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

采伐强度对阔叶红松林森林质量的长期影响

董润远 姜俊 赵秀海

Long term effects of thinning intensities on forest quality of broad leaved Korean pine forest

Dong Runyuan, Jiang Jun, Zhao Xiuhai

引用本文:
董润远, 姜俊, 赵秀海. 采伐强度对阔叶红松林森林质量的长期影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(7):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250486
Dong Runyuan, Jiang Jun, Zhao Xiuhai. Long term effects of thinning intensities on forest quality of broad leaved Korean pine forest[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7):1–11. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250486

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250486

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

采伐强度对阔叶红松林生态系统碳密度恢复的影响
Effects of logging intensity on restoration of carbon density in broadleaved Korean pine forest ecosystem
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 33–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220190

阔叶红松林乔木地上碳储量和碳增量对采伐强度的响应
Responses of tree aboveground carbon storage and carbon increment to logging intensity in a broadleaved Korean pine forest
北京林业大学学报, 2022, 44(10): 23–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220403

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
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
北京林业大学学报, 2023, 45(1): 30–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210515

长期氮添加对阔叶红松林细根形态、解剖结构和化学组分的影响
Effects of long–term nitrogen addition on fine root morphological, anatomical structure and stoichiometry of broadleaved Korean pine forest
北京林业大学学报, 2022, 44(11): 31–40. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210212

抚育强度对不同林型“栽针保阔”红松林碳源/汇影响
Effects of tending intensity on carbon source/sink of Korean pine forests with different forest types by planting coniferous forest and reserving broadleaved forest
北京林业大学学报, 2023, 45(6): 19–32. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220033

透光抚育强度对小兴安岭“栽针保阔”红松林碳储量的影响
Effects of release cutting intensity on the carbon storage of Korean pine forests by planting conifer and reserving broadleaved trees in Xiaoxing’an Mountains of northeastern China
北京林业大学学报, 2021, 43(10): 54–64. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200361

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250486

采伐强度对次生阔叶红松林森林质量的长期影响

董润远[1]　姜　俊[1]　赵秀海[2]
（1. 北京林业大学林木资源高效生产全国重点实验室，北京 100083；
2. 北京林业大学国家林业和草原局森林经营工程技术研究中心，北京 100083）

摘要:【目的】以 12 年连续定位监测探究采伐强度对次生阔叶红松林森林质量的长期影响，构建科学的森林质量评价体系，明确不同采伐强度下林分质量恢复规律，为该林分可持续经营提供理论依据与技术参考。**【方法】**以吉林蛟河林业实验管理局 4 hm^2 次生阔叶红松林为研究对象，设置 4 种采伐处理：对照（CK，0%）、轻度采伐（LT，约 15%）、中度采伐（MT，约 30%）、重度采伐（HT，约 50%）。从森林生产力、结构、更新、物种多样性及健康 5 个维度选取 21 项指标，采用层次分析法确定指标权重，构建森林质量评价体系，对比分析采伐前及采伐后 12 年的森林质量变化，探究不同采伐强度对次生阔叶红松林的影响，确定最有助于森林恢复的采伐强度。**【结果】**采伐后 12 年，4 种处理的森林质量指数分别为 0.808，0.888，0.860，0.793。LT 处理的森林质量指数最高，且较采伐前提升 14.7%，其年均蓄积量增长量最高、枯死木比例最低，森林更新、物种多样性及健康指标均优于 CK 处理；MT 处理目标树种蓄积量占比提升 8.95%，但森林生产力评分较低，采伐后 10 年森林质量恢复至伐前水平；HT 处理对森林生态系统干扰显著，短期内难以恢复，但可促进森林更新，12 年后森林质量指数恢复至伐前水平。**【结论】**轻度采伐（15% 左右）能显著提升次生阔叶红松林综合质量，生态恢复效果最优，可作为东北地区阔叶红松林经营的适宜抚育采伐强度。

关键词：采伐强度；次生阔叶红松林；森林质量；林分生长；长期监测
中图分类号：S718.55　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)07−0058−11
引文格式：董润远，姜俊，赵秀海. 采伐强度对次生阔叶红松林森林质量的长期影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(7)：58−68. Dong Runyuan, Jiang Jun, Zhao Xiuhai. Long term effects of thinning intensities on forest quality in secondary broadleaved Korean pine forest［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(7): 58−68.

