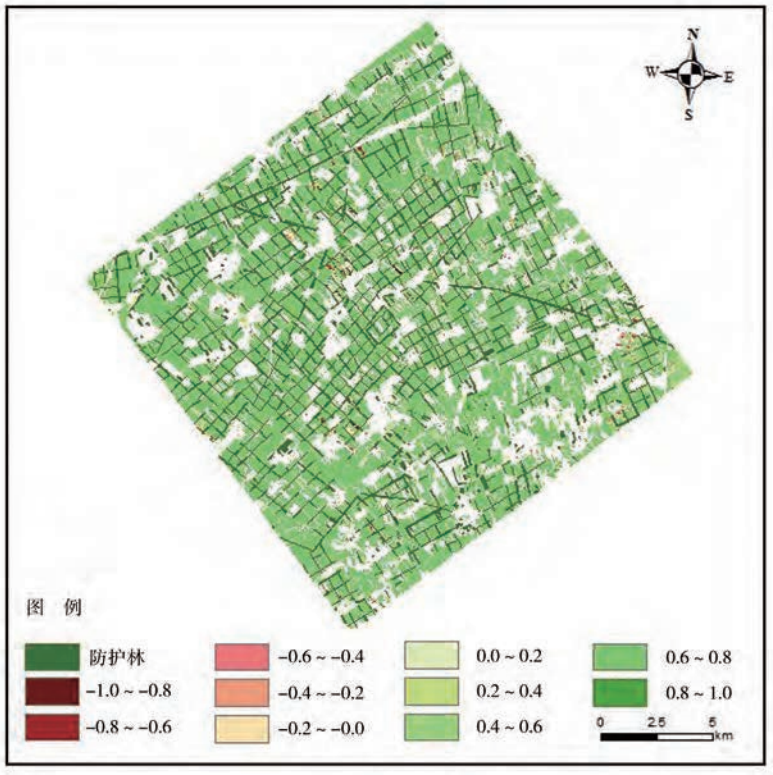


图 2　防护效应指数空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of the protective effect index

3.3 防护林空间结构参数对农田作物长势的影响

根据研究区林网分布情况,将研究区划分为 500 m × 500 m 样方,分别提取各样方的防护效应指数以及林带长度、林带宽度、树高和防护林密度。防护林空间结构参数与防护效应指数之间的 Pearson 相关分析结果如图 3 所示。

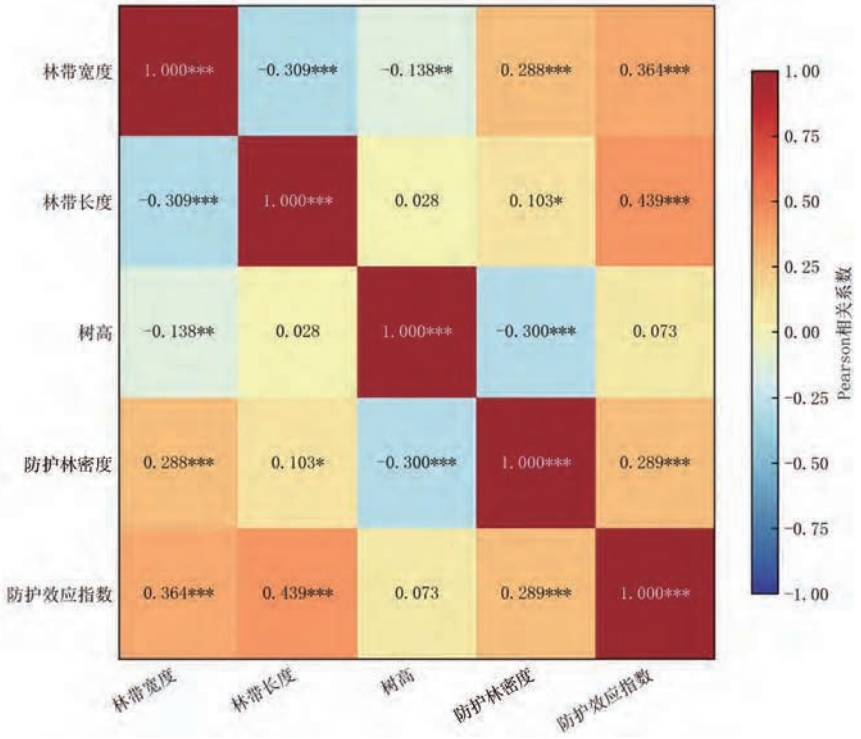


图 3　Pearson 相关性分析结果

Fig. 3　Results of Pearson correlation analysis

林带长度与防护效应指数的相关性最高，相关系数为 0.439；林带宽度和防护林密度与防护效应指数的相关系数分别为 0.364 和 0.289，三者均达到极显著水平（$P < 0.001$）。树高与防护效应指数的相关系数仅为 0.073，未达到显著水平。此外，林带宽度与林带长度呈极显著负相关（相关系数为−0.309），林带宽度与防护林密度呈极显著正相关（相关系数为 0.288），树高与防护林密度呈极显著负相关（相关系数为−0.300），表明各空间结构参数之间存在一定的相互制约关系。

分别以 4 项空间结构参数为自变量、防护效应指数为因变量进行线性拟合（见图 4）。各拟合直线的斜率均为正，但模型解释能力存在差异。林带长度模型的决定系数最高（R^2 = 0.193），其次为林带宽度（R^2 = 0.133）和防护林密度（R^2 = 0.083），树高模型的决定系数最低（R^2 = 0.005）。由于 4 项参数的量纲和取值范围不同，拟合斜率不宜直接用于比较作用强弱，主要依据相关系数和决定系数判断各参数与防护效应指数的关系。林带长度模型的线性关系相对较强，树高模型线性作用较弱。

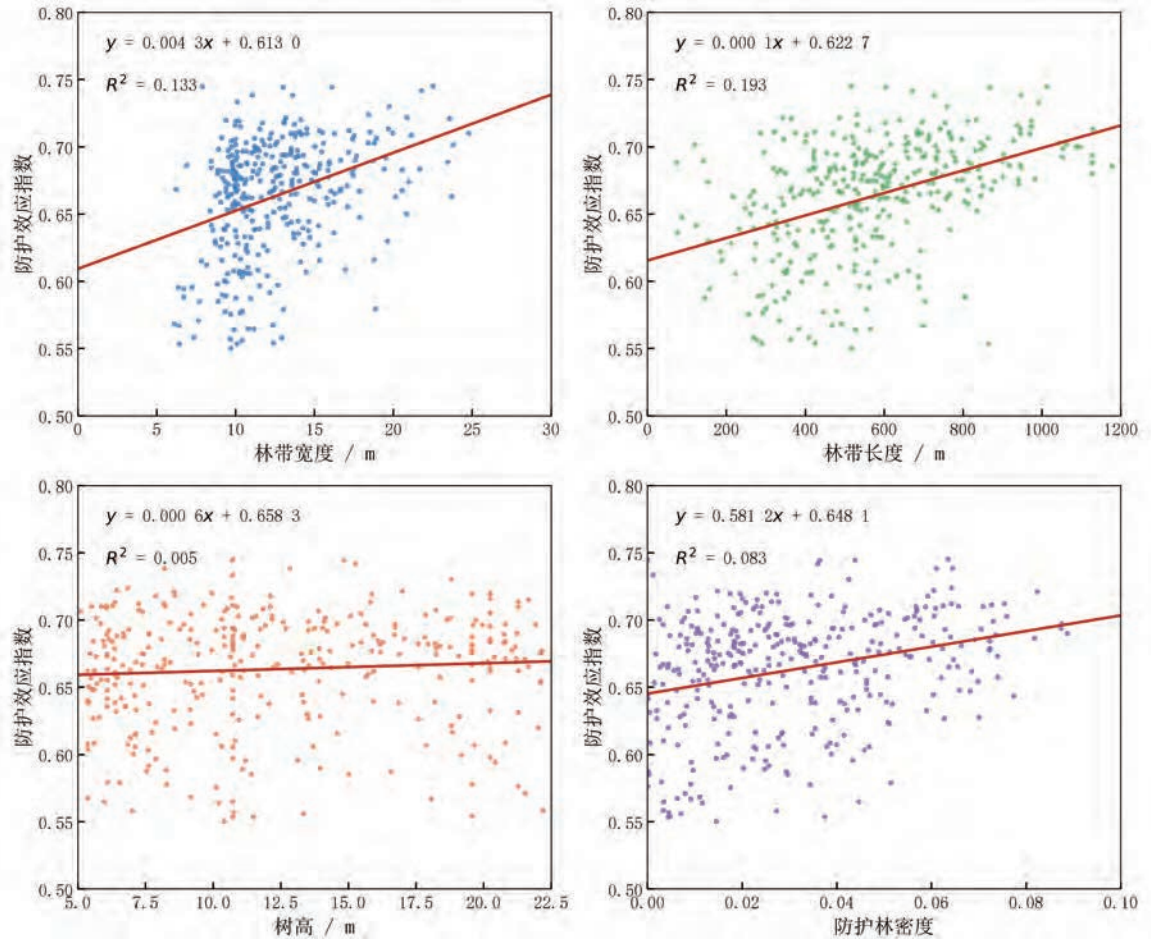


图 4　空间结构参数与防护效应指数的线性拟合关系

Fig. 4　Linear relationships between spatial structure parameters and the protective effect index

4 结论与讨论

本研究中农田防护林对玉米长势的影响具有明显的距离梯度。距林带 0~30 m 为负影响区，主要是由于农田与林木距离较近，林木遮阴以及林木根系对水分、养分的竞争抑制作物生长；30~330 m 为正影响区，该范围内林带通过降低风速、减少土壤水分蒸发和改善农田小气候，对玉米长势产生正向作用；330 m 以外作物 NDVI 趋于稳定，林带影响已不明显。以无影

响区 NDVI 均值 0.849 1 为基准构建防护效应指数后发现,研究区总体以中等正效应为主,较高指数斑块主要分布在林网较密集区域,负效应斑块则零散分布于近林缘和林网缺失地块。该指数以无影响区作物长势为参照,将防护林对作物的促进和抑制作用纳入同一评价尺度,能够较直观地反映防护效应的方向和程度。

林带结构与防护效应的关系上,林带长度、林带宽度和防护林密度与防护效应指数均呈极显著正相关,相关系数分别为 0.439、0.364 和 0.289,相应线性模型的决定系数分别为 0.193、0.133 和 0.083。林带长度与防护效应指数的关系最为密切,说明保持林带连续、减少林带端部和断裂形成的气流绕流对提高防护效果具有重要作用。适当增加林带宽度和防护林密度也有助于提高防风、保墒能力,但林带过宽或防护林密度过高可能扩大林带胁地区域,并加剧林木与作物之间以及林木个体之间的资源竞争。树高与防护效应指数的相关系数为 0.073,模型决定系数仅为 0.005,未表现出显著线性关系,这可能与研究区树高变异较小,以及高大林木的防风作用与遮阴、根系竞争等负效应相互抵消有关。因此,研究区防护林优化应优先考虑林带的连续性和完整性,在此基础上合理调控林带宽度和防护林密度,不宜单纯通过增加树高改善防护效果。

局限性方面需要指出的是,本研究仅分析了一个生长季的玉米 NDVI 数据,尚未充分考虑年际降水、大风变化、不同作物类型、林龄、树种组成及土壤条件的影响。本研究中的防护效应指数以 NDVI 为主要依据,不能完全替代作物产量及农田微气象观测。此外,相关分析和线性拟合反映的是变量之间的统计关系,仍需结合风速、土壤水分、光照和作物产量等连续观测进一步解释其作用过程。后续研究可通过多年、多作物和多林分类型数据检验防护效应指数的稳定性,并评估 330 m 距离阈值在不同区域和气候条件下的适用性。

参考文献

[1]李春平, 关文彬, 范志平, 等. 农田防护林生态系统结构研究进展[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 2037-2043.

[2]范志平, 曾德慧, 朱教君, 等. 农田防护林生态作用特征研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 130-133, 140.

[3]Ma Hui, Wu Bingfang, Tian Fuyou, et al. A deep learning-based framework for extracting spatial patterns of farmland shelterbelts in the three-north region of China using Sentinel-2 data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2026, 332: 115095.

[4]戴国琴, 褚卫东. 三北地区农田防护林资源现状分析与对策[J]. 林业资源管理, 2010(1): 27-32.

[5]杜鹤强, 韩致文, 颜长珍, 等. 西北防护林防风效应研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 117-120.

[6]李剑, 乔一娜, 任育欣, 等. 榆林沙区不同农田防护林配置模式防护效能[J]. 陕西林业科技, 2026, 54(2): 79-82, 92.

[7]付亚星, 王乐, 彭帅, 等. 河北坝上农田防护林防风效能及类型配置研究——以河北省康保县为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3): 279-283.

[8]周士威, 程致力, 尹洁芬. 林带防风效应的实验[J]. 林业科学, 1987, 23(1): 11-23.

[9]杨雨春, 赵珊珊, 包广道, 等. 吉林水田防护林防风效能及其影响因子分析[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(1): 132-136.

[10]李雪琳, 马彦军, 马瑞, 等. 不同带宽的防风固沙林流场结构及防风效能风洞实验[J]. 中国沙漠, 2018, 38(5): 936-944.

