北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

华北落叶松人工林保留木生长与林分生产力对间伐的响应

贺鹏 和敬渊 张海军 杨璐 刘宪钊

Responses of residual tree growth and stand productivity to thinning in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations

He Peng, He Jingyuan, Zhang Haijun, Yang Lu, Liu Xianzhao

引用本文:
贺鹏, 和敬渊, 张海军, 杨璐, 刘宪钊. 华北落叶松人工林保留木生长与林分生产力对间伐的响应[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(11):48–57. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250239
He Peng, He Jingyuan, Zhang Haijun, Yang Lu, Liu Xianzhao. Responses of residual tree growth and stand productivity to thinning in *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11):48–57. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250239

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250239

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

不同处理方式对华北落叶松抚育剩余物分解的影响
Effects of different treatments on decomposition of *Larix principis–rupprechtii* tending residue
北京林业大学学报, 2021, 43(5): 15–23. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200345

间伐对华北落叶松林凋落物分解的影响
Effects of thinning on litter decomposition of *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(12): 29–37. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210114

不同密度调控强度对华北落叶松人工林土壤质量的影响
Effects of different density regulation intensities on soil quality in *Larix principis–rupprechtii* plantation
北京林业大学学报, 2021, 43(6): 50–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200322

基于潜在生产力的吉林省长白落叶松人工林立地质量评价
Site quality evaluation of *Larix olgensis* plantations based on potential productivity in Jilin Province of northeastern China
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 1–10. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240173

基于水量平衡的华北落叶松人工林承载密度研究
Carrying density of *Larix principis–rupprechtii* plantations based on water balance
北京林业大学学报, 2024, 46(7): 1–8. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240023

华北落叶松胚性组织超低温保存技术研究
Cryopreservation of embryogenic callus for *Larix gmelinii* var. *principis–rupprechtii*
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 47–53. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200251

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250239

华北落叶松人工林保留木生长与林分生产力对间伐的响应

贺 鹏[1] 和敬渊[2] 张海军[3] 杨 璐[2] 刘宪钊[2]

（1. 国家林业和草原局中南调查规划院，湖南 长沙 410014；2. 中国林业科学研究院资源信息研究所，北京 100091；
3. 河北省塞罕坝机械林场，河北 承德 068456）

摘要:【目的】量化间伐对华北落叶松人工林个体生长与林分生产力的动态影响，确定实现生产力最优化的林分密度阈值。**【方法】**依托 2017 年建立的长期定位样地，通过两种作业方式（基于胸高断面积和保留木株数密度）构建了林分密度梯度。在间伐后的 7 年间（2017—2024），对保留木生长和林分尺度的生产力进行了两个周期的连续监测。采用回归分析方法，重点评估了以保留木胸高断面积为核心指标的间伐强度对生长动态的调控作用。**【结果】**（1）间伐显著促进了保留木的个体生长量，在 2017—2020 年和 2020—2024 年两个时期，间伐组的保留木平均单株年生长量（分别为（4.98 ± 3.65）kg/a 和（4.08 ± 3.04）kg/a）均显著高于对照组（分别为（3.45 ± 3.05）kg/a 和（2.49 ± 2.17）kg/a，$p < 0.05$）。（2）对于胸径 > 20 cm 的较大径级保留木，其生长量在 2017—2020 年与对照组无显著差异，但在 2020—2024 年显著高于对照组（$p < 0.05$）。（3）所有保留木生长量及林分生产力在两个时期内均表现出随时间推移而下降的趋势（$p < 0.05$）。（4）保留木胸高断面积对保留木生长量及 2020—2024 年的较大径级保留木生长量均表现出显著的负效应（$p < 0.001$）。（5）林分尺度上，间伐处理与对照组的林分生产力在两个时期均无显著差异（$p > 0.05$），但在 2017—2020 年，林分生产力随保留木胸高断面积的增加呈现先上升后下降的趋势，在保留木胸高断面积为 34.2 m^2/hm^2 时达到峰值，而在 2020—2024 年，林分生产力与保留木胸高断面积无显著关系。**【结论】**间伐能有效促进华北落叶松保留木尤其是大径材的个体生长，但其对林分生产力的增益效应存在最优密度区间。为实现生产力最大化，建议将保留木胸高断面积调控在 29.8 ~ 40.1 m^2/hm^2。研究提出的量化指标可为区域森林的可持续经营提供决策依据。

关键词：华北落叶松；人工林；间伐；保留木生长量；林分生产力；保留木胸高断面积；生长动态调控

中图分类号：S750；S753 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)11−0048−10

引文格式：贺鹏，和敬渊，张海军，等. 华北落叶松人工林保留木生长与林分生产力对间伐的响应［J］. 北京林业大学学报，2025，47(11)：48−57. He Peng, He Jingyuan, Zhang Haijun, et al. Responses of residual tree growth and stand productivity to thinning in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(11): 48−57.

Responses of residual tree growth and stand productivity to thinning in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations

He Peng[1] He Jingyuan[2] Zhang Haijun[3] Yang Lu[2] Liu Xianzhao[2]

(1. Central South Academy of Inventory and Planning of National Forestry and Grassland Administration, Changsha 410014, Hunan, China;
2. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;
3. Saihanba Mechanised Forest Farm of Hebei Province, Chengde 068456, Hebei, China)

收稿日期：2025−06−25 **修回日期：**2025−10−23

基金项目：国家重点研发计划项目（2023YFD220080302、2024YFD220100204），国家自然科学基金项目（32271878）。

第一作者：贺鹏，高级工程师。主要研究方向：林草资源调查监测、林业数表模型研建、林草信息化建设等。Email：694186588@qq.com 地址：410014 湖南省长沙市雨花区香樟东路 143 号国家林业和草原局中南调查规划院。

责任作者：和敬渊，助理研究员。主要研究方向：森林经营理论与技术。Email：hejy627@163.com 地址：100091 北京市海淀区颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。