Long term effects of thinning intensities on forest quality in secondary broadleaved Korean pine forest

Dong Runyuan[1]　Jiang Jun[1]　Zhao Xiuhai[2]
(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Research Center of Forest Management Engineering of State Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］Based on 12 years of continuous fixed-position monitoring, this study investigates the long-term effects ofthinning intensity on the forest quality of a secondary broad-leaved Korean pine forest. It aims to construct a scientific forest quality evaluation system, clarify the recovery patterns of stand quality under differentthinning intensities, and provide a theoretical basis and technical references for the sustainable management of this forest type.［**Method**］A 4-hectare secondary broadleaved Korean pine forest plot in the Jiaohe Forestry Experiment Bureau, Jilin Province, served as the research site. Fourthinning

收稿日期: 2025−12−02　**修回日期:** 2026−05−09
基金项目: 国家重点研发计划重点专项（2022YFD2201003）。
第一作者: 董润远。主要研究方向：森林经营管理。Email: 2602548306@qq.com　地址：100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。
责任作者: 姜俊，副教授。主要研究方向：森林经营管理。Email: jiang@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

treatments were established: control (CK, 0%), lightthinning (LT, approximately 15%), moderatethinning (MT, approximately 30%), and heavythinning (HT, approximately 50%). A forest quality evaluation system was constructed by selecting 21 indicators across five dimensions: forest productivity, structure, regeneration, species diversity, and health. The analytic hierarchy process (AHP) was used to determine indicator weights. Forest quality was assessed before thinning and 12 years post-thinning to analyze changes under different intensities and identify the optimal thinning threshold for forest recovery. [**Result**] Twelve years afterthinning, the forest quality indices for the four treatments were 0.808, 0.888, 0.860, and 0.793. The forest quality index of the LT treatment was the highest, representing a 14.7% increase compared to the pre-logging level. The LT treatment also showed the highest mean annual volume increment, the lowest proportion of deadwood, and superior performance in forest regeneration, species diversity, and health indicators compared to the CK treatment. The MT treatment increased the volume proportion of target tree species by 8.95%, but its forest productivity score was relatively low, with forest quality recovering to the pre-logging level approximately 10 years post-logging. The HT treatment caused significant disturbance to the forest ecosystem, making short-term recovery difficult, although it promoted forest regeneration, with quality recovering to the pre-logging level after 12 years. [**Conclusion**] Lightthinning (around 15%) can significantly enhance the comprehensive quality of secondary broad-leaved Korean pine forests, representing the optimal ecological restoration effect. A lightthinning intensity of approximately 15% is recommended as an appropriate tending intensity for managing these forests in northeast China.

Key words: cutting intensity; broadleaved Korean pine forest; forest quality; stand growth; long-term monitoring

森林质量是兼具抽象性与动态性的核心概念，既直观反映森林资源的物质基础与服务效能，又由林分结构、健康程度、生产能力等关键要素共同决定，其质量水平支撑森林生态、经济、社会多功能效益协同发挥[1−2]。构建科学完善的评价指标体系是量化森林质量、精准评估经营成效的重要基础。目前，国内外学者已从景观[3]、区域[4−5]、林分[6−7]等多尺度开展指标体系构建研究，但森林质量评价需紧密契合区域生态特征与森林经营实际需求，因此不同区域、林分类型及经营模式均需制定针对性的评价方案。

采伐作为森林经营的核心调控措施之一[8]，通过改变林分密度与空间结构，直接作用于生态系统的生物与非生物环境，进而影响生态服务供给能力[9]。已有研究证实，科学合理的采伐能够提升生态系统稳定性与结构完整性[10]，有效缓解种间竞争、优化资源配置[11]。例如，轻度间伐可改善林分资源分配效率、培育大径级优质木材[12]，促进目标树种生长与林下植被更新[13]；适度采伐能降低林分密度，使苗木获得充足的光照、土壤水分和养分，显著提高存活与生长速率，进而推动林下植被的更新与群落构建[14]，同时通过增加土壤微生物量与活性间接改善土壤理化条件[15]。因此，确定适宜的采伐强度，是长期改善森林质量、提升综合效益的关键所在[16]。

阔叶红松林（*Pinus koraiensis*）作为我国东北温带地带性顶极植被，具有生物多样性丰富、碳储量高、生态功能完善等显著优势[17]，在区域生态安全维持中占据重要地位。然而，长期过度采伐导致天然阔叶红松林面积锐减、群落结构退化，形成了大量物种单一、生态功能低下的次生林或过伐林[18]。以吉林蛟河地区为例，受采伐干扰后的次生阔叶红松林平均蓄积量不足 170 m^3/hm^2，远低于原始林 375 m^3/hm^2 的自然水平[19]，且林分密度过高导致高价值树种生长受限、林下更新不良，森林质量亟待长期系统性提升。已有研究表明，东北阔叶红松林对采伐强度的响应存在显著差异，且这种影响具有长达十余年的持续性[20−21]。但目前关于采伐强度对次生阔叶红松林质量的长期影响机制、动态恢复过程及针对性质量评价的研究仍较为薄弱。因此，开展全面、系统的长期定位研究，综合分析不同采伐强度对次生阔叶红松林森林质量的长期作用效应，对于实现该林分的可持续经营具有重要的理论意义与实践价值。