[11]于颖, 杨曦光, 范文义. 农田防护林防风效能的遥感评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 177-182.

[12]刘婷, 张大伟, 张忠辉, 等. 防护林空间密度分布与水土流失强度关系分析[J]. 吉林林业科技, 2018, 47(6): 15-18.

[13]包广道, 杨帆, 杨雨春, 等. 水田防护林空间密度对水田 NDVI 的影响分析[J]. 森林工程, 2015, 31(6): 126-129, 134.

(本篇专家编审:翟畅)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 005
文章编号:1005-7129(2026)06-0026-05 中图分类号:S757 文献标识码:A

基于层次分析法的珲春林业有限公司森林质量评价体系构建

王 忠[1], 杨军元[2], 相恒方[3], 付佳良[3], 李昕忆[4], 张 骁[4]
(1. 吉林省重点国有林技术服务中心, 吉林 长春 130022; 2. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022; 3. 珲春林业有限公司, 吉林 延边 133300; 4. 吉林省林业勘察设计研究院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为科学评价森林质量,以珲春林业有限公司 2020 年森林资源"一张图"数据库和 2017 年森林资源规划设计调查数据库为对象,选取 5 个约束层和 16 个指标层,基于层次分析法构建森林质量评价体系。一致性检验结果表明,约束层和各指标层判断矩阵均具有一致性,权重系数可用。约束层中森林生产力的权重系数最大(0. 336),是评价森林质量的主导因素。评价指标综合权重系数为单位面积蓄积量>平均树高>平均郁闭度>树种结构>健康等级=灾害等级>龄组结构=平均胸径>单位面积年均生长量=林木蓄积生长率>植被总盖度=下木盖度>林木蓄积枯损率>自然度>群落结构>森林覆被类型连片面积。珲春林业有限公司的森林质量指数平均值为 6. 261,森林质量等级整体评价为良。

关键词: 层次分析法;森林质量;珲春林业有限公司

Construction of Forest Quality Evaluation System for Hunchun Forestry Limited Company Based on Analytic Hierarchy Process

WANG Zhong[1], YANG Junyuan[2], XIANG Hengfang[3], FU Jialiang[3], LI Xinyi[4], ZHANG Xiao[4]
(1. Key State-owned Forest Technology Service Center of Jilin Province, Changchun 130022, China; 2. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China; 3. Hunchun Forestry Limited Company, Yanbian 133300, China; 4. Forest Survey and Design Institute of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate forest quality, the forest quality evaluation system for Hunchun Forestry Limited Company was constructed by using the analytic hierarchy process based on the one-map database of forest resource in 2020 and the forest resource planning and design survey database in 2017. Five constraint layers and 16 indicator layers were selected. The judgment matrices of the constraint layers and each indicator layer had past the consistency test, and the weight coefficients could be used. The forest productivity in the constraint layer was the dominant factor for evaluating forest quality. Its weight coefficient was 0. 336 that was the maximum. The comprehensive weight coefficients of the evaluation indicators were as follows: forest growing stock per unit area > average tree height > average crown density > tree species structure > health grade = disaster grade > age group structure = average stem diameter at breast height > average annual stock growth per unit area = stock growth rate > total coverage of vegetation = underwood coverage > mortality rate of trees > naturalness > community structure > forest cover type contiguous area. The average forest quality index of Hunchun

收稿日期:2026-07-23
第一作者:王忠(1969—),男,高级工程师,主要从事森林资源调查设计工作,E-mail:2210488517@ qq. com。

Forestry Limited Company was 6.261, and the overall evaluation of forest quality level was good.
Keywords: analytic hierarchy process; forest quality; Hunchun Forestry Limited Company

随着生态文明建设的不断推进,全面提升森林质量已经成为推动林业发展的重点任务。森林质量受森林生产力、森林健康稳定程度和林分状态等森林自身各项指标的影响[1],目前对森林质量的研究多见于森林质量评价、森林质量提升理论以及森林质量精准提升技术[2],科学合理地构建森林质量评价体系是精准评价森林质量的基础。

有的研究者直接利用《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)[3]的相关评价指标和权重进行森林质量评价[4],但该方法对评价指标权重的赋值缺乏一定的客观性。有的研究者运用统计学原理对评价指标进行权重赋值,采用层次分析方法、主成分分析法或物元分析法等构建森林质量评价体系[5-8],但上述研究在评价指标的选择和标准化方面仍显不足。

目前长白山重点国有林区尚无相关森林质量评价体系构建的研究,本文依据《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)进行指标的选择和赋值,采用熵值—层次分析法对评价指标进行权重赋值,旨在构建全面、科学、合理的森林质量评价体系,同时对吉林长白山森工珲春林业有限公司(以下简称珲春林业有限公司)乔木林地小班的森林质量进行评价,并依据其评价结果划分森林质量等级,为森林质量精准提升和森林可持续利用提供参考。

1 研究区概况

珲春林业有限公司位于吉林省东南部图们江下游地区的延边朝鲜族自治州内,地处中、朝、俄三国交界地带。辖区气候温和湿润,属温带海洋性气候,冬暖夏凉,年平均气温 5.65 ℃,8 月平均气温 21.2 ℃,年均降水量 617.9 mm,无霜期 140~160 d。森林资源丰富,乔木树种主要有蒙古栎(*Quercus mongolica*)、紫椴(*Tilia amurensis*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、色木槭(*Acer pictum* subsp. *mono*)、红松(*Pinus koraiensis*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)等,灌木主要有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、卫矛(*Euonymus alatus*)、珍珠梅(*Sorbaria sorbifolia*)等,草本主要有宽叶薹草(*Carex siderosticta*)、蚊子草(*Filipendula digitata*)、木贼(*Equisetum hyemale*)等。

2 研究方法

2.1 数据来源

数据来源于珲春林业有限公司 2020 年森林资源“一张图”数据库和 2017 年森林资源规划设计调查数据库,共 20 个生产单位(林场、经营区、营林站等),包含 1 886 个林班,32 255 个小班。

2.2 森林质量评价体系

根据《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)与珲春林业有限公司的森林资源数据库特性,选择森林覆盖(B_1)、森林结构(B_2)、森林生产力(B_3)、森林健康(B_4)、森林受干扰程度(B_5)5 个约束层,选择 16 个评价指标作为指标层,构建森林质量评价体系。其中,B_1 的指标层有植被总盖度(C_1)、下木盖度(C_2)、平均郁闭度(C_3),B_2 的指标层有树种结构(C_4)、平均胸径(C_5)、群落结构(C_6)、龄组结构(C_7),B_3 的指标层有单位面积年均生长量(C_8)、单位面积蓄积量(C_9)、林木蓄积生长率(C_{10})、平均树高(C_{11}),B_4 的指标层有健康等级(C_{12})、灾害等级(C_{13})、林木蓄积枯损率(C_{14}),B_5 的指标层有自然度(C_{15})、森林覆被类型连片面积(C_{16})。

2.3 评价指标赋值

根据《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)对 16 个评价指标数量化和等级划分后按照 1~10 分的分值进行赋值。

2.4 评价指标权重系数

采用熵值—层次分析法分别对森林质量评价体系中的约束层和指标层进行权重赋值。按照《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)中对约束层各项指标的权重设定及其在森林质量评估中的关键性,建立判断矩阵 R。计算约束层各个指标的初始权重系数 W_i',进行规范化处理得出各指标的权重系数 W_i,计算判断矩阵的最大特征值 β_{max}、

一致性指标 CI，经过一致性验证得到 CR 值。若 CR 小于 0.1，则表示评判矩阵内各指标间具有良好的一致性，生成的权重系数有效；反之，则需重新调整该过程。之后运用熵值法对层次分析法确定的权重进行修正。对已构造的判断矩阵 R 进行归一化处理，得到 x_{ij} 组成的标准矩阵 R′，计算各指标的输出熵 e_j、差异系数 g_j、各指标熵值权重 Q_i、修正后的各指标权重 S_i。根据各约束层权重系数与各约束层下指标层的权重系数之积计算各指标的综合权重 A_i。具体公式如下。

$$W_i' = \sqrt[m]{a_1 a_2 \ldots a_m}$$

$$W_i = \frac{W_i'}{\sum_{i=1}^{m} W_i'}$$

$$\beta_{max} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left[\frac{\sum_{j=1}^{m}(a_{ij}W_j)}{W_i}\right]$$

$$CI = \frac{\beta_{max} - m}{m - 1}$$

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} a_{ij}}$$

$$e_j = -\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}(x_{ij}\ln x_{ij})$$

$$g_j = 1 - e_j$$

$$Q_i = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^{m} g_j}$$

$$S_i = \frac{Q_i W_i}{\sum_{i=1}^{m}(Q_i W_i)}$$

式中：m 为判断矩阵的阶数；a_{ij} 为判断矩阵内的各个数值；x_{ij} 为标准矩阵中的对应元素；i、j 分别为矩阵的行与列；RI 为平均随机一致性指标。

2.5 森林质量等级

对珲春林业有限公司所有的乔木林小班森林质量指数进行计算，并划分等级，构建森林质量评价数据库。森林质量指数计算公式如下。

$$EEQ = \sum_{i=1}^{n}(V_i A_i)$$

式中：EEQ 为森林质量指数；V_i 为第 i 个评价指标评分值(0~10)；A_i 为第 i 个评价指标的权重；n 为指标总数。基于森林质量指数森林被划分为四个等级，优($EEQ \geqslant 7$)、良($6 \leqslant EEQ < 7$)、中($5 \leqslant EEQ < 6$)、差($EEQ < 5$)。

2.6 数据处理

采用 Excel 2019 整理数据并计算森林质量等级。

3 结果与分析

3.1 评价指标赋值

森林质量评价体系各指标评分值如表 1 所示，16 个指标评分值为 2.0~9.6，其中林木蓄积枯损率的平均值最大，单位面积年均生长量的平均值最小。珲春林业有限公司中的小班多为天然林，受人为干扰的程度较小，几乎没有发生过森林灾害，过熟林较少，因此林木蓄积枯损率比较低，该指标评分较高。该区域的林木多为慢针、中针、慢阔或中阔，相较于南方地区的速生树种，其单位面积年均生长量较低(小于 8 $m^3 \cdot hm^{-2}$)，因此该指标的评分较低。珲春林业有限公司的健康等级和灾害等级的评分较高，说明其小班多处于健康无灾害的状态。

表 1　森林质量评价体系指标分值

Tab. 1　Scores of forest quality evaluation system indicators

约束层	指标层	最大值	最小值	平均值
森林覆盖(B_1)	植被总盖度(C_1)	10	4	8.3
	下木盖度(C_2)	10	3	7.3
	平均郁闭度(C_3)	8	4	6.8

表 1(续)

约束层	指标层	最大值	最小值	平均值
森林结构(B_2)	树种结构(C_4)	10	2	7.7
	平均胸径(C_5)	10	1	4.6
	群落结构(C_6)	9	3	7.7
	龄组结构(C_7)	10	2	6.5
森林生产力(B_3)	单位面积年均生长量(C_8)	9	1	2.0
	单位面积蓄积量(C_9)	10	1	6.3
	林木蓄积生长率(C_{10})	10	1	2.5
	平均树高(C_{11})	10	1	6.3
森林健康(B_4)	健康等级(C_{12})	9	7	8.9
	灾害等级(C_{13})	9	9	9.0
	林木蓄积枯损率(C_{14})	10	7	9.6
森林受干扰程度(B_5)	自然度(C_{15})	8	4	6.5
	森林覆被类型连片面积(C_{16})	9	1	3.8

3.2 评价指标综合权重

通过层次分析法计算的各约束层权重系数经一致性检验得出 *CR* 为 0.014 9,表明约束层的判断矩阵具有一致性,判断矩阵有效,权重参数可用。通过层次分析法计算的 B_1、B_2、B_3、B_4 各约束层下的指标层权重系数经一致性检验得出 *CR* 分别为0.049 6、0.015 5、0.018 2、0.049 6,表明各约束层下的指标层判断矩阵具有一致性,判断矩阵有效,权重参数可用。由于 B_5 只有两个指标,因此不利用熵值—层次分析法进行权重赋值,仍采用《森林资源连续清查技术规程》(GB/T 38590—2020)中的权重,即 C_{15}、C_{16} 的权重系数分别为 0.6、0.4。约束层权重系数、指标层权重系数及评价指标综合权重系数如表 2 所示,约束层的权重系数为 $B_3 > B_2 > B_1 > B_4 > B_5$,$B_1$ 各指标层的权重系数为 $C_3 > C_1 = C_2$,B_2 各指标层的权重系数为 $C_4 > C_7 = C_5 > C_6$,B_3 各指标层的权重系数为 $C_9 > C_{11} > C_8 = C_{10}$,$B_4$ 各指标层的权重系数为 $C_{12} = C_{13} > C_{14}$。16 个评价指标的综合权重系数为 0.026~0.144,$C_9 > C_{11} > C_3 > C_4 > C_{12} = C_{13} > C_7 = C_5 > C_8 = C_{10} > C_1 = C_2 > C_{14} > C_{15} > C_6 > C_{16}$。