本刊网址：http://j.bjfu.edu.cn；http://journal.bjfu.edu.cn

Abstract: [**Objective**] Thinning is a key silvicultural practice for regulating stand structure and productivity in plantations. This study aimed to quantify the dynamic effects of different thinning regimes on individual tree growth and stand productivity in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations, and to determine the optimal stand density threshold for maximizing productivity. [**Method**] Based on long-term permanent sample plots established in 2017, two thinning methods (based on basal area percentage and residual stem density) were implemented to create a gradient of stand densities. Over a 7-year period post-thinning (2017−2024), residual tree growth and stand-level productivity were monitored over two census periods. Regression analysis was primarily used to evaluate the regulatory effects of the post-thinning stand structure (with residual basal area as key indicator) on growth dynamics. [**Result**] (1) Thinning significantly promoted the individual growth of residual trees. The mean annual individual growth in the thinned sample plots ((4.98 ± 3.65) kg/year and (4.08 ± 3.04) kg/year for the 2017−2020 and 2020−2024 periods, respectively) was significantly higher than control ((3.45 ± 3.05) kg/year and (2.49 ± 2.17) kg/year, respectively; $p < 0.05$). (2) For larger-sized residual trees (DBH > 20 cm), their growth showed no significant difference from the control in 2017−2020 period, but was significantly higher in 2020−2024 period ($p < 0.05$). (3) The growth of all residual trees and stand productivity exhibited a declining trend over time ($p < 0.05$). (4) Residual basal area had a significant negative effect on the growth of both all residual trees and larger-sized trees in 2020−2024 period ($p < 0.001$). (5) At stand level, no significant difference in productivity was found between thinned sample plots and control in either period ($p > 0.05$). However, during 2017−2020, stand productivity showed a quadratic relationship with residual basal area, peaking at 34.2 m^2/ha, whereas no significant relationship was observed in 2020−2024 period. [**Conclusion**] Thinning effectively enhances the individual growth of residual trees in *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii* plantations, particularly for promoting larger-diameter timber. However, its beneficial effect on stand productivity is constrained by an optimal density range. To maximize productivity, we recommend maintaining the residual basal area at 29.8−40.1 m^2/ha. The quantitative targets proposed in this study provide a scientific basis for decision-making in the sustainable management of regional forests.

Key words: *Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*; plantation; thinning; growth of residual trees; stand productivity; basal area of residual trees; dynamic regulation of growth

作为最大的陆地生态系统，森林在全球碳循环[1]、气候调节[2]、水土保持[3]及生物多样性维持等方面扮演着重要角色[4]。然而，随着人口大幅度增长、经济飞速发展以及气候恶化的加剧，天然林资源日益减少，人工林在满足木材需求、改善生态环境方面的地位愈发凸显[5]。第八次全国森林资源清查数据显示，我国人工林面积已达 6 933 万 hm^2。如何科学经营人工林资源，使其在高效发挥生产功能的同时，又兼具最大限度的生态效益、社会效益，已成为林学研究的核心议题。

抚育间伐是森林经营过程中一种至关重要的作业方式，它是获取木材资源的主要途径，也是改善林分结构、促进群落更新演替、提升森林多功能性的技术手段[6]。然而，间伐方式或强度选择不当可能造成林分生产力下降[7−8]、水土流失加剧、生物多样性丧失、生态系统服务功能退化[9−10]等一系列问题。因此，研究不同间伐策略对森林生态系统的影响，特别是对林木个体生长和林分整体生产力的影响机制与动态规律，对于优化森林经营方案、实现森林资源永续利用具有重要意义。

林木个体生长与林分整体生产力是衡量森林经营成效的核心指标。间伐通过移除部分林木个体，直接改变了林内的竞争格局，为保留木释放了光照、水分和养分等关键资源，从而激发补偿性生长效应[11−12]。然而，这种生长响应并非在所有林木中同步均质地发生。不同径级、不同竞争地位的林木对间伐的响应速度和幅度存在显著差异[13−14]。长期受压的林木往往对新增资源最为敏感，通常表现出最快、最强的生长反馈；而已经占据林冠优势地位的大径级林木，其对间伐的响应机制则更为复杂，并可能存在时间滞后性[9]。优势木一方面已具备较强的资源获取能力，间伐带来的边际效益可能在短期内并不突出。另一方面，其在应对环境变化时，需要一个调整期，例如优先将资源分配至地下根系的扩展，以适应新的土壤资源格局，这会导致地上部分的生长响应延迟。因此，准确评估间伐对大径级林木生长

的长期促进效应，并揭示其响应的时滞规律，对于优化大径材培育技术规程至关重要。对于林分尺度，间伐虽短期内因株数减少导致总生物量下降，但保留木个体生长的加速有望使林分生产力经历一个恢复甚至超量恢复的过程[15]。因此，间伐强度与林分生产力之间并非简单的线性关系，通常存在一个最优区间[10]。故而准确探明特定森林类型个体生长与林分生产力对间伐的响应规律，对于制定合理的采伐限额至关重要。

华北落叶松（*Larix gmelinii* var. *principis-rupprechtii*）是我国北方重要的乡土针叶用材树种，广泛分布于山西、河北、内蒙古等地，具有生长快、适应性强、材质优良等特点，在区域木材供给、水源涵养和生态屏障建设中发挥着重要作用[16–17]。华北落叶松是强阳性树种，对光照需求敏感，具有明显的顶端生长优势。这一特性使其人工纯林郁闭后的个体竞争激烈，尤其是在中龄林阶段，林木分化加剧，导致被压木生长停滞甚至死亡。因此，通过间伐移除竞争劣势木，为保留木，特别是具有培育潜力的优势木提供充足的光照和生长空间，被认为是调控该树种林分生长，促进大径材形成的最直接和有效的手段。目前，已有学者对华北落叶松的采伐响应开展研究[18–19]，但仍缺乏针对不同间伐强度下、间伐后不同时间阶段的林木个体生长及林分尺度生产力的动态变化规律的系统和长期定位观测研究。