基于此，本研究以吉林蛟河次生阔叶红松林为研究对象，通过 12 年连续定位监测，从森林生产力、群落结构、生物多样性、更新状况及健康水平 5 个核心维度构建评价体系，系统评价不同采伐强度下森林质量的长期变化特征，解析采伐后 12 年间森林质量的动态恢复规律，探究采伐强度与森林质量的长期关联机制，明确促进森林质量提升的最优采伐强度，为阔叶红松林的长期可持续经营提供科学理论支撑与技术参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省蛟河市前进乡蛟河林业试验区管理局林场(43°57′N, 127°44′E), 平均海拔 506 m, 属温带大陆性山地气候。年平均气温 3.8 ℃, 最热月(7 月)平均气温 21.7 ℃, 最冷月(1 月)平均气温 −18.6 ℃, 年降水量 700～800 mm, 无霜期 120～150 d。土壤类型为山地暗棕色森林土, 土层厚度 20～100 cm。植被类型属于长白山植物区系, 为典型的天然次生针阔混交林。其中, 乔木树种主要有红松、白桦(*Betula platyphylla*)、春榆(*Ulmus davidiana* var. *japonica*)、胡桃楸(*Juglans mandshurica*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)、色木槭(*Acer pictum* subsp. *mono*)、蒙古栎(*Quercus mongolica*)和紫椴(*Tilia amurensis*)等; 灌木主要包括暴马丁香(*Syringa reticulata* subsp. *amurensis*)、簇毛槭(*Acer barbinerve*)、东北山梅花(*Philadelphus schrenkii*)、东北鼠李(*Rhamnus schneideri* var. *manshurica*)和毛榛(*Corylus mandshurica*)等; 草本层主要有蚊子草(*Filipendula digitata*)、山茄子(*Brachybotrys paridiformis*)和东北羊角芹(*Aegopodium alpestre*)等。

1.2 样地布设与数据采集

2011 年 7 月, 在吉林蛟河实验区管理局大坡林场近熟林内, 选取海拔、坡度及坡向一致的区域, 参照 CTFS(Center for Tropical Forest Science)标准设置 4 块 1 hm^2(100 m × 100 m)固定样地, 分别对应 4 种采伐处理: 1 号地为对照(CK, 采伐强度 0%)、2 号地为轻度采伐(LT, 约 15%)、3 号地为中度采伐(MT, 约 30%)、4 号地为重度采伐(HT, 约 50%)。所有样地均划分为 25 个 20 m × 20 m 连续子样方, 对样地内胸径(DBH)≥1cm 的木本植物进行挂牌定位, 调查记录树种、胸径、树高、枝下高、冠幅(东西/南北向)及生长状况(枯立、枯倒、断头)。同年, 遵循“间密留匀、留优去劣”原则[22−23]优化林分结构, 按预设强度确定采伐木, 优先伐除先锋树种、濒死木、病腐木及生长不良木, 保留水曲柳、胡桃楸等经济价值树种及红松、黄檗(*Phellodendron amurense*)等珍稀树种。各采伐样地选定采伐木数量如下: LT 样地共 89 株(含白桦 13 株, 春榆 10 株, 白牛槭(*Acer mandshuricum*) 9 株, 三花槭(*Acer triflorum*)11 株, 色木槭 10 株以及其他树种); MT 样地共 153 株(含白桦 24 株, 春榆 11 株, 三花槭 9 株, 色木槭 22 株以及其他树种); HT 样地共 434 株(含白桦 57 株, 色木槭 64 株, 春榆 47 株, 白牛槭 18 株, 三花槭 36 株, 蒙古栎 16 株, 朝鲜槐(*Maackia amurensis*)16 株, 青楷槭(*Acer tegmentosum*)21 株以及其他树种)。采伐前, 依据树种胸高断面积占乔木总胸高断面积之比, 得到 CK 样地的树种组成主要为春榆、水曲柳、红松及其他树种; LT 样地主要为水曲柳、红松、胡桃楸及其他树种; MT 样地主要为红松、水曲柳、紫椴及其他树种; HT 样地主要为水曲柳、白桦、红松及其他树种。

2011 年 12 月, 对 LT、MT、HT 样地实施采伐; 2013 年 7 月对 4 块样地进行首次复测(调查指标同初始), 确定实际采伐强度, 并在每块样地中选取 3 块林分状况一致、采伐强度相近的 20 m × 20 m 子样方, 用于后续林分生长、生物多样性及森林质量研究。后续分别于 2015、2018、2021 和 2023 年开展复测, 基于复测数据计算单位面积活立木蓄积、乔灌层地上生物量、乔灌木碳储量、Shannon-Wiener 指数等指标。采伐前后样地林分因子及实际采伐强度详见表 1。

1.3 评价指标体系构建与指标权重的确定

采用目标法将评价指标体系分为目标层、准则层和指标层 3 个层次。将次生阔叶红松林的样地调查数据转化为具体指标, 再对指标进行归类整合, 最终选取 21 个指标, 得到次生阔叶红松林质量评价指标体系(表 2)。层次分析法结合了定性和定量分析, 通过构建判断矩阵来确定各个层次指标的相对重要性, 并计算出相应的权重值, 是一种实用有效的权重确定方法[24]。本研究通过软件 YAAHP 0.5, 利用层次分析法确定各层评价指标的权重。权重计算结果见表 2。