表 2 森林质量评价体系指标综合权重

Tab. 2 Weights of forest quality evaluation system indicators

约束层	指标层	约束层权重系数	指标层权重系数	综合权重系数
森林生产力(B_3)	单位面积蓄积量(C_9)	0.336	0.428	0.144
	平均树高(C_{11})	0.336	0.290	0.097
	单位面积年均生长量(C_8)	0.336	0.141	0.047
	林木蓄积生长率(C_{10})	0.336	0.141	0.047
森林结构(B_2)	树种结构(C_4)	0.221	0.389	0.086
	龄组结构(C_7)	0.221	0.245	0.054
	平均胸径(C_5)	0.221	0.245	0.054
	群落结构(C_6)	0.221	0.121	0.027

表 2(续)

约束层	指标层	约束层权重系数	指标层权重系数	综合权重系数
森林健康(B_4)	健康等级(C_{12})	0.201	0.400	0.080
	灾害等级(C_{13})	0.201	0.400	0.080
	林木蓄积枯损率(C_{14})	0.201	0.200	0.040
森林覆盖(B_1)	平均郁闭度(C_3)	0.177	0.500	0.089
	植被总盖度(C_1)	0.177	0.250	0.044
	下木盖度(C_2)	0.177	0.250	0.044
森林受干扰程度(B_5)	自然度(C_{15})	0.065	0.600	0.039
	森林覆被类型连片面积(C_{16})	0.065	0.400	0.026

3.3 评价结果

根据构建的森林质量评价体系,珲春林业有限公司的森林质量指数平均值为 6.261,森林质量等级整体评价为良。该区域乔木林地的小班总数量为 32 255 个,其中森林质量等级为优、良、中、差的小班数量分别为 13 000 个、13 351 个、4 495 个、1 409 个,占比分别为 40.3 %、41.4 %、13.9 %和 4.4 %。珲春林业有限公司森林质量等级为优或良的小班数量占比高达 81.7 %,说明森林质量整体较好。

4 结论与讨论

森林质量评价体系主要用于划分森林质量等级,对于制定科学合理、针对性强的森林经营策略和实现森林质量精确提升具有重要意义[9, 10]。层次分析法将复杂的评价指标层次化,通过逐层比较各种影响因素的重要性为最终的权重赋值提供定量依据[11]。刘成杰等[12]对烟台市森林质量进行评价研究,结果表明平均胸径、平均树高、树种结构综合权重最大,占总权重的 0.618 1,是评价森林质量的重要因子。于玲等[13]基于因子分析与聚类分析对北京市京西林场的森林质量进行评价,准则层的权重值为林木生长因子>林分结构因子>林下植被因子,表明林木生长因子影响最大。本文利用层次分析法确定森林质量评价体系中的约束层和各指标层的权重系数,一致性检验结果表明约束层和各指标层判断矩阵均具有一致性,判断矩阵有效,权重系数可用。利用熵值法进一步对层次分析法确定的权重进行修正,构建了森林质量评价体系。约束层中森林生产力的权重系数最大(0.336),说明森林生产力是评价森林质量的主导因素,评价指标综合权重系数为单位面积蓄积量>平均树高>平均郁闭度>树种结构>健康等级=灾害等级>龄组结构=平均胸径>单位面积年均生长量=林木蓄积生长率>植被总盖度=下木盖度>林木蓄积枯损率>自然度>群落结构>森林覆被类型连片面积,与已有研究结果相似。

根据构建的森林质量评价体系,珲春林业有限公司的森林质量指数平均值为 6.261,森林质量等级整体评价为良。森林质量等级为优、良、中、差的小班数量占比分别为 40.3 %、41.4 %、13.9 %和 4.4 %。已有研究表明,九峰国家森林公园的森林质量总体较好,66.7 %的标准地质量处于中上水平[14];永定河流域森林资源质量评价指数为 0.842 6,评价等级为好,整体质量良好[15];烟台市森林质量集中分布在“一般”和“较差”等级,分别占总样地的 36.67 %和 26.66 %[12];肇庆市高要区整体森林质量指数为 0.53,森林质量处于中等水平[16]。本研究区属于重点国有林区,森林管护较为严格,人为活动较少,森林质量较好,与森林公园等的评价结果相似,而其他研究对象人为活动较多,不仅直接影响森林的群落结构和自然度,还间接影响森林健康和下木盖度等,森林质量一般。

本文建立了珲春林业有限公司森林质量评价体系,对其乔木林地小班的森林质量进行了评价,并依据森林质量评价结果进行了质量等级划分,为下一步确定森林经营策略提供了依据。(下转第 38 页)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 006
文章编号:1005-7129(2026)06-0031-08 中图分类号:S476. 15 文献标识码:A

吉林省榛树林昆虫病原线虫多样性与优良品系筛选

修冬莹[1], 逄春晓[2], 张英楠[3], 张利建[3], 李兴鹏[2], 陈越渠[1]
(1. 吉林省林业科学研究院, 吉林 长春 130033; 2. 北华大学林学院, 吉林 吉林 132000; 3. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 为探究吉林省榛树林昆虫病原线虫资源的分布特征,在吉林省 19 个样点的榛树林内进行土壤采样,采用大蜡螟(*Galleria mellonella*)诱集法分离纯化昆虫病原线虫,以 ITS 和 28S 基因测序进行分类鉴定。以榛实象甲(*Curculio dieckmanni*)3 龄幼虫为靶标,对可稳定扩繁的线虫进行侵染力测定,再对侵染力较高的线虫进行繁殖力测定,筛选出对榛实象甲具有防治潜力的优良品系。共分离鉴定出 15 种昆虫病原线虫,区域分布特征明显,其中 *Steinernema* 属为优势类群(80. 00 %),*Heterorhabditis megidis* 的分布最广(94. 74 %)。8 种昆虫病原线虫可稳定扩繁,其中 4 种对榛实象甲 3 龄幼虫的校正死亡率较高,*S. ceratophorum* 侵染力最优(75. 47 %),*S. affine* 的繁殖力最高(30 493. 00 IJs),综合评价显示 *S. ceratophorum* 得分最高。本研究可为吉林省榛实象甲的防控提供新的生防因子。

关键词: 吉林省;榛树林;昆虫病原线虫;区域分布;优良品系

Diversity and Superior Strain Screening of Entomopathogenic Nematodes in Hazel Forests in Jilin Province

XIU Dongying[1], PANG Chunxiao[2], ZHANG Yingnan[3], ZHANG Lijian[3], LI Xingpeng[2], CHEN Yuequ[1]
(1. Jilin Privincial Academy of Forestry Sciences, Changchun 130033, China; 2. Forestry College of Beihua University, Jilin 132000, China; 3. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to explore the distribution characteristics of entomopathogenic nematode resources in hazel forests in Jilin Province, soil samples were collected from artificial and natural hazel forests at 19 locations in Jilin Province. Entomopathogenic nematodes were isolated and purified by *Galleria mellonella* trapping method. Species identification was performed via ITS and 28S gene sequencing. For stably propagable entomopathogenic nematodes, their infectivity against the 3rd-instar larvae of *Curculio dieckmanni* were determined. The reproductive capacity of species with high infectivity was determined to screen out the promising strain for controlling *C. dieckmanni*. The total of 15 species of entomopathogenic nematodes were isolated and identified, exhibiting distinct regional distribution patterns. The genus *Steinernema* constituted the dominant group (80. 00 %), and *Heterorhabditis megidis* had the widest distribution (94. 74 %). Eight entomopathogenic nematode species could be stably propagated. Among them, four species produced high corrected mortality rate against the 3rd-instar larvae of *C. dieckmanni*. *Steinernema ceratophorum* exhibited the optimal infectivity (75. 47 %), while *S. affine* had the highest reproductive capacity (30 493. 00 IJs). Comprehensive evaluation indicated that *S. ceratophorum* achieved the highest score. This study could provide new biocontrol factors for the prevention and control of *C. dieckmanni*

收稿日期:2026-07-15
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:陈越渠(1979—),男,研究员,主要从事森林保护研究工作,E-mail:fungi3@ 126. com。

in Jilin Province.

Keywords: Jilin Province; hazel forest; entomopathogenic nematode; regional distribution; superior strain

榛属(*Corylus*)植物是兼具营养与经济价值的木本粮油树种,全球范围内约有 20 种,主要分布于亚洲、欧洲及北美洲[1]。我国榛属植物资源丰富,分布广泛,吉林省是重要产区之一[2]。近年来,榛树种植面积持续扩大,病虫害问题日益凸显,榛实象甲(*Curculio dieckmanni*)是危害榛子种实的主要害虫之一[3],严重影响了榛子产业的经济效益。目前,榛实象甲的防治仍依赖化学农药,虽然能在短期内有效控制虫口密度,但长期施用易造成农药残留[4]、害虫抗药性增强及生态环境破坏等一系列问题,与绿色发展理念相悖,不利于榛树产业的可持续高质量发展。

昆虫病原线虫是一类高效生防天敌资源,其侵染期幼虫可主动搜寻寄主,通过共生细菌致死靶标害虫,具有环境友好、非靶标安全和易规模化扩繁等优势,常用的主要有斯氏线虫科(Steinernematidae)和异小杆线虫科(Heterorhabditidae)的一部分线虫[5]。当前,昆虫病原线虫已广泛用于防治农林、牧草等领域的害虫[6-9]。近年来,在我国辽宁、山东和甘肃等地区陆续开展了昆虫病原线虫资源调查[10-13],但关于吉林省榛树林生态系统中的昆虫病原线虫组成、分布规律及种群特征尚未明确。昆虫病原线虫的防控效能与其种类多样性、地理适应性密切相关,不同区域和生境下的线虫群落结构存在显著差异,且不同品系的线虫在致病力、繁殖力等关键生物学性状方面表现各异[14, 15]。本研究以吉林省榛树林的昆虫病原线虫为研究对象,系统开展多样性调查,明确其种类组成与分布特征,以榛树林主要害虫榛实象甲为重点防治对象,筛选兼具高繁殖力与致病力的优良品系,旨在为榛实象甲绿色防控提供优质生物防治资源,推动榛树产业与生态环境的可持续发展。

1 试验方法

1.1 昆虫病原线虫采集与分离

1.1.1 土壤样品采集

2023 年 4—9 月,在吉林省 19 个样点(见表 1)的榛树林内进行土壤采样,每个样点随机选取 5 棵榛树,于树冠投影区按东南西北 4 个方位,用直径 5 cm 土钻分别采集 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层土壤。

表 1 土壤样品采集地点信息

Tab. 1 Soil sample collection locations

编号	采集地点	地理位置	林分类型
C1	白城市洮北区	122°50′ E、45°38′ N	人工林
C2	松原市宁江区	124°49′ E、45°08′ N	人工林
C3	四平市铁西区	124°22′ E、43°10′ N	人工林 天然林
C4	四平市伊通满族自治县	125°18′ E、43°21′ N	人工林、天然林
C5	长春市公主岭市	124°49′ E、43°31′ N	人工林
C6	长春市南关区	125°20′ E、43°53′ N	人工林
C7	吉林市磐石市	126°03′ E、42°57′ N	天然林
C8	吉林市永吉县	126°30′ E、43°40′ N	人工林
C9	吉林市船营区	126°33′ E、43°52′ N	人工林
C10	吉林市桦甸市	126°44′ E、42°58′ N	人工林、天然林
C11	吉林市蛟河市	127°20′ E、43°43′ N	天然林
C12	吉林市舒兰市	126°57′ E、44°24′ N	人工林
C13	通化市柳河县	125°44′ E、42°17′ N	天然林

表 1(续)

编号	采集地点	地理位置	林分类型
C14	通化市东昌区	125°57′ E、41°43′ N	人工林
C15	白山市临江市	126°55′ E、41°49′ N	天然林
C16	白山市浑江区	126°25′ E、41°56′ N	人工林
C17	白山市抚松县	128°06′ E、42°39′ N	人工林、天然林
C18	延边朝鲜族自治州龙井市	129°26′ E、42°46′ N	人工林
C19	延边朝鲜族自治州汪清县	129°46′ E、43°19′ N	人工林

1.1.2 线虫分离与纯化培养

参照大蜡螟(*Galleria mellonella*)诱集法分离土壤中的昆虫病原线虫[16]。将每个样点采集的土样混匀,称取 200 g 装入 500 mL 无菌塑料瓶,每瓶接入 8 头体重 0.3~0.5 g 的大蜡螟老龄幼虫(购自天津惠裕德生物科技有限公司),室温(25±3)℃,土壤湿度 80 %,培养 7 d,每 12 h 翻转瓶身 1 次,保证大蜡螟与线虫均匀接触,48 h 后每日记录大蜡螟侵染情况,之后采用 White trap 法[17]诱集纯化线虫(见图 1)。





图 1 线虫的分离和纯化

Fig. 1 Isolation and purification of entomopathogenic nematodes

1.2 昆虫病原线虫分子鉴定

1.2.1 线虫 DNA 提取

采用 TIANGEN 微量样品基因组 DNA 提取试剂盒(DP316),依据说明书中的操作方法提取线虫 DNA。

1.2.2 PCR 扩增与测序

使用 ITS、28S 基因的保守区 D2-D3 进行线虫的分子鉴定[18],PCR 引物由吉林省库美生物科技有限公司合成,引物序列如表 2 所示。

扩增程序:94 ℃预变性 5 min,94 ℃变性 15 s,55 ℃退火 15 s,72 ℃延伸 1 min,35 个循环,72 ℃延伸 10 min。

扩增体系:酶预混液(诺唯赞 P112)12.5 μL;基因组 DNA 1 μL;引物 F 1 μL,引物 R 1 μL,无菌 dd H_2O 定容至 25 μL。