本研究依托在山西省羊圈沟林场建立的华北落叶松人工林固定监测样地，于 2017 年实施了不同间伐强度的试验处理。通过对 2017 年、2020 年和 2024 年 3 期林木生长数据的连续监测与分析，评估不同间伐处理对华北落叶松保留木个体生长量的影响，并比较其与对照组的差异，评价不同间伐处理下林分生产力的响应特征，阐明林分生产力与保留木胸高断面积之间的定量关系。综上，提出以下 3 个假说：(1)间伐能显著促进华北落叶松保留木的个体生长，(2)华北落叶松优势木对间伐的生长响应存在时间滞后性，(3)华北落叶松林分生产力对间伐强度的响应呈非线性关系。森林经营是一个长周期的过程，其生态效应的显现往往具有动态性和时滞性。因此，仅基于单次调查的空间换时间研究难以捕捉完整的响应轨迹，而历时 7 年的定位观测可揭示间伐后初期至中期关键动态，为理解华北落叶松林对经营干预的短期适应和中期响应提供宝贵的实证数据。同时，本研究拟通过揭示间伐对华北落叶松林生长与恢复的动态影响机制，为该区域华北落叶松林的可持续经营、大径材培育目标的实现以及森林生态系统生产力的优化管理提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况与样地设置

研究区位于山西省忻州市五寨县羊圈沟林场（38°44′ ~ 39°01′N，111°48′ ~ 112°03′E），属管涔山林区，海拔 1 350 ~ 2 700 m。该地为亚寒带大陆性气候，年平均气温 5 ℃，年平均降水量 454 mm，年积温 2 647 ℃·d，年日照时数 2 900 h，全年无霜期 110 d[17]。研究区土壤主要为棕壤。研究区主要乔木树种有华北落叶松、云杉（*Picea asperata*）、山杨（*Populus davidiana*）、白桦（*Betula platyphylla*）等。主要灌木种有沙棘（*Hippophae rhamnoides*）、绣线菊（*Spiraea salicifolia*）、虎榛子（*Ostryopsis davidiana*）、忍冬（*Lonicera japonica*）等。主要草本有羊胡子草（*Eriophorum scheuchzeri*）、薹草（*Carex* spp.）等。

2017 年 10 月，选择具有代表性的华北落叶松中龄林建立了 24 块面积为 400 m^2（20 m × 20 m）的方形固定监测样地。这些样地为 1986—1988 年皆伐后人工栽植，至今林龄约为 40 年（栽植苗木为 2 或 3 年生裸根苗）。所有样地地势相似、林分条件均一、群落结构相近。调查并记录样地内胸径 ⩾ 5 cm 乔木的物种、胸径、树高、冠幅和相对坐标，并挂牌标记。2017 年，经上级林业主管部门批准，对上述样地进行不同强度的间伐作业。间伐前，根据调查数据，基于“采小留大、采密留稀、采弱留强”的原则筛选采伐木。在 24 块样地中，12 块以间伐林分的断面积为依据，设计间伐强度为未间伐（对照）、15% 强度间伐、30% 强度间伐和 45% 强度间伐；另外 12 块以每亩保留株数为依据，设计间伐强度为未间伐（对照）、保留 1 800 株/hm^2、保留 1 350 株/hm^2 和保留 900 株/hm^2。于 2020 年 10 月及 2024 年 10 月对 24 块样地内所有胸径 ⩾ 5 cm 的乔木进行复测，以确定林木生长及林分恢复状况（表 1）。

1.2 间伐指标量化、林木生长量与林分生产力计算

本文将 2017、2020 及 2024 年 3 期调查中均存活的林木视为保留木，共计 1 357 株。选取保留木断面积作为反映间伐强度的指标[10]。

根据 GB/T 43648—2024《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》[20]中所示的山西省落叶松与云杉的物种异速生长方程，计算林木的地上生物量。林木的生长量使用单位时间内保留木地上生物量的增长量来量化，林分生产力采用单位时间内、单位面积上的每个样地内全部保留木地上生物量增长量之和来量化。

$$W_{LG} = 0.073\,02 \times D^{2.472\,98}$$

表 1　样地基本情况

Tab. 1　Basic information of sample plots

间伐依据	类别	年份	平均胸径/cm	株数密度/(株·hm^{-2})	每公顷生物量/(Mg·hm^{-2})
林分断面积	对照	2017	13.8 ± 0.78	2 200 ± 303	118.14 ± 11.19
		2020	14.5 ± 1.04	2 200 ± 303	134.91 ± 12.57
		2024	15.1 ± 1.10	2 200 ± 303	149.36 ± 12.22
	15%强度	2017	13.6 ± 0.04	1 750 ± 75	93.94 ± 6.06
		2020	14.5 ± 0.07	1 750 ± 75	110.62 ± 5.94
		2024	15.3 ± 0.11	1 750 ± 75	128.65 ± 9.10
	30%强度	2017	16.3 ± 0.85	1 308 ± 29	106.36 ± 13.35
		2020	17.4 ± 0.90	1 308 ± 29	123.95 ± 15.93
		2024	18.4 ± 0.94	1 308 ± 29	144.43 ± 15.83
	45%强度	2017	16.5 ± 0.91	858 ± 38	69.62 ± 6.75
		2020	17.8 ± 0.84	858 ± 38	83.63 ± 6.63
		2024	19.2 ± 1.09	858 ± 38	102.28 ± 10.47
保留木株数	对照	2017	15.0 ± 1.08	1 925 ± 156	125.16 ± 10.34
		2020	15.9 ± 1.03	1 925 ± 156	144.86 ± 8.65
		2024	16.4 ± 1.03	1 925 ± 156	157.87 ± 7.68
	保留1 800株/hm^2	2017	16.0 ± 0.53	1 475 ± 109	109.24 ± 3.18
		2020	17.2 ± 0.89	1 475 ± 109	130.90± 4.49
		2024	17.9 ± 0.61	1 475 ± 109	146.46 ± 1.87
	保留1 350株/hm^2	2017	17.1 ± 0.87	1 067 ± 38	91.39 ± 7.30
		2020	18.0 ± 0.80	1 067 ± 38	105.84 ± 7.01
		2024	19.4 ± 0.78	1 067 ± 38	126.02 ± 5.76
	保留900株/hm^2	2017	18.4 ± 0.90	750 ± 66	77.32 ± 9.180
		2020	19.6 ± 0.94	750 ± 66	91.61 ± 12.64
		2024	21.1 ± 0.72	750 ± 66	109.69 ± 12.77