1.4 森林质量指数的计算与评价结果的分级量化

林分调查因子指标的界定参照《森林资源规划设计调查技术规程》《森林资源连续清查技术规程》[25−26]; 生态质量相关指标参考《森林生态质量监测指标体系及技术规范》[27]; 退化林判别指标依据《退化林修复技术规程》[28]; 单位面积生物量等其余指标通过 *K*-均值聚类法确定指标基准值的分级标准。将每个评价指标基准值划分为“优”“良”“中”“差” 4 个等级(表 3)。根据上述评价指标的调查结果以及评价标准, 按以下公式计算各样地森林质量指数(A)。

$$A = \sum_{i=1}^{21} W_i X_i \tag{1}$$

式中: W_i 表示各评价指标的权重, X_i 表示第 i 项评价指标的得分值。$A \leqslant 1$, 数值越大, 表明森林资源质量越高。

$$B = \sum_{i=1}^{m} W_i' X_i \tag{2}$$

式中: B 为各准则层质量, W_i' 为各指标相对于准则层的权重, 其值为指标权重与准则层权重的商, m 为准

表 1　采伐前后样地林分特征

Tab. 1　Stand characteristics before and after thinning of plots

指标	CK	LT	MT	HT
海拔/m	453	443	430	447
采伐强度(胸高断面积强度)/%	0	17.24	34.74	51.87
采伐前林分密度/(株·hm^{-2})	1 106	1 045	1 007	1 298
采伐后林分密度/(株·hm^{-2})	1 056	844	770	716
采伐前平均胸径/cm	15.6	14.6	15.5	15.0
采伐后平均胸径/cm	15.4	14.3	15.9	11.9
采伐前平均树高/m	10.1	9.8	10.0	9.8
采伐后平均树高/m	10.1	9.8	10.2	9.0
采伐前胸高断面积/m^2	30.07	29.47	30.38	30.47
采伐后胸高断面积/m^2	30.07	24.39	19.83	14.67
采伐前郁闭度	0.9	0.9	0.9	0.9
采伐后郁闭度	0.9	0.8	0.6	0.5

注：CK 为对照，LT 为轻度采伐，MT 为中度采伐，HT 为重度采伐。

表 2　阔叶红松林森林质量评价指标体系及权重

Tab. 2　Indicators and weights for forest quality of the broad-leaf Korean pine forest

目标层	准则层	指标层	指标权重
森林质量(A)	森林生产力(B_1)	单位面积活立木蓄积(C_1)	0.119 7
		单位面积地上生物量(C_2)	0.067 0
		单位面积碳储量(C_3)	0.067 0
		土壤厚度(C_4)	0.042 1
		枯枝落叶厚度(C_5)	0.031 7
	森林群落结构(B_2)	树种组成(C_6)	0.052 7
		林层与群落结构(C_7)	0.039 2
		龄组结构(C_8)	0.039 2
		郁闭度(C_9)	0.063 6
		植被覆盖度(C_{10})	0.078 2
		平均胸径(C_{11})	0.020 1
		平均树高(C_{12})	0.016 3
	森林更新(B_3)	天然更新等级(C_{13})	0.061 4
		幼树组成状况(C_{14})	0.030 7
	多样性指标(B_4)	香农威纳指数(C_{15})	0.035 5
		辛普森指数(C_{16})	0.035 5
		目标树种比例(C_{17})	0.063 5
		珍贵树种比例(C_{18})	0.016 8
		均匀度(C_{19})	0.022 3
	森林健康(B_5)	森林灾害等级(C_{20})	0.032 5
		枯死木比例(C_{21})	0.065 0

则层中评价指标的数目。

利用黄金分割法[29]，依次为各指标赋值 1.000、0.618、0.382、0.236。根据 A 的值域范围 [0.236，1]，将其划分为 4 个等级。一级：0.820 ≤ A ≤ 1.000；二级：0.708 ≤ A < 0.820；三级：0.528 ≤ A < 0.708 和四级：0.236 ≤ A < 0.528。