PCR 产物经 1.5 %琼脂糖凝胶电泳,1×TAE 作电泳缓冲液,在电压 120 V 下运行 20 min,将正确目的片段大小的条带进行切胶回收。

表 2 引物序列

Tab. 2 Primer sequences

引物	序列
ITS rDNA 正向引物 TW81	5′-GTTTCCGTAGGTGAACCTGC-3′
ITS rDNA 反向引物 AB28	5′-ATATGCTTAAGTTCAGCGGGT-3′
D2-D3 基因上游引物 28S-F	5′-AGCGGAGGAAAAGAAACTAA-3′
D2-D3 基因下游引物 28S-R	5′-TCGGAAGGAACCAGCTACTA-3′

1.2.3 序列分析

将回收的 PCR 产物送至吉林省库美生物科技有限公司进行双向测序。所得序列在 NCBI 数据库中进行 Blast 比对,序列比对后基于最大似然法,使用 MEGA 11 软件构建系统发育树,采用自举检验评估分支置信度,确定分离纯化获得的线虫分类地位。

1.3 优良线虫品系筛选

1.3.1 侵染力测定

对采集土壤中分离的昆虫病原线虫进行扩繁,选取利用大蜡螟幼虫成功稳定扩繁的昆虫病原线虫侵染榛实象甲 3 龄幼虫(采集于舒兰市榛子园)以测定侵染力(以榛实象甲幼虫的校正死亡率表征)。首先用无菌水配制 500 IJs · mL^{-1} 的线虫悬浮液,之后在试管中注入 1 mL 悬浮液并放入 1 头榛实象甲幼虫,设置无菌水为空白对照,重复 15 次,25 ℃恒温培养,间隔 24 h 观察并记录幼虫死亡数量,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/%。

1.3.2 繁殖力测定

采用 Dutky 滤纸法[19] 对侵染力较高的昆虫病原线虫进行繁殖力测定。以 1 000 IJs 的剂量侵染 1 头大蜡螟老龄幼虫,10 头幼虫为一组,每种线虫设 6 组重复,25 ℃恒温培养,确认死亡后将虫尸转入 White trap 装置,持续收集子代侵染期线虫 3 周,采用稀释计数法测定各重复组线虫总数,以单头宿主幼虫产出侵染期线虫数量表征线虫的繁殖力。

1.3.3 应用潜力评价

对侵染力较高且繁殖力较强的昆虫病原线虫进行应用潜力评价,将线虫的侵染力和繁殖力数据分别进行总和归一化处理,分别赋予 50 %的权重,计算综合得分。

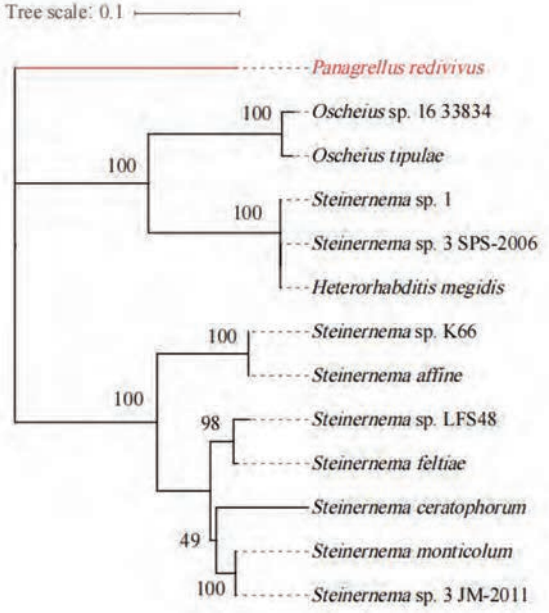
1.4 数据处理与分析

采用 Excel 2024 软件对数据进行统计与整理,使用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件进行单因素方差分析和邓肯新复极差法多重比较检验($P < 0.05$),使用 Graphpad Prism 10 和 R Studio 2025 绘制图表,使用 MEGA 11 软件构建系统发育树。

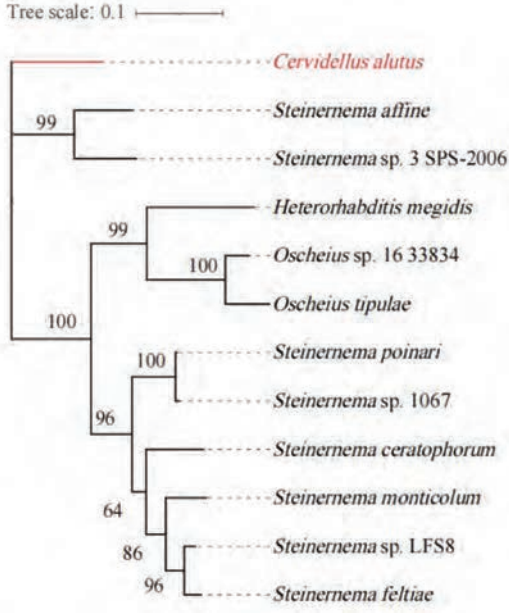
2 结果与分析

2.1 吉林省榛树林昆虫病原线虫种类多样性

试验共鉴定出 15 种昆虫病原线虫,系统发育树如图 2 所示。*Steinernema* 属 12 种,占总种类的 80.00 %;*Oscheius* 属 2 种,占 13.33 %;*Heterorhabditis* 属 1 种,占 6.67 %。



28s 基因系统发育树



ITS 基因系统发育树

注:图中标记为红色的物种是构建系统发育树所使用的外群。

图 2 基于 28S 和 ITS 构建的昆虫病原线虫系统发育树

Fig. 2 Phylogenetic tree of entomopathogenic nematodes based on 28S and ITS sequences

2.2 昆虫病原线虫区域分布特征

吉林省榛树林昆虫病原线虫的区域分布特征及种类相似性如图 3 所示。15 种昆虫病原线虫中，*H. megidis* 出现的频率最高，在 18 个样点出现，覆盖率达 94.74 %；其次是 *S. affine* 和 *S. feltiae*，分别在 12 个和 11 个样点出现，覆盖率为 63.16 % 和 57.89 %。而 *Steinernema* sp. LFS8 和 *Steinernema* sp. LFS48 均只在 C1 一个样点出现，覆盖率仅 5.26 %。另外可以看出线虫种类的分布和地区具有较高的一致性，地理邻近性明显，相邻地区往往具有相似的线虫分布，如同属长春市的 C5 和 C6。

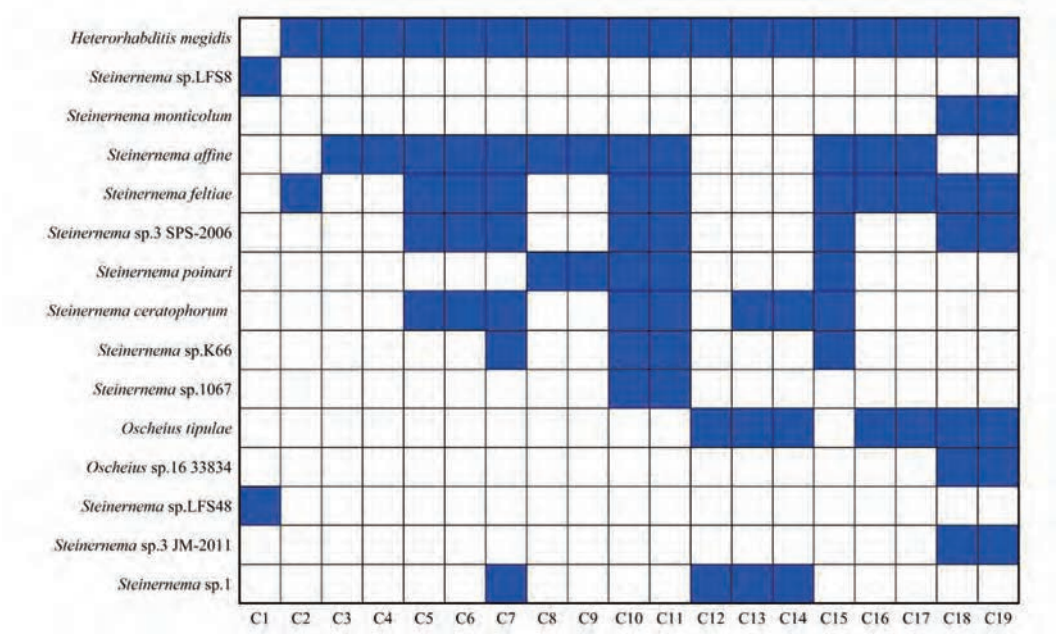
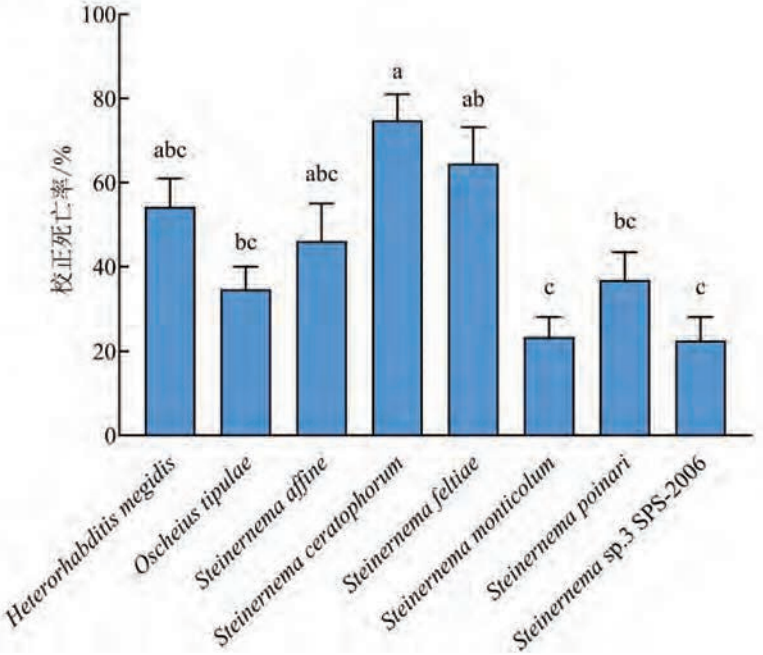


图 3　线虫种类区域分布

Fig. 3　Regional distribution of entomopathogenic nematode species

2.3 不同种类昆虫病原线虫侵染力的差异

15 种昆虫病原线虫中有 8 种成功稳定扩繁，侵染力试验结果（榛实象甲幼虫校正死亡率）如图 4 所示。



注：图中不同小写字母表示各线虫间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 4　不同种类昆虫病原线虫对榛实象甲的侵染力

Fig. 4　Infectivity of different entomopathogenic nematode species against *Curculio dieckmanni*

结果表明，*S. ceratophorum* 处理组榛实象甲校正死亡率最高(75.47 %)，*S. feltiae* 处理组校正死亡率次之，二者差异不显著。*H. megidis*、*S. affine* 处理组校正死亡率处于中等水平，与其他处理组均无显著差异。*S. monticolum* 处理组校正死亡率最低，显著低于 *S. ceratophorum*、*S. feltiae* 处理组。

2.4 不同种类昆虫病原线虫繁殖力的比较分析

侵染力较高的 4 种昆虫病原线虫繁殖力测定结果(单头宿主幼虫产出侵染期幼虫数量)如图 5 所示，*S. affine* 繁殖力最高(30 493.00 IJs)，与 *S. ceratophorum* 和 *H. megidis* 差异不显著，*S. feltiae* 繁殖力最低，显著低于 *S. affine* 和 *S. ceratophorum*。

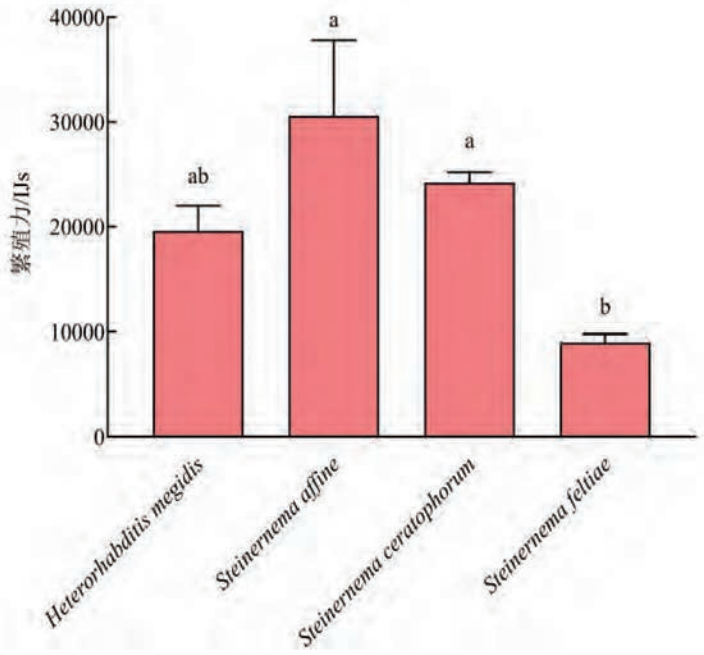


图 5　不同种类昆虫病原线虫的繁殖力

Fig. 5　Reproductive capacity of different entomopathogenic nematode species

2.5 昆虫病原线虫的应用潜力评价

侵染力较高且繁殖力较强的 3 种昆虫病原线虫的综合得分如表 3 所示，其中 *S. ceratophorum* 得分最高(37.63)，其次为 *S. affine*(33.72)，*H. megidis* 得分最少(28.65)。综合侵染力和繁殖力，*S. ceratophorum* 应用潜力最大。