注: 表格中的数据是基于3期均存在的保留木计算的。

$$W_{PA} = 0.148\,65 \times D^{2.289\,06}$$

式中: W 是林木的地上生物量(kg), D 是林木的胸径(cm)。LG 表示落叶松, PA 表示云杉。

$$G = \frac{W_{t_2} - W_{t_1}}{t_2 - t_1}$$

式中: G 是单株保留木在监测周期内的年均生长量(kg/a), W_{t_1} 和 W_{t_2} 分别是该林木在初始时间 t_1 和结束时间 t_2 的地上生物量(kg)。

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} W_{t_1} - \sum_{i=1}^{n} W_{t_2}}{t_2 - t_1} \times \frac{10\,000}{400}$$

式中: P 是样地水平的林分年均生产力(Mg/(hm^2·a)), $\sum_{i=1}^{n} W_{t_1}$ 和 $\sum_{i=1}^{n} W_{t_2}$ 分别是样地内所有保留木在时间 t_1 和 t_2 的地上生物量(kg), 为统一单位, 计算结果需将 kg 转换为 Mg, 10 000/400 是样地面积转换系数。

1.3　统计分析

采用 Welch 的 t 检验, 比较同一时间段内对照处理与间伐处理之间保留木生长量差异是否显著。运用配对 t 检验, 判断同一处理下不同时间段之间保留木生长量变化是否显著。利用 Wilcoxon 检验, 分别检验林分生产力在同一时间节点下不同处理之间, 以及同一处理下不同时间节点之间的差异是否显著。采用普通最小二乘法回归模型量化间伐对保留木生长量及林分生产力的影响, 即分析其对保留木胸高断面积的响应。在 R 软件 4.2.2 版本进行统计分析[21]。

2 结果与分析

2.1 间伐对林木生长量的影响

2017—2020 年，间伐组的保留木生长量((4.98 ± 3.65)kg/a)显著高于对照组((3.45 ± 3.05)kg/a，$p < 0.05$，图 1)；2020—2024 年，间伐组的保留木生长量((4.08 ± 3.04)kg/a)依旧显著高于对照组((2.49 ± 2.17)kg/a，$p < 0.05$，图 1)。在对照和间伐组，2020—2024 年保留木生长量均显著低于 2017—2020 年间(均值差 = −0.96，$p < 0.05$，图 1)。

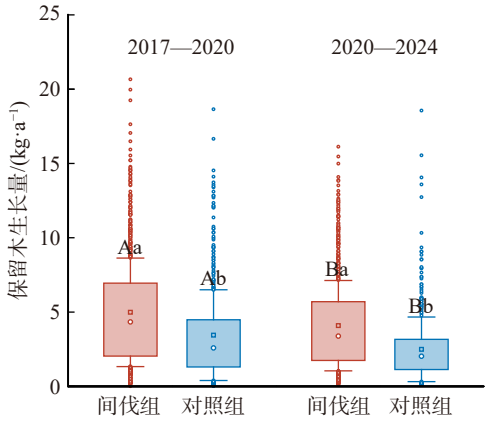
为探究较大径级木(DBH > 20 cm)的生长动态，本研究对其生长响应进行了分析。该径级是未来培育标准大径材的关键预备群体和主要经营对象。在 2017—2020 年，间伐组胸径 20 cm 以上的保留木生长量与对照组无显著差异($p > 0.05$，图 2)；在 2020—2024 年，间伐组大径级保留木生长量((8.31 ± 3.17) kg/a)显著高于对照组(4.84 ± 2.60)kg/a，$p < 0.05$，图 2)。对照组 2020—2024 年大径级的保留木生长量显著低于 2017—2020 年(均值差 = −3.86，$p < 0.05$，图 2)；间伐组 2020—2024 年间大径级保留木生长量也显著低于 2017—2020 年间(均值差 = −1.78，$p < 0.05$，图 2)。

图 3 显示：保留木胸高断面积对保留木生长量具有显著的负效应($p < 0.001$)。2017—2020 年，保留木胸高断面积对较大径级保留木生长量无显著影响($p > 0.05$)；而在 2020—2024 年，保留木胸高断面积对较大径级保留木生长量具有显著的负效应($p < 0.001$)。

2.2 间伐对林分生产力的影响

图 4 显示：2017—2020 年及 2020—2024 年，对照与间伐处理之间林分生产力均无显著差异($p > 0.05$)。而林分生产力在同一处理下不同时间阶段具有显著差异(图 4)。在对照组和间伐组，2020—2024 年间的林分生产力均显著低于 2017—2020 年间(均值差分别为−1.96 和−1.08，$p < 0.05$)。

为进一步明确间伐强度与林分生产力的关系，对每块样地的保留木胸高断面积与生产力进行拟合(图 5)。2017—2020 年林分生产力先随保留木断面积的增大而增加，表明适度间伐利于林分生产力的



不同大写字母表示同一处理年份间差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一年份处理间差异显著（$P < 0.05$）。下同。

图 1 对照与间伐处理下保留木生长量

Fig. 1 Growth of thinning-treated residual trees and control

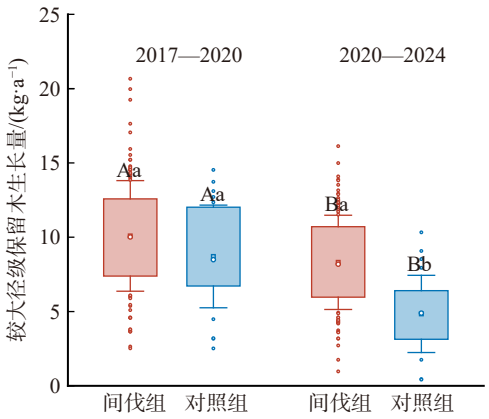


图 2 对照与间伐处理下较大径级(DBH > 20 cm)保留木生长量

Fig. 2 Growth of thinning-treated residual trees with larger diameter class (DBH > 20 cm) and control