1.5　数据处理

利用 Excel 软件整理数据，使用 origin 软件进行

表 3 评价指标基准值的分级量化及赋值

Tab. 3 Classification and assignment of indicator benchmark values

评价指标	等级划分标准			
	优(1.000)	良(0.618)	中(0.382)	差(0.236)
单位面积活立木蓄积(C_1)[b]/($m^3 \cdot hm^{-2}$)	≥150	100 ~ 149	50 ~100	< 50
单位面积地上生物量(C_2)[d]/($kg \cdot hm^{-2}$)	> 280 000	180 000 ~ 280 000	100 000 ~ 180 000	< 100 000
单位面积碳储量(C_3)[d]/($kg \cdot hm^{-2}$)	> 120 000	79 000 ~ 120 000	45 000 ~ 79 000	< 45 000
土壤厚度(C_4)[a]/cm	≥60	45 ~ 60	30 ~ 45	< 30
枯枝落叶厚度(C_5)[a]/cm	> 10	7 ~ 10	5 ~7	< 5
树种组成(C_6)[a]	优势树种明显、多个伴生树种	有优势种、少数伴生树种	一个优势树种、一个伴生树种	无优势树种或者单种
林层与群落结构(C_7)[a]	具有乔木层、灌木层、草本层和地被物层等完整结构	具有乔木层和其他两个下木层的较完整结构	具有乔木层和其他一个下木层的结构	只有一个乔木层简单结构
龄组结构(C_8)[a]	成熟林	近熟林	中龄林	过熟林，幼龄林
郁闭度(C_9)[a]	≥0.7	0.5 ~ 0.7	0.3 ~ 0.5	0.2 ~ 0.3
植被覆盖度(C_{10})[a]/%	≥70	60 ~ 70	50 ~ 60	< 50
平均胸径(C_{11})[a]/cm	≥29.0	17.0 ~ 29.0	5.0 ~ 17.0	< 5.0
平均树高(C_{12})[a]/m	≥16.0	10.0 ~ 16.0	4.0 ~10.0	< 4.0
天然更新(C_{13})[d]/($株 \cdot hm^{-2}$)	幼树株数 > 3 500	1 800 < 幼树株数≤ 3 500	500 < 幼树株数≤ 1 800	幼树株数≤500
幼树组成状况(C_{14})[a]	有建群种幼树且占优势	有建群种幼树但优势不明显	有建群种幼树但不占优势	无建群种幼树
香农威纳指数(C_{15})[a]	> 2.5	2.0 ~ 2.5	1.0 ~ 2.0	< 1.0
辛普森指数(C_{16})[d]	< 0.120	0.120 ~ 0.152	0.152 ~ 0.220	> 0.220
目标树种比例(C_{17})[a]/%	≥70	50 ~ 70	30 ~ 50	< 30
珍贵树种比例(C_{18})[a]/%	≥30	15 ~ 30	1 ~ 15	＜1
均匀度(C_{19})[a]	≥0.80	0.70 ~ 0.80	0.50 ~ 0.70	< 0.50
森林灾害等级(C_{20})[a]	未成灾	轻	中	重
死亡木和濒死木比例(C_{21})[c]	< 20%	20% ~ 30%	30% ~ 40%	≥40%

注：a指标基准值来自《森林资源规划设计调查技术规程》与《森林生态质量监测指标体系及技术规范》；b指标基准值来自《森林资源连续清查技术规程》；c指标基准值来自《退化林修复技术规程》；d指标基准值通过*K*-均值聚类法划分等级。

数据计算并绘制图表，采用 SPSS 22.0 软件进行 one-way ANOVA(单因素方差分析)，并用 LSD(最小显著差异法)进行多重比较($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 森林群落结构、更新及物种多样性

采伐 12 年后，4 种处理的森林群落结构(郁闭度、植被覆盖度)差异不显著(表 4，$P > 0.05$)；而物种多样性指标物种丰富度、Shannon-Wiener 指数、均匀度指数等差异明显。其中，HT 处理的物种丰富度显著高于其他处理($P < 0.05$)，但其均匀度指数最低，且显著低于 LT 处理($P < 0.05$)。Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数方面，均以 LT 处理最高，但与其他处理无显著差异($P > 0.05$)。与采伐前相比，高价值目标树种(黄檗、水曲柳、胡桃楸等)占比以 MT 处理最高，提升了 8.95%，且显著高于 CK 和 HT 处理($P < 0.05$)，而 HT 的目标树种占比减少了 1.19%。

由表 5 可知，采伐前森林结构评级仅 CK 处理为一级，其余 3 种处理均为二级。采伐后，MT、HT 处理林分的森林结构指数下降，但 MT 处理仍维持二级；LT 处理结构指数无变化。HT 处理结构评级由二级降至三级，采伐 2 年后恢复为二级，恢复至伐前水平约需 7 年。伐前物种多样性评级 CK、LT 处理为三级，MT、HT 处理为一级。采伐后 HT 处理降至三级；经 12 年恢复，CK 处理升至二级，LT 处理升至一级，MT 处理始终保持一级，而 HT 处理未恢复至伐前一级水平。采伐前 4 种处理森林更新等级均为四级，且采伐后 4 年内无变化。采伐后第 7 年，CK、LT、MT 处理升至三级；第 10 年 HT 处理升至一级；第 12 年 LT 处理升至二级，MT 处理升至一级，

表 4　采伐 12 年后森林群落结构及物种多样性变化

Tab. 4　Changes in forest community structure and species diversity after 12 years of thinning

处理	郁闭度	植被覆盖度	目标树种比例	物种丰富度	Shannon-Wiener指数	Simpson指数	均匀度指数
CK	0.8 ± 0.1a	0.9 ± 0.0a	0.59 ± 0.01c	15 ± 2c	2.57 ± 0.08a	0.16 ± 0.01a	0.76 ± 0.01ab
LT	0.9 ± 0.0a	0.9 ± 0.0a	0.73 ± 0.06ab	18 ± 2bc	2.67 ± 0.07a	0.16 ± 0.05a	0.82 ± 0.06a
MT	0.9 ± 0.0a	0.9 ± 0.0a	0.81 ± 0.07a	21 ± 4b	2.64 ± 0.08a	0.16 ± 0.03a	0.78 ± 0.06ab
HT	0.9 ± 0.0a	0.9 ± 0.0a	0.69 ± 0.03b	26 ± 1a	2.64 ± 0.08a	0.17 ± 0.01a	0.72 ± 0.01b