表 3　昆虫病原线虫应用潜力评价

Tab. 3　Evaluation on application potential of entomopathogenic nematodes

线虫种类	侵染力/%	繁殖力/IJs	综合得分
H. megidis	54.79	19 499.33	28.65
S. affine	46.45	30 493.00	33.72
S. ceratophorum	75.47	24 117.50	37.63

3 结论与讨论

吉林省整体地势呈现由东南向西北倾斜[20]，以大黑山为界分为东部山地和西部平原两大地貌。气候属于温带大陆性季风气候，从东南向西北由湿润气候过渡到半湿润气候再到半干旱气候，东部地区雨量丰沛。昆虫病原线虫的种类多样性与地理分布特征往往受海拔高度、气候条件、土壤质地及生境类型等多重环境因子的综合调控[21, 22]，吉林省独特的地貌与气候条件为昆虫病原线虫提供了多样化的生境基础。

本研究在吉林省 19 个采集点榛树人工林与天然林进行土壤采样，对土壤样本中的昆虫病原线虫进行分离、鉴定。结果表明，吉林省榛树林昆虫病原线虫种类多样性较高。共鉴定出 15 种昆虫病原线虫，其中斯氏线虫属(*Stein-*

ernema)占据绝对优势,共发现 12 种,与我国北方其他区域的调查结果基本一致[10, 12],这一优势分布可能与区域内生境异质性及关键环境因子的空间分异密切相关,表明该属线虫对榛树林生境适应性较强。

线虫种类区域分布分析显示,*H. megidis* 出现的频率最高,在 18 个地区出现,覆盖率达 94.74 %。昆虫病原线虫群落显著分化为东部山地与西部平原两大支系,而西部地区的白城市则单独聚类,这一空间格局与吉林省的地貌与气候差异高度吻合,清晰揭示了昆虫病原线虫分布的"地形—生境"驱动机制。

8 种可稳定扩繁的昆虫病原线虫侵染力测定结果显示,*S. ceratophorum*、*S. feltiae*、*H. megidis* 和 *S. affine* 这 4 种线虫的侵染力高于其他种类,榛实象甲校正死亡率较高,其中 *S. ceratophorum* 可达 75.47 %,印证了斯氏线虫属(*Steinernema*)对鞘翅目(Coleoptera)害虫的高致病力[23, 24]。对上述 4 种线虫进行繁殖力测定,产出的侵染期幼虫数量与 Dutky 等[20]建立的经典活体扩繁方法相当,显示出良好的规模化扩繁潜力,*S. affine* 繁殖力最高,单头大蜡螟产出侵染期幼虫 30 493.00 IJs,与 *S. ceratophorum* 和 *H. megidis* 差异不显著。对这 3 种线虫的侵染力和繁殖力进行双权重评价,*S. ceratophorum* 的侵染力(75.47 %)与繁殖力(24 117.50 IJs)表现更加均衡,综合得分最高(37.63),兼顾生防效能与实际应用可行性,适合作为吉林省榛实象甲的生物防治资源。本研究可为后续林间应用提供科学依据。

参考文献

[1]马庆华, 王贵禧, 梁维坚, 等. 我国榛属植物种质资源的研究、利用与创新[J]. 果树学报, 2013, 30(1): 159-164.

[2]霍宏亮, 马庆华, 李京璟, 等. 中国榛属植物种质资源分布格局及其适生区气候评价[J]. 植物遗传资源学报, 2016, 17(5): 801-808.

[3]刘楠, 王琪, 高宇, 等. 榛实象形态特征、生物学特性及危害特点[J]. 林业科技, 2023, 48(3): 3841.

[4]张兴政, 李欣宇, 程云清, 等. 榛子中的杀虫剂残留 GC-MS 检测与膳食风险评估[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 213-219.

[5]Koppenhöfer A M, Shapiro-Ilan D I, Hiltpold I. Entomopathogenic nematodes in sustainable food production[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2020, 4: 125.

[6]丁倩. 昆虫病原线虫与农用植物油对目标害虫的协同防控效果[D]. 广州: 仲恺农业工程学院, 2024: 58-59.

[7]Bhat A H, Machado R A R, Abolafia J, et al. Multigene sequence-based and phenotypic characterization reveals the occurrence of a novel entomopathogenic nematode species, *Steinernema anantnagense* n. sp.[J]. *Journal of Nematology*, 2023, 55(1): 771-776.

[8]Daramola F Y, Osemwegie O O, Owa S O, et al. Isolation and molecular characterization of entomopathogenic nematode, *Heterorhabditis* sp. from an arable land in Nigeria[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2021, 20(10): 2706-2715.

[9]白海涛, 徐成体. 利用昆虫病原线虫防治青海草原毛虫的研究[J]. 青海畜牧兽医杂志, 2018, 48(2): 60-63.

[10]Wang Huan, Luan Junbo, Dong Hui, et al. Natural occurrence of entomopathogenic nematodes in Liaoning (Northeast China)[J]. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 2014, 17(3): 399-406.

[11]张红玉. 昆虫病原线虫优良品系的筛选及生物学特性分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016: 29-32.

[12]王思雨. 华北北部地区昆虫病原线虫资源调查及优良品系筛选[D]. 北京: 中国农业科学院, 2022: 37-38.

[13]刘佳, 薛银霞, 臧建成, 等. 甘肃省昆虫病原线虫资源补充调查及对草地贪夜蛾高致病力线虫品系筛选[J]. 昆虫学报, 2025, 68(4): 432-449.

[14]王杰, 戴康, 孔祥鑫, 等. 昆虫病原线虫与环境生物、非生物因素关系的研究进展[J]. 环境昆虫学报, 2021, 43(4): 811-839.

[15]郝德军, 艾志新, 周传艳, 等. 两种昆虫病原线虫生物学特性的研究[J]. 林业科技, 2001(6): 18-21.

[16]Bedding R A, Akhurst R J. A simple technique for the detection of insect parasitic rhabditid nematodes in soil[J]. *Nematologica*, 1975, 21(1): 109-110.

[17]White G F. A method for obtaining infective nematode larvae from cultures [J]. *Science*, 1927, 66(1709): 302-303.

[18]Dhakal M, Nguyen K B, Hunt D J, et al. Molecular identification, phylogeny and phylogeography of the entomopathogenic nematodes of the genus *Heterorhabditis* Poinar, 1976: a multigene approach[J]. *Nematology*, 2021, 23(4): 451-466.

[19]Dutky S R, Thompson J V, Cantwell G E. A technique for the mass propagation of the DD136 nematode[J]. *Journal of Insect Pathology*, 1964, 6(1): 417422.

[20]王慧慧, 周廷刚, 杜嘉, 等. 温度植被旱情指数在吉林省干旱监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2013, 28(2): 324-329.

[21]颜珣, 郭文秀, 田成丽, 等. 中国昆虫病原线虫研究和产业化进展[J]. 应用昆虫学报, 2025, 62(5): 1325-1363.

[22]Půža V, Mráček Z. Seasonal dynamics of entomopathogenic nematodes of the genera *Steinernema* and *Heterorhabditis* as a response to abiotic factors and abundance of insect hosts[J]. *Journal of Invertebrate Pathology*, 2005, 89(2): 116-125.

[23]Chaudhary A, Chauhan P, Singh A K, et al. Phylogenetic analysis of *Steinernema pakistanense* from the semi-arid regions of India and its toxicity assessment against lepidopteran and coleopteran insects [J]. *Egyptian Journal of Biological Pest Control*, 2025, 35(1): 14.

[24]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(1): 20-24.

(本篇专家编审:李立梅)

(上接第 30 页)

参考文献

[1]杨细妹, 毛林鲜. 森林质量精准提升工程措施及效益分析[J]. 安徽农学通报, 2024, 30(14): 64-67.

[2]张会儒, 雷相东, 张春雨, 等. 森林质量评价及精准提升理论与技术研究[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 1-18.

[3] GB/T 38590—2020 森林资源连续清查技术规程[S].

[4]李亮, 孟祥龙, 孟范辉, 等. 舒兰市不同立地因子下的森林质量评价[J]. 吉林林业科技, 2024, 53(4): 28-32, 37.

[5]刘利杰, 谢卓洪, 雷敏, 等. 基于层次分析法的森林质量评价——以广州流溪河林场为例[J]. 林业资源管理, 2022(6): 89-94.

[6]肖前辉, 敬阳, 龚召松. 湖南省楠木天然林质量动态评价[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(10): 7-11.

[7]黄莉雅, 黄俊才, 廖南燕, 等. 基于主成分分析与聚类分析的森林质量评价——以广西国有博白林场为例[J]. 广西林业科学, 2022, 51(4): 543-548.

[8]张博, 王照利, 雷方隽. 基于层次分析法和物元分析法的森林资源质量评价——以延川县为例[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 208-215.

[9]孙睿, 刘珉, 魏巍, 等. 国家储备林研究进展及其林分质量精准评价研究[J]. 西部林业科学, 2020, 49(4): 1-7, 15.

[10]Zhao Qingxia, Yu Shichuan, Zhao Fei, et al. Comparison of machine learning algorithms for forest parameter estimations and application for forest quality assessments[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 434: 224-234.

[11]彭洁, 王武英, 吉乃喆, 等. 基于层次分析法的 13 个月季新品种性状综合评价[J]. 北京农学院学报, 2024, 39(2): 108-114.

[12]刘成杰, 吕少杰, 李海勇, 等. 烟台市森林质量评价研究[J]. 热带林业, 2024, 52(4): 83-87.

[13]于玲, 陈博, 缪珊, 等. 基于因子分析与聚类分析的森林质量评价——以北京市京西林场为例[J]. 北京农业职业学院学报, 2026, 40(1): 70-75.

[14]杨姝琦, 庞宏东, 刘彦, 等. 九峰国家森林公园森林质量评价[J]. 湖北林业科技, 2024, 53(6): 7-11.

[15]邵炜, 熊宇, 卢惠, 等. 永定河流域森林质量评价与分析[J]. 陕西林业科技, 2021, 49(6): 36-40.

[16]张峰, 张丽君, 胡炜, 等. 基于小班尺度的县域森林质量评价研究[J]. 林业与环境科学, 2020, 36(1): 21-29.

(本篇专家编审:杨雨春)

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 007
文章编号:1005-7129(2026)06-0039-04 中图分类号:S763. 7 文献标识码:A

杨干象抗性杨树品种选育与防控研究概述

王玉琢[1], 焦宏飞[2], 王亚琼[3], 王 莹[1], 孙红英[4]
(1. 榆树市国有林总场, 吉林 长春 130400; 2. 四平新型工业化经济开发区国有林总场, 吉林 四平 136502; 3. 珲春市木材检查站, 吉林 延边 133300; 4. 四平市林业科学研究院, 吉林 四平 136000)

摘 要:杨干象是破坏极强的钻蛀性害虫,防治难度大,主要危害杨柳科树木,造成枝梢干枯,严重时会导致整株死亡,带来极大的经济和生态损失。本文概述了杨干象抗性杨树品种选育、防治技术等方面的研究,对未来的研究方向进行了展望,以期为杨干象的科学防控和杨树产业的健康发展提供理论参考。
关键词:杨干象;杨树;抗性品种;防治

Summary of Research on Resistant Poplar Varieties Breeding and Control for *Cryptorrhynchus lapathi*

WANG Yuzhuo[1], JIAO Hongfei[2], WANG Yaqiong[3], WANG Ying[1], SUN Hongying[4]
(1. State-owned Forest Farm of Yushu City, Changchun 130400, China; 2. State-owned Forest Farm of Siping New Industrialization Economic Development Zone, Siping 136502, China; 3. Timber Inspection Station of Hunchun City, Yanbian 133300, China; 4. Academy of Forestry Science of Siping City, Siping 136000, China)

Abstract: *Cryptorrhynchus lapathi* is the highly destructive boring pest, mainly endangering Salicaceae trees. It would cause branches dieback, and in severe cases even lead to whole-tree mortality. That would bring great economic and ecological losses. It was difficult to control the pest. The research progress of resistant poplar varieties breeding and integrated pest control techniques was reviewed in this paper. The future research directions were prospected. That would provide the theoretical reference for the scientific control of *C. lapathi* and the sustainable development of the poplar industry.
Keywords: *Cryptorrhynchus lapathi*; poplar; resistant varieties; pest control

杨干象(*Cryptorrhynchus lapathi*)是我国林业检疫性有害生物之一,对杨柳科(Salicaceae)树木危害最为严重,在欧洲、亚洲及北美洲均有分布,在我国广泛分布于东北、华北、西北多省区。其幼虫在韧皮部与木质部之间环绕树干蛀食,切断输导组织,导致枝干枯朽、风折甚至整株死亡,造成巨大的生态与经济损失[1-5]。杨干象的发生规律呈现明显的地域性,该虫在我国北方地区一年一代,成虫羽化高峰期多为 7 月下旬至 8 月上旬,以初龄幼虫、卵和成虫多种形态越冬,成虫寿命较长但活动迟缓,主要依靠爬行和人为携带传播[6-8]。杨干象防治难度大,近年来研究重点已转向综合防治措施以及杨树品种自身抗性的挖掘与利用。本文概述了杨干象抗性杨树品种选育、防治技术等方面的研究,对于筛选适宜造林的抗虫杨树品种及制