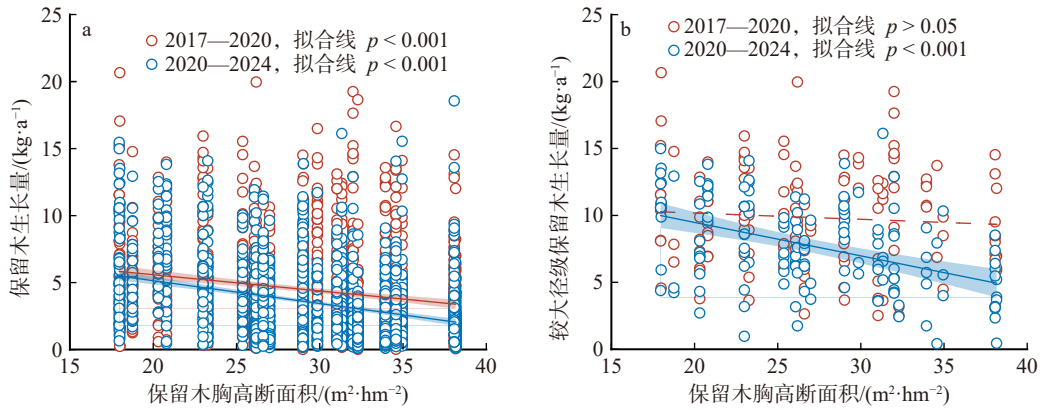


图 3 不同阶段保留木胸高断面积与生长量关系

Fig. 3 Relationship between basal area and growth of residual trees in different stages

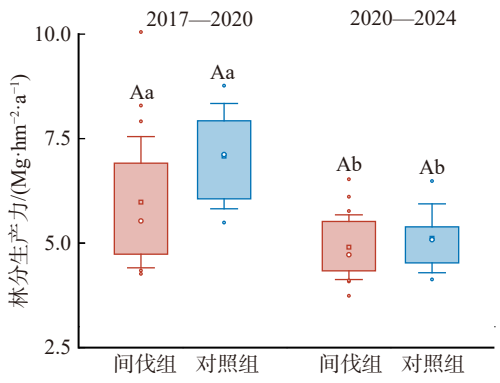


图 4　对照与间伐处理下林分生产力的差异

Fig. 4　Differences in stand productivity between control and thinning treatments

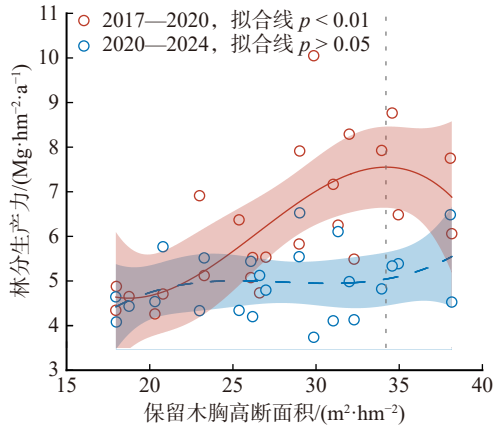


图 5　保留木胸高断面积与林分生产力的拟合关系

Fig. 5　Fitting relationship between basal area of residual trees and stand productivity

发挥。在保留木胸高断面积为 34.2 m^2/hm^2 时，林分生产力达到最大值，随后间伐强度的进一步增大使得林分生产力下降。为了更好地指导生产实践，将生产力不低于最大值 95% 的区间定义为最优经营密度范围。经计算，该最优范围对应的保留木胸高断面积为 29.8 ~ 40.1 m^2/hm^2。在此密度范围内，结合 LY/T 1897—2022《华北落叶松人工林经营技术规程》[22]，对应林分保留木密度约为 1 350 ~ 1 800 株/hm^2。2020—2024 年的林分生产力与保留木胸高断面积无显著关系($p > 0.05$)。

3　讨　　论

间伐作业作为一种重要的人为干扰和经营措施，对森林生态系统的结构、功能及服务产生深远影响[10,23]。通过对比间伐处理与对照处理，并分析不同时间阶段的变化，本研究探讨了间伐对林木个体生长及林分整体生产力的影响，旨在为区域森林经营实践提供科学依据。

3.1　间伐对保留木个体生长量的促进效应

在 2017—2020 年和 2020—2024 年两个时段内，间伐组的保留木生长量均显著高于对照组($p < 0.05$，图 1)，这表明间伐显著促进了保留木的个体生物量生长。该结果与前人关于间伐或择伐效应的研究结果一致[10,24−26]。间伐通过降低林分密度，从而改善保留木的光照、水分和养分条件[9,27]。竞争压力的减小使得保留木能够获得更多的生长资源，进而表现出更快的生长速率。

然而，尽管间伐处理对林木个体生长存在促进作用，但无论是对照组还是间伐组，保留木在 2020—2024 年的生长量均显著低于 2017—2020 年($p < 0.05$，图 1)。这种生长速率的下降归因于多种因素。森林生长对气候条件高度敏感[2,28]。研究区在 2020—2024 年的降水量低于 2017—2020 年。这种不利的气候条件对整个林区的林木生长造成了普遍的胁迫，从而导致了生长速率的整体下降[29]。此外，对于间伐处理的样地，林木在初期的资源释放后，其树冠和根系会迅速扩张以占据有效空间，这使得林分郁闭度再次回升，林内对光照、水分和养分的竞争重新加剧。在对照组，持续的高密度则导致竞争胁迫不断累积，进一步限制了林木个体生长。值得注意的是，间伐组生长量(−0.90 kg/a)的下降小于对照组 (−0.96 kg/a)，这表明间伐通过优化资源分配，有效减缓了环境胁迫和种内竞争加剧所带来的负面影响，表现出对林木生长的持续缓冲和促进作用。