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

表 5　阔叶红松林质量等级状况动态变化

Tab. 5　Dynamic changes of the quality grades of the broad-leaf Korean pine forest

时间	伐后时间/a		CK	LT	MT	HT
采伐前		森林生产力(B_1)	0.770(二级)	0.848(一级)	0.926(一级)	0.770(二级)
		森林结构(B_2)	0.826(一级)	0.815(二级)	0.815(二级)	0.815(二级)
		森林更新(B_3)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)
		多样性指标(B_4)	0.655(三级)	0.696(三级)	0.914(一级)	0.823(一级)
		森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2011年		森林生产力(B_1)	0.721(二级)	0.534(三级)	0.534(三级)	0.388(四级)
		森林结构(B_2)	0.826(一级)	0.815(二级)	0.747(二级)	0.640(三级)
		森林更新(B_3)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)
		多样性指标(B_4)	0.655(三级)	0.758(二级)	0.885(一级)	0.618(三级)
		森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2013年	2	森林生产力(B_1)	0.721(二级)	0.534(三级)	0.534(三级)	0.388(四级)
	2	森林结构(B_2)	0.826(一级)	0.826(一级)	0.747(二级)	0.734(二级)
	2	森林更新(B_3)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)
	2	多样性指标(B_4)	0.655(三级)	0.758(二级)	0.885(一级)	0.618(三级)
	2	森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2015年	4	森林生产力(B_1)	0.770(二级)	0.534(三级)	0.534(三级)	0.388(四级)
	4	森林结构(B_2)	0.826(一级)	0.892(一级)	0.747(二级)	0.747(二级)
	4	森林更新(B_3)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)	0.491(四级)
	4	多样性指标(B_4)	0.607(三级)	0.795(二级)	0.885(一级)	0.667(三级)
	4	森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2018年	7	森林生产力(B_1)	0.926(一级)	0.770(二级)	0.770(二级)	0.474(四级)
	7	森林结构(B_2)	0.815(二级)	0.892(一级)	0.815(二级)	0.815(二级)
	7	森林更新(B_3)	0.588(三级)	0.588(三级)	0.618(三级)	0.491(四级)
	7	多样性指标(B_4)	0.811(二级)	0.951(一级)	0.951(一级)	0.774(二级)
	7	森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2021年	10	森林生产力(B_1)	0.926(一级)	0.770(二级)	0.770(二级)	0.534(三级)
	10	森林结构(B_2)	0.815(二级)	0.892(一级)	0.892(一级)	0.815(二级)
	10	森林更新(B_3)	0.588(三级)	0.588(三级)	0.618(三级)	0.873(一级)
	10	多样性指标(B_4)	0.811(一级)	0.914(一级)	0.951(一级)	0.774(二级)
	10	森林健康(B_5)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)	1.000(一级)
2023年	12	森林生产力(B_1)	0.926(一级)	0.926(一级)	0.770(二级)	0.770(二级)
	12	森林结构(B_2)	0.826(一级)	0.892(一级)	0.892(一级)	0.892(一级)
	12	森林更新(B_3)	0.588(三级)	0.745(二级)	0.873(一级)	0.873(一级)
	12	多样性指标(B_4)	0.811(二级)	0.914(一级)	0.914(一级)	0.666(三级)
	12	森林健康(B_5)	0.745(二级)	1.000(一级)	0.745(二级)	0.745(二级)

CK 处理仍为三级。

2.2 森林生产力与森林健康

采伐 12 年后，CK 处理平均胸径显著大于 MT、HT 处理（表 6，$P < 0.05$）；CK、LT 处理的平均胸径和平均树高均显著大于 HT 处理（$P < 0.05$）。采伐后 12 年内，4 种处理的林分碳储量与生物量年均增长量变化趋势一致，其中 LT 处理的蓄积量、碳储量及生物量年均增长量均最高。次生阔叶红松林经不同强度采伐后 12 年内的生产力动态变化如表 5 所示。采伐前，4 种处理的森林生产力评级分别为 CK（二级）、LT（一级）、MT（一级）、HT（二级），且林分蓄积量均在 150 m^3 以上。采伐后，除 CK 处理外，LT、MT、HT 处理生产力评级均下降，分别降至三级、三级、四级。此外，采伐前后 12 年内，4 种处理的土壤厚度（均 > 60 cm，评级为优）和枯枝落叶厚度（均 < 5 cm，评级为差）均无明显变化。生产力恢复方面，HT 处理自采伐后 7 年起快速上升，12 年后恢复至伐前水平；LT 处理 12 年后恢复至一级，且优于伐前水平；MT 处理 12 年后仍未恢复至伐前水平。

森林健康状况显示：采伐前 4 块样地健康评级均为一级，且采伐后 10 年内均维持一级（表 5）。但随森林更新推进及林分密度增加，4 种处理的枯死木比例逐渐升高，采伐后第 12 年，CK、MT 和 HT 处理健康等级降至二级，LT 处理仍保持一级。