收稿日期:2026-07-20
第一作者:王玉琢(1972—),男,高级工程师,主要从事营林生产工作,E-mail:1727664417@qq.com。
通信作者:焦宏飞(1980—),女,高级工程师,主要从事造林绿化工作,E-mail:1453853079@qq.com。

定科学高效的可持续防控策略具有重要的理论意义和实践价值。

1 杨干象抗性杨树品种选育

杨干象呈现明显的树种依赖性,对杨柳科植物具有高度专一性,寄主植物的选择是杨干象种群扩散与危害程度的关键决定因素。李焕存[8]研究表明,杨干象补充营养和产卵均对寄主表现出选择性,其对北京杨(*Populus* × *beijingensis*)的嗜食程度大于小黑杨(*P.* × *xiaohei*),在北京杨上产的卵多于小黑杨和柳树(*Salix* spp.)。小叶杨(*P. simonii*)、小青杨(*P. pseudosimonii*)、加拿大杨(*P.* × *canadensis*)等为受害品种[9, 10],不同杨树品种间存在显著的受害差异,可通过遗传改良选择抗性品种。

我国杨干象抗性杨树品种选育早期的研究从田间筛选开始,不同地区筛选出的优良品种存在地域差异。高瑞桐等[11]在杨干象危害严重的人工林中,以抗虫性和速生性为指标选出了抗虫优树,试验表明 106 号优树在诱虫数量、取食孔数量及野外虫株率上均显著低于对照,且生长量表现优异。张兴芬等[12]对大连地区 2~3 年生 20 个杨树品种进行杨干象抗性调查,按平均抗虫率将不同杨树品种划分为抗虫性强、抗虫性中等和抗虫性差 3 个类群,筛选出昭林 6 号(*P.* × *xiaozhuanica* cv. 'Zhaolin-6')、迎春 5 号(*P.* × *heixiao* cv. 'Yingchun-5M')、小黑杨等 9 个抗虫性强的品种。李晓鹏等[13]进行室内接种测试抗杨干象能力,结果表明辽育 3 号杨(*P. deltoides* cv. 'Liaoyu3')抗虫性显著优于亲本辽宁杨(*P.* × *Liaoningensis*)及对照品种青杨(*P. cathayana*)。许庆亮等[14]在辽宁灯塔地区对 18 个杨树品种进行了抗性调查,筛选出中绥 12 杨[*P. deltoides* × (*P. nigra* var. *thevestina* × *P. nigra*)]、中黑防杨(*P. deltoides* × *P. cathayana*)等抗虫性强的品种,为当地造林绿化提供了具体的品种推荐。谢伟等[15]调查不同杨树品系连续 2 年的平均虫口密度,采用聚类分析法将其划分为高感虫、感虫、低抗虫、中抗虫和高抗虫 5 个等级,抗虫品种多是具有乡土亲本的杂交种,来自辽宁以北的品种或具有耐寒亲本类型的品系抗虫性多较好,后期速生品种也多比先期速生品种抗虫性好。蒋路平[16]在东北营建试验林筛选对蛀干害虫具有良好抗性的无性系,94 个受试杨树无性系中有 19 个未受杨干象危害。郑荣华等[17]探讨了杨干象抗性品种的抗虫机理,指出木质部还原糖含量与抗虫性密切相关。曹庆杰等[18, 19]研究了杨树木质部和树皮的硬度、胸径生长、亲本来源对杨干象抗性水平的影响,杨树木质部硬度、韧皮部硬度、树皮硬度越大抗杨干象能力越强,2~3 年生杨树胸径生长相对较快的品系抗性差,10~11 年生杨树胸径生长相对较快的品系抗性强,青杨、小青杨为亲本的品系抗虫性强,美洲黑杨(*P. deltoides*)、欧洲黑杨(*P. nigra*)为亲本的品系抗虫性差。

2 杨干象防治技术

杨干象蛀食行为隐蔽,难以在危害初期发现,防控难度大。传统的化学防治包括喷雾法、涂药法、注射法等。娄巍等[20]研究指出,应用 50 %辛硫磷乳剂或 50 %杀螟松乳剂 100 倍液、200 倍液涂抹防治杨干象幼虫效果良好、操作方法简便、成本较低。杨玉江[21]在杨干象幼虫化蛹期至成虫羽化后还未钻出坑道前,用棉团蘸杀虫净或敌敌畏堵塞坑道,防治效果达 95 %。孟祥文等[22]用 40 %氧化乐果 80 倍液进行刺孔后涂药效果最佳、成本最低,9 个乡(镇)的平均杀虫率为 97.33 %~100.00 %。张文学等[23]应用辛硫磷和敌杀死各 500 倍液采取注射法防治幼虫,应用辛硫磷和敌杀死各 1 000 倍液采取喷雾法防治成虫,死亡率均达 80 %。蔡建文等[24]采用氧化乐果微胶囊剂防治杨干象幼虫,效果比同浓度乳油提高 20 %,不同温度下配制微胶囊剂的药效及残效的防治结果表明在 30 °C 条件下配制的微胶囊剂效果最好。许国民等[25]对杨干象几种不同防治方法的防治效果进行对比,采用 2.5 %溴氰菊酯加废机油混合制剂点涂蛀孔并封缠的方法药效持久且伤口愈合快,采用 2.5 %溴氰菊酯加水混合制剂则更适合幼虫期防治,刀针锥刺法对表皮相对光滑坚硬的杨树树种防治效果较好。苗建才等[26]采用灭幼脲油剂、油胶悬剂等,用点涂的方法对杨干象幼虫和成虫进行了适时防治,灭幼脲油剂可使表皮几丁质含量减少 15 %,防治杨干象小龄幼虫杀虫效果达

96.7 %,灭幼脲油胶悬剂抑制杨干象成虫精巢和卵巢的发育,可使成虫产卵量降低40 %~70 %、卵的孵化率降为0。

化学防治存在环境污染风险,已逐步转向物理、生物及综合防治,探索高效、低毒且操作简便的防治方法已成为研究热点。金大勇等[27]采用涂漆法、喷漆法和锤击法对杨干象幼虫进行防治,校正死亡率分别高达97.5 %、95.7 %和92.2 %。高瑞桐等[28]利用树干伤口处流出的汁液诱集杨干象成虫,诱杀效果显著。袁树范等[29]利用肿腿蜂防治杨干象,在幼虫期施放效果最佳,有效控制杨干象种群。王颖等[30]利用活体大蜡螟(*Galleria mellonella*)繁殖的斯氏线虫(*Steinernema* sp.)侵染杨干象幼虫,防治效果较好。张永乐等[31]采用中华甲虫蒲螨(*Pyemotes zhonghuajia*)防治杨干象,在杨干象不同发育阶段具有较好的防治效果。曹庆杰[32]试验发现α-蒎烯和水杨醛对杨干象成虫有显著驱避作用,而亚油酸与叶醇则有显著引诱作用,布氏白僵菌(*Beauveria brongniartii*)CFCC87323菌株对杨干象幼虫致病力最高,采用1.0×10^8个·mL^{-1}孢子悬浮液处理,室内感染死亡率达93.83 %,林间防治采用涂干法和无纺布菌条法校正死亡率分别达77.62 %和63.21 %,管氏肿腿蜂(*Sclerodermus guani*)与花绒寄甲(*Dastarcus helophoroides*)均能寄生杨干象,花绒寄甲比管氏肿腿蜂寄生率高,杨干象与花绒寄甲以1∶2的比例释放花绒寄甲后寄生率达40 %以上。宁啟水[33]采用生物药剂白僵菌液(孢子含量为18亿·mL^{-1})注入幼虫排粪孔和蛀道,并用黄泥封住,杨干象幼虫死亡率为88.8 %,防治效果良好。牛芳[34]利用病原微生物与天敌昆虫联合防治杨干象,试验发现在球孢白僵菌中添加亚麻籽油性助剂可显著提升成虫杀虫效果且加速死亡,对雄性杀虫效果优于雌性,筛选后的病原真菌与3种天敌昆虫防治效果良好,致死效果为摩泽蒲螨(*Pyemotes moseri*)>花绒寄甲>白蜡吉丁肿腿蜂(*Sclerodermus pupariae*),同时其还研究了寄主植物挥发物对杨干象触角电位和行为反应的影响,筛选出具有显著驱避和引诱作用的化合物及有效浓度,为开发行为调控剂提供了理论依据。

3 展望

植物抗虫性表现为遗传抗虫性和生态抗虫性[35]。随着生物技术的发展,杨树抗虫性研究已逐渐拓展到基因工程与分子生物学层面。可将生物技术与育种进行结合,培育高抗性杨树新品种[36]。将抗虫基因引入植物细胞,在寄主细胞内稳定地遗传和表达,使植物对某些昆虫具有抗性,已成为植物抗虫育种的一条有效途径[37]。我国在杨干象的抗性杨树品种选育及防治技术等方面已取得一定进展,未来应进一步深入研究杨树抗杨干象的分子遗传机制与生理生化基础,引入抗虫基因,培育兼具速生与高抗性的优良品种。另外,需加强不同生态区域下杨干象发生规律的动态监测与预测预报,建立科学、经济、环保的综合治理体系,保障杨树产业健康发展。

参考文献

[1]方三阳. 楊干象鼻虫的初步研究[J]. 林业科学, 1964(1): 81-85.

[2]解青江, 陈玉河. 杨干象发生规律及其防治[J]. 农村科技, 2006(6): 35-36.

[3]李亚杰, 钟兆康, 林继惠, 等. 杨干象虫的生物学和防治[J]. 昆虫学报, 1981, 24(4): 390-396.

[4]张文学. 杨干象生物学特性观察及防治的试验[J]. 吉林林业科技, 1993, 22(6): 28-29.

[5]宋树坤, 刘蒙, 孙显涛. 杨干象生物学特性及防治措施[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2008(4): 52.

[6]杨丽华, 郭金龙, 卢建财, 等. 辽西北地区杨干象的发生规律与防治对策[J]. 河北林业科技, 2008(6): 38.

[7]王雅君. 杨干象的发生与防治措施[J]. 河北林业科技, 2011(1): 105-106.

[8]李焕存. 杨干象成虫行为机制的研究[J]. 森林病虫通讯, 2000(1): 22-26.

[9]李亚杰. 杨干象虫的生物学特性及防治研究[J]. 林业实用技术, 1965(21): 2-3.

[10]沈刚. 杨干象甲发生规律和防治试验初报[J]. 内蒙古林业科技, 1983(1): 37-41.

[11]高瑞桐, 杨自湘, 汪太振, 等. 杨树对杨干象抗性选择的研究[J]. 林业科学研究, 1991(5): 517-522.

[12]张兴芬, 刘毅, 王敏, 等. 不同杨树品种对杨干

象抗性的调查研究[J]. 辽宁林业科技, 2005(3): 20-21.
[13]李晓鹏, 彭儒胜, 孙妍, 等. 辽育3号杨的抗逆性测试[J]. 防护林科技, 2007(S1): 3-5, 16.
[14]许庆亮, 金伟, 杨振学, 等. 灯塔地区不同杨树品种对杨干象抗性的调查研究[J]. 现代农业科技, 2010(24): 145, 147.
[15]谢伟, 蔺胜军, 纪纯阳, 等. 杨树品系对杨干象抗性研究初探[J]. 辽宁林业科技, 2011(5): 15-19, 44.
[16]蒋路平. 东北地区杨树杂种无性系综合评价及其环境适应性机制研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023: 30-52.
[17]郑荣华, 康中信, 林元富, 等. 抗杨干象甲选种及抗虫机理的研究[J]. 防护林科技, 1986(1): 40-48.
[18]曹庆杰, 迟德富. 杨树品系抗杨干象水平及其与木质部和韧皮部硬度等关系[J]. 林业科学, 2015, 51(5): 56-67.
[19]曹庆杰, 迟德富, 宇佳, 等. 10~11年生杨树品系抗杨干象水平及其与树干物理特性的关系[J]. 林业科学研究, 2016, 29(2): 183-190.
[20]娄巍, 钱范俊, 李清宇, 等. 杨干象甲化学防治技术的研究[J]. 东北林学院学报, 1983(2): 50-58.
[21]杨玉江. 用毒棉团防治杨干象[J]. 内蒙古林业, 1985(8): 13.
[22]孟祥文, 贾庆兰, 孟昭武, 等. 杨干象防治技术的研究[J]. 林业科技, 1991(1): 26-28.
[23]张文学, 雷广衍, 张丽华, 等. 杨干象生物学特性观察及防治的研究[J]. 吉林林业科技, 2003, 32(1): 20-21, 51.
[24]蔡建文, 孙玉峰, 周国庆, 等. 应用微胶囊剂防治杨干象幼虫[J]. 林业科技, 2000(1): 29-30.
[25]许国民, 王树国, 贾喜棉. 杨干象几种防治方法的效果对比[J]. 河北林果研究, 2009, 24(1): 57-60.
[26]苗建才, 迟德富, 郝然喜. 灭幼脲对杨干象作用机制和防治的研究[J]. 林业科学, 1994(4): 325-331.
[27]金大勇, 李龙根, 吕龙石. 杨干象无公害防治试验[J]. 中国森林病虫, 2003(6): 25-26.
[28]高瑞桐, 程传礼, 魏建华. 杨树树干伤口分泌物诱引杨干象[J]. 森林病虫通讯, 1991(2): 32.
[29]袁树范, 史维经, 于弋洋. 利用肿腿蜂防治杨干象甲的试验报告[J]. 吉林林业科技, 1987, 16(5): 28-30.
[30]王颖, 于振福, 孙海双, 等. 斯氏线虫繁殖技术及其防治杨干象的初步研究[J]. 林业科技, 1992(1): 27-29.
[31]张永乐, 袁宏田. 用中华甲虫蒲螨控制杨干象试验[J]. 河北林业, 2011(4): 46.
[32]曹庆杰. 环境友好型技术控制杨干象研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2015: 10-48.
[33]宁啟水. 杨干象甲防治效果试验研究[J]. 现代农村科技, 2019(8): 45-46.
[34]牛芳. 生物及化学生态措施防控杨干象技术研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022: 14-99.
[35]魏振. 杨树抗虫性研究进展[J]. 中国森林病虫, 2007(1): 25-28.
[36]刘美青, 李淑玲. 杨树抗性研究的现状及展望[J]. 河南农业大学学报, 1998(3): 253-257, 267.
[37]郭同斌, 嵇保中, 江望锦, 等. 杨树抗虫基因工程及其抗虫性研究进展[J]. 林业科技开发, 2003(1): 3-5.