3.2　间伐对较大径级保留木生长的影响存在时滞性

本研究表明间伐对胸径 > 20 cm 的较大径级保留木的生长量的影响存在一定的时间滞后性。在 2017—2020 年，间伐组与对照组的较大径级保留木生长量无显著差异($p > 0.05$，图 2)。尽管关于较大径级林木生长响应时滞性的报道尚不普遍，但这一现象可以从被广泛接受的观点中得到合理解释，即较大径级林木对间伐的生长响应敏感度通常低于小径级林木[5−6]。小径级林木长期处于严重的资源胁迫下，间伐带来的资源增加，可能被迅速转化为生长增量，表现出即时且强烈的正反馈。而较大径级林木的响应机制则更为复杂，这构成了时滞效应的基础。作为较大径级林木，其庞大而稳定的树冠和根系系统因间伐所感受到的环境变化相对温和，不足以立即触发其生长策略的根本性转变。此外，较大径级林木扩展根系与树冠需消耗大量能量和时间。在间伐后，林木个体可能会优先将资源用于巩固和扩展其庞大的根系，而非着重进行树干的生长。这个内部资源分配的调整过程，在外部表现为地上部分生长的滞后。但在 2020—2024 年，间伐组较大径级保留木生长量显著高于对照组($p < 0.05$，图 2)，表明间伐的积极效应开始显现。这说明随着时间推移，较

大径级林木能够更充分地利用间伐所释放的生长空间和资源，从而实现更快的生长。同样地，较大径级保留木在 2020—2024 年的生长量低于 2017—2020 年的生长量（图 2）。对照组较大径级木生长量的下降幅度（−3.86 kg/a）大于间伐组的下降幅度（−1.78 kg/a），这揭示了间伐在减缓较大径级林木生长衰退方面的积极作用。

3.3 保留木胸高断面积对个体生长的密度制约效应

保留木胸高断面积对保留木生长量具有显著的负效应（$p < 0.05$，图 3），这符合密度制约理论[10,30]，即林分密度越高（本研究以胸高断面积表示），个体间的竞争越激烈，分配到单株木的资源就越少，从而导致个体生长量下降。

对于较大径级保留木而言，胸高断面积的影响则表现出时间差异性。在 2017—2020 年，保留木胸高断面积对其生长量无显著影响（$p > 0.05$，图 3），这与同时期间伐对较大径级木生长影响不显著的观察相吻合（$p > 0.05$，图 2）。这意味着，无论样地的林分密度如何，较大径级林木在间伐后的前几年里都表现出相似的生长速率。这并非说明密度不重要，而是印证了较大径级林木对环境变化的响应存在延迟。在这一阶段，它们的生长可能更多地受内在生理节律和资源储备的支配，而尚未对外在竞争格局的改变做出充分的调整。在 2020—2024 年，保留木胸高断面积对较大径级保留木生长量则呈现出显著的负效应（$p < 0.05$，图 3）。这表明经过几年的生理适应和资源再分配，较大径级林木的滞后阶段结束，其生长开始受由林分密度所决定的资源可利用水平限制。在密度较低的样地，它们充分利用资源加速生长；在密度仍然较高的样地，则显现竞争的限制作用。

3.4 间伐对林分生产力的影响

林分尺度上，在 2017—2020 年和 2020—2024 年，对照组与间伐组之间的林分生产力均无显著差异（$p > 0.05$，图 4）。这表明林木株数减少所造成的生产力损失，在很大程度上被保留木个体生长的增加所补偿[31]。然而，补偿效应的实现并非一个均质的过程，其高度依赖于间伐强度[9]。低强度间伐对林分结构的扰动较小，保留木能够迅速利用被释放的资源，因此林分生产力可以在较短时间内恢复至甚至超过间伐前水平。而在高强度间伐下，尽管保留木的个体生长率可能达到峰值，但其移除的巨大生物量，使林分需更长的时间来弥补初始的生产力亏缺。因此，观测到的无显著差异的结果，可能是低强度与高强度两种趋势相互抵消的体现。这与回归分析结果（图 5）相吻合，即当保留木胸高断面积过低时，林分生产力处于较低水平。这强调了必须同时考虑强度和时间尺度两个维度，来评估间伐对生产力的影响。这一发现对于理解森林生态系统功能对经营活动的响应具有重要意义，即在一定间伐强度范围内，可以通过优化资源分配来培育优质大径材，而不必以牺牲林分生产力为代价。

与林木个体生长状况类似，在 2020—2024 年的林分生产力均显著低于 2017—2020 年（$p < 0.05$，图 4）。间伐组的生产力（−1.08 Mg/(hm^2·a)）下降幅度略小于对照组（−1.96 Mg/(hm^2·a)），这与保留木生长量的变化趋势一致，表明间伐有助于在较长时间维持相对较高的林分生产力水平。

此外，在 2017—2020 年间，林分生产力随保留木胸高断面积的增加呈现先增加后减少的关系，并在胸高断面积为 34.2 m^2/hm^2 时达到峰值（图 5）。这一结果与前人结果相似[9−10,32]。当保留木胸高断面积过低（即间伐强度过大）时，林地上资源未被充分利用，导致林分生产力偏低。随着保留木胸高断面积的增加（间伐强度减小），林分对资源的利用效率提高，生产力随之上升。然而，当胸高断面积超过一定阈值后，林木间过度激烈的光照、水分、养分竞争导致个体生长效率下降，甚至引起林木自疏现象的发生，从而使得林分生产力开始下降。

3.5 间伐效应与林分发育阶段

华北落叶松中龄人工林的林内生长竞争激烈，是决定未来林分结构和培育大径材的关键时期。研究确定的最优胸高断面积区间是针对提升中龄林生产力这一目标而言的。这一密度标准并不直接适用于其他发育阶段。如在幼龄林阶段，经营目标是快速促进林冠郁闭和优势木选择，其适宜的林分密度可能远高于此标准；而在近、成熟林时期，经营目标可能转向择伐更新或维持生态系统稳定性，此时对密度的调控策略也会发生根本性改变。因此，将间伐措施与林分发育阶段紧密结合，是实现科学的森林可持续经营的前提。未来的研究应构建覆盖整个轮伐周期的动态模型，以揭示不同发育阶段的最优经营策略及其间的衔接关系。

3.6 研究局限性与未来展望

间伐对林木生长的影响可由保留木胸高断面积反映。基于胸高断面积的间伐移除一定比例的林木，侧重于对林分整体竞争水平的调控。基于保留木密度的间伐与目标树经营的理念更为贴近，适用于以培育特定数量、特定规格的优质单株木为首要目标的经营情景。本研究主要关注间伐强度对林木或林分生长的影响，未来研究可设计专门的对比试验，将能更精确地验证这两种方式在不同经营目标下的优劣。