2.3 次生阔叶红松林森林质量

次生阔叶红松林森林质量的变化动态呈现阶段性特征（图 1）。采伐前，MT 处理森林质量评级为一级（指数 0.837）；CK、LT、HT 处理均为二级，指数分别为 0.745、0.774、0.770。采伐后，除 CK 处理外，其余处理森林质量指数均显著下降：HT 处理降幅最大（27.9%），评级降至三级；LT、MT 处理分别下降 10.2%、18.4%，评级均降至三级。

采伐后 4 年内，CK、MT 处理指数变化不明显；HT 处理小幅上升，LT 处理评级回升至二级；采伐后 4 ~ 7 年，4 种处理指数均快速上升，采伐后第 7 年 CK、LT、MT 处理评级升至一级，其中 CK、LT 处理指数恢复至伐前水平，较伐前分别提升 10.6%、7.1%；采伐后 7 ~ 12 年，CK 处理指数呈下降趋势，LT、HT 处理仍保持快速上升。采伐后第 12 年，LT 处理森林质量指数达 0.888，为 4 种处理中最高；与采伐前相比，4 种处理指数均有提升，其中 LT 处理增幅最大（14.7%）。LT 处理 5 项森林质量指标评分均处于较高水平，仅森林更新指标评分为 0.745，其余 4 项指标评级均为一级；CK 处理森林更新与结构指标评分偏低；MT 处理生产力与森林健康指标评分较低；HT 处理生产力与多样性指标评分较低（图 2）。

3 讨 论

3.1 采伐强度对森林生产力、森林结构等指标影响

在本研究构建的森林质量评价指标体系中，不同维度指标对采伐强度的响应存在显著差异，其中森林生产力、森林结构、森林更新及多样性指标对采伐干扰的敏感性较强，而森林健康指标的响应则不明显。

从森林生产力指标来看，单位面积活立木蓄积作为核心表征指标，其短期动态变化与采伐强度呈现显著关联，即采伐强度越大，短期内蓄积量下降越明显，这与李明鲁等[23]针对次生针阔混交林的研究结论一致。但从长期恢复进程分析，采伐后第 7 年成为关键转折点，LT（15%）和 MT（30%）处理的蓄积量均恢复至伐前水平，HT（50%）处理的森林生产力也进入快速增长阶段，这与 Thorpe 等[30]提出的“采伐后 3 ~ 9 年为林木快速生长期”的结论一致。另外在 3 种不同强度的采伐处理下，12 年后森林生产力均能恢复至接近伐前水平但存在明显差异，LT 处理的生产力提升最为显著，不仅蓄积量超越伐前，生物量与碳储量也同步增长，且恢复至原始水平；HT 处理的蓄积量年均增长量、生物量及碳储量年均增长量均为最低，且低于 CK 处理，这充分说明 50% 的高强度采伐对森林生产力的长期促进作用有限，甚至可能因初始干扰过大而制约生态系统的物质循环与能量积累效率。

森林结构对采伐强度的响应方面，LT 处理与 CK 处理的森林结构在 12 年监测期内未发生明显变化，表明轻度采伐对群落结构的稳定性影响极小；而中、高强度采伐在短期内显著降低了森林结构指数：

表 6 采伐 12 年后森林生产力变化

Tab. 6 Changes in forest productivity after 12 years of thinning

处理	平均胸径/cm	平均树高/m	总蓄积量/（$m^3 \cdot hm^{-2}$）	蓄积量年均增长量/m^3	生物量年均增长量/kg	碳储量年均增长量/kg	枯死木比例
CK	13.71 ± 1.42a	10.34 ± 1.13a	267.5 ± 35.7a	9.37 ± 2.78a	8 087.5 ± 1 840.1a	3 677.2 ± 820.3a	0.288 ± 0.067a
LT	12.89 ± 3.61ab	9.73 ± 2.76a	273.7 ± 30.1a	12.59 ± 3.07a	12 732.7 ± 3 470.0a	5 988.5 ± 2 421.7a	0.174 ± 0.029a
MT	8.64 ± 2.66bc	7.17 ± 1.20ab	227.6 ± 46.9a	9.37 ± 2.67a	8 627.3 ± 2 488.5a	4 157.0 ± 1 222.2a	0.229 ± 0.115a
HT	4.91 ± 1.42c	5.24 ± 1.03b	153.4 ± 27.0b	8.74 ± 1.52a	6 497.8 ± 590.4a	3 136.2 ± 360.4a	0.272 ± 0.071a