(本篇专家编审:李兴鹏)

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. 06. 008
文章编号:1005-7129(2026)06-0043-03 中图分类号:S757 文献标识码:A

长岭县森林资源现状及可持续经营对策

张利建[1], 秦树林[1], 秦嗣委[2], 王宝琦[3]
(1. 吉林省林业调查规划院, 吉林 长春 130022; 2. 白山市林业勘察设计院, 吉林 白山 134300; 3. 吉林长白山森工集团露水河林业有限公司, 吉林 白山 134506)

摘 要: 本文以 2024 年长岭县森林资源二类调查数据为基础,针对长岭县森林资源现状梳理出存在的问题,提出林分近自然改造、差异化分类经营、多元产业培育、科技体系升级等优化对策,为长岭县森林资源可持续经营提供参考。

关键词: 长岭县;森林资源;林分结构;可持续经营

Current Status and Sustainable Management Strategies of Forest Resources in Changling County

ZHANG Lijian[1], QIN Shulin[1], QIN Siwei[2], WANG Baoqi[3]
(1. Forestry Investigation and Planning Institution of Jilin Province, Changchun 130022, China; 2. Forest Survey and Design Institute of Baishan City, Baishan 134300, China; 3. Lushuihe Forestry Limited Company of Jilin Changbai Mountain Forest Industry Group Limited Company, Baishan 134506, China)

Abstract: Based on the forest management inventory data of forest resources in Changling County in 2024, the existing problems were sorted out. Some optimization countermeasures, such as close-to-natural transformation of forest stands, differentiated classification management, multi-industry cultivation, and upgrading of science and technology system, were put forward. That would provide reference for the sustainable management of forest resources in Changling County.

Keywords: Changling County; forest resources; stand structure; sustainable management

森林资源二类调查是实现森林精细化、科学化管理的基础性工作,能够系统查清县域森林资源的种类、数量、质量、分布等情况,是林业科学布局、系统规划、资源利用、保护修复的重要数据支撑[1]。本文依托 2024 年长岭县森林资源二类调查数据成果,从全县林地权属、地类、龄组、树种、蓄积、林种分布特征出发,全面梳理当前森林经营管理中存在的各类问题,从实施近自然林分改造等角度出发,提出适配长岭县的可持续经营路径,以期为长岭县退化林修复、森林质量提升、沙化土地综合治理提供数据支撑,同时为吉林省西部同类型县域森林资源经营管理提供理论参考与实践经验,实现生态保护修复与林农增收双向共赢。

1 研究区概况

长岭县(地理位置 123°06′~124°45′ E、43°59′~44°42′ N)隶属吉林省松原市,地处吉林省西部,位于科尔沁沙地东南缘,总面积 573 638.66 hm^2。区域土壤类型复杂,黑钙土、风沙土、盐土、碱土交错分布;属温带大陆性季风气候,年均气温 4.9 ℃,年降水量 400~520 mm,降水集中在 6—8 月,全年蒸发量远大于降水量,干旱、风沙灾害频发,生态系统脆弱,是吉林省“三区四屏”生态安全格局中科尔沁防风固沙屏障的重要组成部分。

收稿日期:2026-06-08
第一作者:张利建(1973—),男,工程师,主要从事林业调查规划工作,E-mail:ghyqsl@126.com。

2 森林资源现状

全县林地总面积 82 415.95 hm^2。其中,集体林地 53 110.31 hm^2,占比 64.44 %;国有林地 29 305.64 hm^2,占比 35.56 %。全县林地中商品林地 26 317.83 hm^2,占比 31.93 %;公益林地 56 098.12 hm^2,占比 68.07 %。公益林地在林地结构中占据主导,契合区域防风固沙的核心生态功能。公益林地中,国家级公益林 17 325.57 hm^2,占比 30.88 %;省级公益林 5 724.98 hm^2,占比 10.21 %;县级公益林 33 047.57 hm^2,占比 58.91 %。

林地按地类划分,有林地 57 346.54 hm^2,占比 69.58 %;疏林地 440.38 hm^2,占比 0.53 %;灌木林地 1 198.69 hm^2,占比 1.46 %;未成林地 3 269.26 hm^2,占比 3.97 %;苗圃地 145.03 hm^2,占比 0.18 %;无立木林地 3 266.24 hm^2,占比 3.96 %;宜林地 273.46 hm^2,占比 0.33 %;辅助生产林地 16 476.35 hm^2,占比 19.99 %。

有林地按龄组划分,幼龄林 23 252.78 hm^2,占比 40.55 %;中龄林 15 591.08 hm^2,占比 27.19 %;近熟林 8 450.96 hm^2,占比 14.73 %;成熟林 6 799.60 hm^2,占比 11.86 %;过熟林 3 252.12 hm^2,占比 5.67 %。

有林地按优势树种(组)划分,杨树林面积 56 449.12 hm^2,占比 98.44 %;樟子松林面积 610.12 hm^2,占比 1.06 %;其他优势树种(组)分布较少,仅占有林地面积的 0.50 %。

有林地按林种结构划分,防护林面积 44 661.12 hm^2,占比 77.88 %;用材林面积 12 685.42 hm^2,占比 22.12 %。

有林地蓄积 3 911 780 m^3。其中,幼龄林蓄积 478 003 m^3,占比 12.22 %;中龄林蓄积 984 631 m^3,占比 25.17 %;近熟林蓄积 840 742 m^3,占比 21.49 %;成熟林蓄积 998 054m^3,占比 25.51 %;过熟林蓄积 610 350 m^3,占比 15.61 %。

3 现存主要问题

3.1 树种结构单一,生态稳定性差

杨树林面积占比 98.44 %,树种结构单一,极易诱发区域性病虫害。纯林抵御风沙、春旱等极端天气的能力弱,局部林地出现林木枯梢、成片死亡现象,生态系统韧性不足。纯林难以适应沙地、盐碱地等脆弱生态环境,榆树等乡土树种未得到有效保护,种质资源趋于枯竭。

3.2 龄组配置不合理,林地生产力水平不高

全县幼龄林面积占比超四成,中幼林抚育工作滞后,部分林分经营密度超标。成熟林、过熟林资源短缺,用材林采伐利用空间有限。全县有林地单位面积蓄积量 68.21 $m^3 \cdot hm^{-2}$,低于全国平均水平,林地生产潜力未能充分释放,不符合三北工程提质增效的相关要求。

3.3 分类经营落实不到位,商品林集约经营水平低

公益林存在管护经费短缺、基层技术人员严重不足的问题,个别工作人员对公益林分级管理、抚育政策、技术标准掌握不透彻,技术指导缺位,精细化管护难以落地。商品林以农户零散经营为主,林权碎片化,单户商品林地面积小,难以实现规模化、标准化中幼林抚育及低产低效林改造。

3.4 产业化发展滞后,结构单一

目前县域仅零散种植文冠果,缺少规模化经济林基地,林下经济、林产品精深加工、森林旅游、林业碳汇等新兴产业均未形成,各类生态资源无法有效转化为经济收益,未能实现“生态产业化、产业生态化”的发展目标。

3.5 基础设施与科技支撑体系不完善

国营林场布局分散,森林防火、病虫害监测预警等基础设施不足。基层林业专业技术人员缺口较大,人员年龄结构呈现明显的代际断层,难以适应复杂的森林经营技术指导任务。农户经营模式粗放,盐碱地改良、节水造林、良种繁育、生态修复等先进技术推广缓慢,难以满足沙化地、盐碱地植被修复的技术需求。

4 可持续经营优化对策

4.1 实施近自然改造,优化林分与龄组结构

应对高密度杨树林实施带状疏伐,合理降低林分密度。遵循适地适树原则,科学配置保护和修复、自然和人工、生物和工程等治理措施,遵循宜封则封、宜林则林、宜草则草、宜灌则灌、乔灌草(花)结合原则,因地制宜、精准施策[2],补植榆树、樟子松、柳树、柽柳等耐旱、耐盐碱树种,打造针阔混交林、乔灌草(花)复合林,改变单一纯林树种结构,有计划地营造带状、片状、网状相结合的防护林体系,提升林分抗病虫害、抗风沙能力。按照龄组分类施策,对幼龄林科学疏伐,中龄用材林适度间伐培育大径材,成熟用材林严格执行采伐限额,采伐量坚

决不允许大于生长量，采伐后第一时间完成迹地更新，逐步均衡龄组结构。同时划定乡土树种保护小区，抢救性保护天然榆树等乡土树种种质资源。

4.2 压实管护责任，遏制林地面积减少

全面落实吉林省林长制考核制度，将林地保有量、用途管控纳入考核指标，遏制林地面积减少。对未有效利用的宜林地、多次造林失败的采伐迹地，统一纳入国土绿化与沙化土地治理范围。逐步清退辅助生产林地内违规农作物种植、禽畜养殖，将闲置林业用地改造为苗圃地、经济林基地。建立采伐迹地更新台账与督办机制，明确更新时限，依法查处毁林开荒、乱占林地等违法行为，针对未成林造林地和新成林幼林地，一律禁止林农间作，确保成活率和保存率，稳定林地资源总量。

4.3 深化分类经营，实施差异化管理

公益林应实行分级管护，一级国家级公益林实行全封禁管理，其他公益林在合规范围内开展适度抚育，探索集体公益林委托国有林场管理机制[3]，完善公益林保护修复政策，推进天然林和公益林高水平保护。搭建无人机 + 地面网格化立体巡护体系，重点守护西北沙地与农田防护林带，巩固退耕还林还草成果，稳固提升森林质量。积极争取生态补偿资金，提高群众参与管护积极性。依托吉林省集体林权制度改革政策，引导农户以林地经营权入股合作社，整合零散商品林地，实现规模化经营。选用优良乡土树种种苗，合理配套水肥、修枝等管理技术，定向培育大径材，严格规范采伐审批与轮伐周期，杜绝无序采伐。

4.4 培育多元林业产业，推动生态与产业融合

依托现有经济灌木林资源，在太平川、前七号等林场建设文冠果标准化种植基地，延伸油料加工产业链。在盐碱闲置宜林地试点种植沙棘、枸杞等特色经济林，打造沙地特色产业带。发展林下经济，在林下种植中药材、养殖禽畜，提高林地综合利用率。全面加强古树名木保护，深入开展古树名木资源普查，实施濒危衰弱古树名木抢救复壮，开展古树后备资源培育，建立健全古树名木数据库和管护责任体系。整合古树、林地、草地、湿地景观资源，开发林下采摘、森林观光、生态体验等文旅项目。引进中小型木材精深加工企业，就地转化本地木材资源，提升产品高附加值，实现覆绿与富民协同发展。

4.5 强化科技赋能，完善防灾、减灾管护体系

联合高校及科研院所开展产学研合作，筛选适配本地的优良树种，推广膜下滴灌、土壤改良、病虫害绿色防控等实用技术，提高造林成活率。开展常态化科学技术培训，提高一线技术人员科技水平，培育高水平、高素质的生态保护修复专业化队伍，把专业化技术、现代化装备、信息化管理手段广泛应用于山水林田湖草沙系统治理[4]。完善防火通道、防火站点、病虫害测报站点等基础设施，充实基层林草队伍，全面落实网格化管护制度。依托三北工程联防联治机制，加强跨区域林业灾害协同防控，构建全域综合管护体系。

5 结语

“十五五”时期是我国林业实现“由量向质、由大到强”转变的关键窗口期，面对新形势新使命，林业要彻底摒弃传统粗放型、单一性增长路径，构建现代化林业发展新范式，实现高质量发展，推动我国从林业大国迈向林业强国[5]。长岭县是吉林省西部阻挡风沙和治理沙化、盐碱化、荒漠化土地的前沿阵地，森林以人工防护林为主体，生态防护地位突出。树种单一、龄组失衡、林地管控不力、产业滞后、科技薄弱等问题长期制约林业高质量发展。应以林分结构优化为核心，统筹林地保护、分类经营、产业培育与科技升级，实现生态保护与林农增收双向共赢，推动县域森林资源走向精细化、可持续发展。

参考文献

[1]许正亮，王应泉，卢永飞，等. 森林资源二类调查系统抽样 2 种样地调查方法的比较与分析[J]. 林业资源管理，2016(3)：140-144，150.