研究探讨了间伐对华北落叶松人工林地上部分生长与生产力的影响，并为优化经营提供了量化的密度指标。然而未能涵盖地下生态过程。森林生态系统是一个紧密联系的整体，其地下部分对间伐的响应同样剧烈，甚至是驱动地上格局变化的关键。间伐通过改变林下的微环境，会深刻影响细根的动态、根系碳分配、土壤呼吸以及养分循环速率。

研究对间伐效应的观测在时间尺度上存在局限。对于生长周期漫长的森林，研究 7 年的观测期仅能捕捉到间伐效应的初期响应阶段[33]。因此，当前研究所揭示的生长趋势，尤其是不同间伐强度对生产力的短期影响，不能被简单地外推至更长远的时间尺度。此外，森林对干扰的响应往往是非线性的，其恢复过程可能包含多个关键的转折点。7 年的观测窗口，有可能恰好处于两个转折点之间，从而使观测到的变化呈现出一种暂时的、近似线性的趋势。因此，研究的结论应被严谨地界定为对华北落叶松人工林间伐短期效应的系统分析，而其长期的成效与可持续性，则有待未来持续的定位监测来最终验证。

林分生产力是衡量用材林经营成效的核心指标，然而，现代森林经营的最终目标是实现经济、生态和社会效益的协同，即多功能性的最大化。研究为优化华北落叶松林的木材生产力提供了明确的量化指导，但未评估这些间伐策略对其他关键生态系统服务功能的影响。未来的研究应致力于构建多目标的经营决策模型，以探寻在不同社会需求背景下，实现森林多功能性最优的经营路径。

4　结　　论

研究检验了间伐对华北落叶松中龄林生长与生产力影响的 3 个假说。首先，间伐通过有效降低林分密度，显著促进了保留木的个体生长。其次，较大径级林木对间伐的生长响应存在约 3 年的时间滞后。研究明确了林分生产力与保留木密度之间存在一个最优阈值，过高或过低的密度均会导致生产力下降。为实现生产力最优化，建议将华北落叶松中龄林的保留木胸高断面积调控在 29.8 ~ 40.1 m^2/hm^2。这些量化的经营指标为该区域森林实现大径材培育和生产力提升等多重经营目标提供了直接的科学依据。

参　考　文　献

[1] He J Y, Fan C Y, Geng Y, et al. Assessing scale-dependent effects on Forest biomass productivity based on machine learning[J]. Ecology and Evolution, 2022, 12(7): e9110.

[2] Luo W X, Kim H S, Zhao X H, et al. New forest biomass carbon stock estimates in Northeast Asia based on multisource data[J]. Global Change Biology, 2020, 26(12): 7045−7066.

[3] He J Y, Lu L Q, He H J, et al. Estimating the dynamics of ecosystem functions under climate change in a temperate forest region[J]. Ecological Indicators, 2024, 166: 112353.

[4] Qiao X T, Lamy T, Wang S P, et al. Latitudinal patterns of forest ecosystem stability across spatial scales as affected by biodiversity and environmental heterogeneity[J]. Global Change Biology, 2023, 29(8): 2242−2255.

[5] 刘世荣, 杨予静, 王晖. 中国人工林经营发展战略与对策: 从追求木材产量的单一目标经营转向提升生态系统服务质量和效益的多目标经营 [J]. 生态学报, 2018, 38(1): 1−10.
Liu S R, Yang Y J, Wang H. Development strategy and management countermeasures of planted forests in China: transforming from timber-centered single objective management towards multi-purpose management for enhancing quality and benefits of ecosystem services[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(1): 1−10.

[6] 亢新刚, 吕勇, 刘健, 等. 森林经理学 [M]. 4 版. 北京: 中国林业出版社, 2011.
Kang X G, Lü Y, Liu J, et al. Forest management[M]. 4th ed. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.

[7] 魏龙鑫, 耿燕, 崔可达, 等. 阔叶红松林不同林层和生长阶段树木生长对采伐强度的响应 [J]. 植物生态学报, 2022, 46(6): 642−655.
Wei L X, Geng Y, Cui K D, et al. Responses of tree growth to harvesting intensity among forest strata and growth stages in a broadleaved Korean pine forest[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(6): 642−655.

[8] 牟长城, 庄宸, 韩阳瑞, 等. 透光抚育对长白山“栽针保阔”红松林植被碳储量影响 [J]. 植物研究, 2014, 34(4): 529−536.
Mu C C, Zhuang C, Han Y R, et al. Effect of liberation cutting on the vegetation carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broad-leaved tree in Changbai Mountains of China[J]. Bulletin of Botanical Research, 2014, 34(4): 529−536.

[9] 耿燕, 赵秀海, 安黎哲. 阔叶红松林乔木地上碳储量和碳增量对采伐强度的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(10): 23−32.
Geng Y, Zhao X H, An L Z. Responses of tree aboveground carbon storage and carbon increment to logging intensity in a broadleaved Korean pine forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(10): 23−32.

[10] 岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 等. 阔叶红松林林木与林分生长对采伐干扰的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2019−2028.
Yue Q M, He H J, Zhang C Y, et al. Responses of tree growth and stand productivity to harvesting disturbance in Korean pine-broadleaved forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2019−2028.

[11] 何怀江, 张忠辉, 张春雨, 等. 采伐强度对东北针阔混交林林分生长和物种多样性的短期影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(2):

1−12.

He H J, Zhang Z H, Zhang C Y, et al. Short-term effects of thinning intensity on stand growth and species diversity of mixed coniferous and broadleaved forest in northeastern China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(2): 1−12.

[12] 魏安然, 张雨秋, 谭凌照, 等. 抚育采伐对针阔混交林林分结构及物种多样性的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 148−158.

Wei A R, Zhang Y Q, Tan L Z, et al. Effects of tending felling on stand structure and species diversity of mixed coniferous and broadleaved forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 148−158.

[13] 雷相东, 陆元昌, 张会儒, 等. 抚育间伐对落叶松云冷杉混交林的影响 [J]. 林业科学, 2005, 41(4): 78−85.

Lei X D, Lu Y C, Zhang H R, et al. Effects of thinning on mixed stands of *Larix olgensis, Abies nephrolepis* and *Picea jazoensis*[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2005, 41(4): 78−85.

[14] 郝珉辉, 李晓宇, 夏梦洁, 等. 抚育采伐对蛟河次生针阔混交林功能结构和谱系结构的影响 [J]. 林业科学, 2018, 54(5): 1−9.

Hao M H, Li X Y, Xia M J, et al. Effects of tending felling on functional and phylogenetic structures in a multi-species temperate secondary forest at Jiaohe in Jilin Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(5): 1−9.

[15] Kunhamu T K, Kumar B M, Viswanath S. Does thinning affect litterfall, litter decomposition, and associated nutrient release in Acacia mangium stands of Kerala in Peninsular India[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2009, 39(4): 792−801.

[16] 刘宪钊, 韩文斌, 高瑞东, 等. 不同环境类型对华北落叶松分布的潜在影响 [J]. 生态学报, 2021, 41(5): 1885−1893.

Liu X Z, Han W B, Gao R D, et al. Potential impacts of environmental types on geographical distribution of *Larix principis-rupprechtii*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(5): 1885−1893.

[17] 陈思宇, 刘宪钊, 王懿祥, 等. 基于机载 LiDAR 的高郁闭度华北落叶松林单木识别 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(4): 800−806.

Chen S Y, Liu X Z, Wang Y X, et al. Individual tree detection in the high canopy density *Larix principis-rupprechtii* forest based on airborne LiDAR[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2022, 39(4): 800−806.

[18] 张晓红, 周超凡, 张状, 等. 崇礼冬奥核心区华北落叶松人工林结构特征与优化模拟 [J]. 林业科学, 2022, 58(10): 79−88.

Zhang X H, Zhou C F, Zhang Z, et al. Structural characteristics and cutting optimization model of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Chongli Winter Olympics Core Area[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(10): 79−88.

[19] 张晓红, 周超凡, 张状, 等. 基于光竞争截止系数的崇礼冬奥核心区华北落叶松人工林目标树抚育间伐模拟 [J]. 林业科学, 2023, 59(2): 30−39.

Zhang X H, Zhou C F, Zhang Z, et al. Simulation on crop tree management tending and thinning of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Chongli Winter Olympics Core Area based on coefficient of light competition[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2023, 59(2): 30−39.

[20] 国家标准化管理委员会. 主要树种立木生物量模型与碳计量参数: GB/T 43648−2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.

National Standardization Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for major tree species: GB/T 43648−2024[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.

[21] R Core Team. R: a language and environment for statistical computing[Z]. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022.

[22] 全国营造林标准化技术委员会. 华北落叶松人工林经营技术规程: LY/T 1897−2022[S]. 北京: 中国林业出版社, 2022.

National Technical Committee on Afforestation and Forest Management of Standardization Administration of China. Code of management technology for plantation of *Larix principis-rupprechtii* Mayr. : LY/T 1897−2022[S]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2022.

[23] Lindenmayer D B, Franklin J F, Lõhmus A, et al. A major shift to the retention approach for forestry can help resolve some global forest sustainability issues[J]. Conservation Letters, 2012, 5(6): 421−431.

[24] Sohn J A, Saha S, Bauhus J. Potential of forest thinning to mitigate drought stress: a meta-analysis[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 380: 261−273.

[25] Forrester D I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process[J]. Forest Ecology and Management, 2014, 312: 282−292.

[26] 张晓红, 张会儒, 卢军, 等. 目标树抚育间伐对蒙古栎天然次生林生长的初期影响 [J]. 林业科学, 2020, 56(10): 83−92.

Zhang X H, Zhang H R, Lu J, et al. Early effects of crop tree release tending on growth of natural secondary *Quercus mongolica* forest[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(10): 83−92.

[27] 范春雨, 张春雨, 赵秀海. 择伐对吉林蛟河阔叶红松林群落结构及动态的影响 [J]. 生态学报, 2017, 37(20): 6668−6678.

Fan C Y, Zhang C Y, Zhao X H. Effects of selective harvest on community structure and dynamics in a mixed broadleaved Korean pine forest in Jiaohe, Jilin Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(20): 6668−6678.

[28] 陈美霖, 韩海荣. 黄土高原地区 4 种常见树种适宜区对气候变化响应 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(3): 21−33.

Chen M L, Han H R. Response of four common tree species suitable areas to climate change in the Loess Plateau region of northern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023,

45(3): 21−33.

［29］ 黄伟程, 高露双, 赵冰倩. 不同间伐强度下竞争对东北阔叶红松林主要树种生长−气候关系的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(1): 30−39.
Huang W C, Gao L S, Zhao B Q. Influence of competition on the relationship between tree growth and climate of main tree species in the broadleaved Korean pine forest under different thinning intensities in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(1): 30−39.

［30］ 宋晓琛, 娄永峰, 黄金金, 等. 江西杉木大径材培育立地选择与密度控制技术研究 [J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(6): 1498−1508.
Song X C, Lou Y F, Huang J J, et al. Study on site selection and density control technology of cultivating large diameter Chinese fir wood in Jiangxi Province[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2024, 46(6): 1498−1508.

［31］ Chen J H, Qiao X T, Hao M H, et al. Climate variability modulates the temporal stability of carbon sequestration by changing multiple facets of biodiversity in temperate forests across scales[J]. Global Change Biology, 2025, 31(4): e70212.

［32］ 岳庆敏, 何怀江, 张春雨, 等. 吉林蛟河阔叶红松林谱系多样性和功能多样性对采伐干扰的响应 [J]. 生态学报, 2024, 44(19): 8617−8626.
Yue Q M, He H J, Zhang C Y, et al. Response of phylogenetic and functional diversity to harvesting disturbance in the Korean pine-broadleaved forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19): 8617−8626.

［33］ 马闯, 刘彦春, 王梦涵, 等. 不同间伐强度对大别山黄山松人工林林下植物多样性的长期影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(10): 11−18.
Ma C, Liu Y C, Wang M H, et al. Long-term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(10): 11−18.

（责任编辑　范　娟　孟　瑶
责任编委　张会儒）