[2]王锐，刘翰云，侯方淼. 森林“四库”联动视角下森林质量提升路径研究[J]. 林业经济，2026，48(1)：16-30.

[3]向明，张云峰，王超. 国有林场支持深化集体林权制度改革举措探讨[J]. 林草政策研究，2024，4(1)：32-40.

[4]王登举，刘世荣，何友均，等. 关于山水林田湖草沙系统治理的战略思考[J]. 林草政策研究，2022，2(4)：8-14.

[5]张海鹏，王智晨. 我国林业高质量发展的战略机遇与关键路径[J]. 林业经济，2026，48(3)：5-11.

（本篇专家编审：陈建军）

DOI:10. 16115/j. cnki. issn. 1005-7129. 2026. 06. 009
文章编号:1005-7129(2026)06-0046-03 中图分类号:S863 文献标识码:A

道路建设对野生动物的影响及保护对策探析

李景宏[1], 李 丹[2]
(1. 吉林省林业勘察设计研究院, 吉林 长春 130022; 2. 辽宁省清原满族自治县林业和草原综合行政执法大队, 辽宁 抚顺 113300)

摘 要: 本文系统梳理了道路建设对野生动物的生态影响及保护对策方面的研究进展,对相关野生动物保护提出对策建议,以期为道路建设与野生动物保护协同发展提供参考。
关键词: 道路建设;栖息地破碎化;野生动物通道;累积影响评价;生态公路

Analysis of the Impact of Road Construction on Wild Animals and Protection Countermeasures

LI Jinghong[1], LI Dan[2]
(1. Forest Survey and Design Institute of Jilin Province, Changchun 130022, China; 2. Forestry and Grassland Comprehensive Administrative Law Enforcement Brigade of Qingyuan Manchu Autonomous County in Liaoning Province, Fushun 113300, China)

Abstract: The research progress of the ecological impact of road construction on wildlife and protection countermeasures was systematically reviewed in this paper. The countermeasures and suggestions for wildlife protection were put forward. That would provide reference for the coordinated development of road construction and wildlife protection.
Keywords: road construction; habitat fragmentation; wildlife crossing structures; cumulative effects assessment; ecological highway

随着经济社会的发展,交通基础设施网络不断扩张,道路工程已成为改变陆地景观格局的关键人为驱动因素之一。密集路网对野生动物栖息地与种群产生生态影响,导致野生动物生境破碎化、野生动物种群存活率下降,改变野生动物的活动节律与迁移模式,对区域生物多样性构成潜在威胁。本文系统梳理了道路建设对野生动物的生态影响及保护对策方面的研究进展,探讨我国道路基础设施建设中的野生动物保护对策,以期为道路建设与野生动物保护协同发展提供参考。

1 道路建设对野生动物栖息地与种群的生态影响

在道路施工和运营阶段,人类活动增强、环境要素改变,对野生动物栖息地与种群产生生态影响,包括撞击致死、交通干扰引发的回避效应、动物行为改变、栖息地破碎化等[1,2]。道路形成物理阻隔,将原本连通的自然生境切割为彼此孤立的生境斑块,改变区域栖息地的空间格局,进而影响野生动物的活动节律与迁移模式。长期的种群隔离对种群遗传结构产生累积效应,影响区域生物多样性。已有研究学者指

收稿日期:2026-07-22
第一作者:李景宏(1971—),女,正高级工程师,主要从事林业建筑工程方面工作,E-mail:272636944@qq.com。

出,道路交通已成为陆生野生动物非自然死亡的主要原因[3]。道路沿线存在持续的人为干扰和声光扰动,野生动物对风险的感知显著提高,其行为策略发生改变,许多栖息于林冠层或林下的物种会回避原有生境,调整原有的活动节律、觅食路径、捕食行为策略等,其可利用的栖息地面积缩小,种群补充能力下降[4]。罗子君等[5]对鸟类观测的结果表明,机动车流量、噪声和夜间照明不仅直接造成撞击死亡和迁徙受阻,还会间接改变鸟类的生境利用,扰乱日常活动节律,降低繁殖成功率。

2 针对道路建设影响的野生动物保护研究

野生动物通道可缓解道路阻隔、恢复栖息地连通性,其保护成效取决于通道的设计与选址。早期的相关研究集中于修建野生动物通道的可行性,现在已逐步扩展至其类型选择、尺寸优化、选址及配套引导设施建设等问题。野生动物通道设计须以目标物种的生态习性为依据,还要充分考虑当地环境条件。Clevenger等[6]对哺乳动物利用公路排水涵洞的情况进行观察,发现不同物种对同一涵洞的通过意愿存在显著差异,结构尺寸、周围植被掩护状况和景观特征均会影响涵洞的利用效果。张晏等[7]分析了国内外野生动物通道的研究成果,从沿线动物生理习性调查分析、动物通道使用的影响因素、动物通道类型、通道辅助方式和通道监测系统等方面总结了野生动物通道设置方法。朱玉峰等[8]以新疆明哈高速公路为例,介绍了环境影响评价阶段公路沿线野生动物资源调查的途径和方法、影响动物通道建设的关键因素及调查方法、动物通道型式的影响因素的分析方法,建议在环评阶段结合专家论证与关键因素权重分析确定通道设置方案。我国学者在梳理国内外成果的基础上,已初步构建涵盖兽类、两栖类和爬行类的通道标准体系框架。不同地理区系的动物对通道的需求存在明显差异,通道设计不能采用统一模式[9]。根据现有数据,小型哺乳动物通道宜增设壁架和植被覆盖,有蹄类通道优先采用下穿形式,树栖哺乳动物则更适合树冠桥梁。

孙金柱等[10]指出,从道路规划层面入手,将野生动物保护理念前置到道路工程规划与环境影响评价阶段,通过调整路网模式、合理界定路网密度和交通量弥补后期保护措施不足。Soanes K 等[11]对 313 项研究进行分析,指出 98 %的动物通道记录到动物穿越利用行为,但只有不足 40 %的研究能证明动物通道确实保证了原有的动物穿越频率不下降,并且多数研究缺少施工前的对照数据。Rytwinski T 等[12]指出,道路生态学研究者应尽早介入规划和设计阶段,布设处理区和对照区,在施工前采集可靠的背景数据,以提高后续效果评价的说服力。关于评价方法,胡继平等[13]采用层次分析法对线性工程造成的生态影响进行量化打分,验证了这种定量的评价指标体系在工程决策中的可行性。杨艳刚等[14]指出目前我国现行环境影响评价制度对野生动物保护的考量不够充分,建议建立跨部门协调机制,开发能够覆盖不同空间尺度的累积影响评估方法,同时针对不同生态敏感区编制专门的通道设计规范。

生态公路是一种新的建设理念,追求公路工程与原生生态环境的和谐,要求工程建设对生态环境最小程度的破坏,在注重原生态环境保护的同时,通过优化主体工程和进行生态恢复降低公路对野生动植物的阻断、干扰、致死等负面影响,建立生态稳定的生物群落,提高生态系统的生物多样性以及结构功能的稳定性,从而构建人与自然和谐的生态系统。国内相关学者开展了针对性研究,为濒危或旗舰物种量身打造保护方案,其中王云等[15]从道路致死、行为影响、生境损失、间接影响等方面综述了公路和铁路建设对亚洲象(*Elephas maximus*)的影响,从路基建设形式、动物通道选址与尺寸、施工期和运营期管理等方面提出了完整的技术和管理对策。马武昌等[16]从生态公路建设出发,讨论了野生动物保护的意义,提出相应的保护策略,提出通过生态景观设计缓解道路的负面影响。整体来看,我国在基础研究方面仍较薄弱,现有保护措施的系统性不足。

3 针对道路建设影响的野生动物保护对策建议

3.1 强化规划阶段的早期介入与累积影响评价

在路网体系的规划决策阶段,应将野生动物保护纳入考虑范畴,基于野生动物栖息地连通性进行道路建设累积影响评价,根据评价结果对区域路网的总体密度与远期交通量增长速率进行合理管控。应划定“道路—动物影响敏

感区”,以弥补项目评价在空间尺度和效应叠加方面的不足。此外,建议构建交通、林业、生态环境等多部门协同的联合审查机制,在路网规划的审批环节增设野生动物保护专项论证,从而实现从规划源头规避或减缓道路建设对野生动物种群及其栖息地的潜在负面影响。

3.2 完善野生动物通道标准规范与长期监测评估体系

为进一步提升我国野生动物通道建设的科学性与规范性,需加快制定覆盖不同类型生态敏感区、适配不同动物类群的设计标准与技术规范,在实际建设过程中采用专家论证与量化评价相结合的方式确定最优方案。通道建成后的效果评估应建立在可靠的对照框架之上,采用施工前后对照影响设计,监测期限原则上不少于 4 年或覆盖 4 个以上可比地点,通过时间和空间重复提高评估的准确性[12, 17]。此外,应建立全国性的野生动物通道数据库,将监测数据纳入工程后评价体系,为后续通道选址和设计优化提供实证依据。

3.3 注重道路生态学研究与国际经验本土化

应进一步深化道路生态学基础研究,重点聚焦动物行为响应机制、种群遗传连通性阈值等关键科学问题。同时,可依托人工智能在图像识别与空间分析方面的技术优势,提升物种识别与路杀热点判别的效率,推动精准保护理念与生态公路建设的深层次融合。此外,可借鉴国际成熟经验,结合我国实际情况建立本土化技术体系,推动道路建设与野生动物保护协同发展。

3.4 推进生态公路示范工程与公众参与

可在我国不同生态地理区选择典型路段开展生态公路示范工程建设,邀请动物保护专家参与规划、设计、施工及运营全过程,针对不同物种的生态需求进行差异化设计。面向公众加大道路沿线野生动物保护的宣教力度,搭建开放的路杀事件上报平台,形成全社会参与的野生动物保护合力。

参考文献

[1] Forman R T T, Alexander L E. Roads and their major ecological effects[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 1998, 29: 207-231.

[2] Trombulak S C, Frissell C A. Review of ecological effects of roads on terrestrial and aquatic communities[J]. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 18-30.

[3] 胡忠军, 于长青, 徐宏发, 等. 道路对陆栖野生动物的生态学影响[J]. 生态学杂志, 2005, 24(4): 433-437.

[4] 张梦, 周友兵, 邹大虎. 道路噪音和光污染对翼手目动物行为的影响[J]. 生物多样性, 2025, 33(7): 136-148.

[5] 罗子君, 平磊. 公路工程建设对鸟类的影响和应对措施[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2020, 43(2): 74-79, 85.

[6] Clevenger A P, Chruszcz B, Gunson K. Drainage culverts as habitat linkages and factors affecting passage by mammals[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2001, 38(6): 1340-1349.

[7] 张晏, 费世江. 公路建设中野生动物通道的设置研究[J]. 辽宁科技大学学报, 2009, 32(1): 93-98.

[8] 朱玉峰, 董博昶, 沈毅. 环境影响评价阶段公路工程野生动物通道设置研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 329-331.

[9] 王云, 关磊, 杨艳刚, 等. 公路野生动物通道研究进展[J]. 交通运输研究, 2019, 5(5): 79-87, 109.

[10] 孙金柱, 孔亚平, 毕俊怀, 等. 公路规划中野生动物保护对策的探讨[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 30-34.

[11] Soanes K, Rytwinski T, Fahrig L, et al. Do wildlife crossing structures mitigate the barrier effect of roads on animal movement? A global assessment[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2024, 61(3): 417-430.

[12] Rytwinski T, van der Ree R, Cunnington G M, et al. Experimental study designs to improve the evaluation of road mitigation measures for wildlife[J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 154: 48-64.

[13] 胡继平, 刘阳, 杨筱. 线性工程对野生动物及其栖息地影响评价与保护对策[J]. 林草政策研究, 2022, 2(1): 72-78.

[14] 杨艳刚, 王云, 陶双成, 等. 交通环境影响评价视角下野生动物保护对策研究[J]. 环境影响评价, 2026, 48(3): 22-29.

[15] 王云, 关磊, 杨艳刚, 等. 交通建设对亚洲象的影响及保护对策研究综述[J]. 林业建设, 2019, 37(6): 34-37.

[16] 马武昌, 宋子炜. 生态公路建设中野生动物保护意义与对策[J]. 野生动物, 2008, 29(6): 308-311.

[17] Rytwinski T, Soanes K, Jaeger J A G, et al. How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis[J]. *PLoS ONE*, 2016, 11(11): e0166941.

(本篇专家编审:王海军)

《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6期（总第304期）

Journal of Jilin Forestry Science and Technology
Bimonthly, Started in 1972
Volume 55 Number 6 (No.304)

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11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 Nov.15th, 2026
Printed by Xincheng Printing Co., Ltd. of Jilin Province
Issued by Editorial Department of Journal of Jilin Forestry Science and Technology

ISSN 1005-7129

公开发行
定价：10.00元