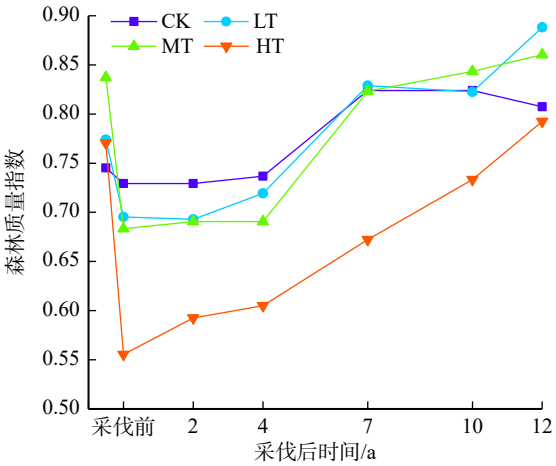
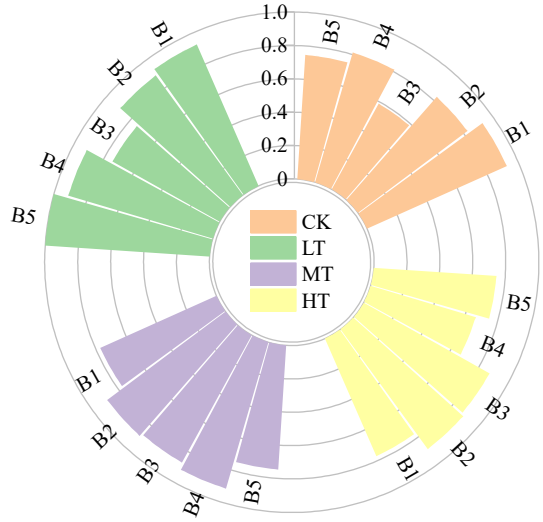


图 1　森林质量指数动态变化

Fig. 1　Dynamic changes of the forest quality index



B1、B2、B3、B4、B5分别代表森林生产力、森林结构、森林更新、物种多样性及森林健康。

图 2　各林分森林质量评分状况

Fig. 2　Forest quality rating status of each forest stand

HT 处理的森林结构评级由伐前二级降至三级，MT 处理的郁闭度、HT 处理的郁闭度及植被覆盖度均较 CK 和 LT 处理呈现显著下降（$P < 0.05$）。但值得注意的是，这种短期负面影响的恢复速度较快，采伐后仅两年，4 种处理的植被覆盖度差异已不显著，MT 和 HT 处理的森林结构评级也上升至二级，体现了森林群落对中度干扰的较强恢复能力。从长期效应来看，除 CK 处理外，LT、MT、HT3 种采伐处理的森林群落结构指数均由伐前的 0.815 提升至 0.892，即通过合理移除劣质木、过密木，能够改善林分空间配置，为保留木的生长创造更有利的环境条件，进而提升群落结构的合理性与稳定性[31]。

抚育采伐对林下幼苗更新具有显著促进作用，其中轻度采伐（LT）与重度采伐（HT）对幼苗数量增加的影响尤为明显[32]。董希斌等[33]通过构建采伐强度与林分更新株数的数学模型，提出红松针阔混交林在 25% 左右采伐强度下伐后更新效果最优。本研究进一步验证了这一规律，采伐后第 7 年，MT 处理的森林更新指数从 0.491 提升至 0.618；至采伐后第 12 年，LT 与 HT 处理的更新等级也均实现提升，且整体表现优于 CK 处理，表明 30% 采伐更能促进森林更新，同时中高强度采伐会形成更大的林下空间，虽能显著增加幼树数量，但幼树对病虫害及极端环境的抗逆性较弱[34]，进而导致其枯死率相对更高。

在物种多样性指标响应方面，LT 与 MT 处理下，Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数在采伐后第 12 年均超过伐前水平，且其 Shannon-Wiener 指数均高于 CK 处理。这一结果充分说明，轻、中度采伐可有效促进物种数量增加[35]，而 HT 处理虽能明显提升物种丰富度，但均匀度指数最低且低于 CK 处理，推测其原因可能是高强度采伐能够增大林下空间，改善更新条件，但某些阳性物种进入林分后优势度过大，影响了其他物种生长，导致物种均匀度降低[23]。从长期恢复效果来看，采伐后第 12 年，MT 处理的物种多样性评级恢复至一级，LT 处理从伐前的三级升至一级，而 HT 处理由于阳性树种的大量入侵导致物种均匀度下降，目标树种比例下降，故多样性评级在观测期内未能恢复至伐前的一级水平，这表明轻、中度采伐对物种多样性具有显著促进作用[36]。

3.2　采伐强度对次生阔叶红松林森林质量的影响

森林质量方面，采伐前除 MT 外其余 3 种处理森林质量相差不大。采伐即时复测，4 种处理的森林质量指数依次为 CK（0.729）、LT（0.695），MT（0.683），HT（0.555），CK 处理森林质量评级为二级不变，其余均降为三级。经过 12 年恢复期后，4 种处理的森林质量指数依次为 CK（0.808）、LT（0.888）、MT（0.860）、HT（0.793），除 HT 处理森林质量为二级，其余均提升至一级，表明高强度的采伐会对森林生态系统的功能和结构产生较大影响，使森林质量大幅下降，并在短时间内无法恢复。CK 处理在采伐当年由于病虫害等原因林分中枯死木增加，生物量和碳储量减少，森林质量指数轻微下降，采伐 12 年后森林质量指数有所提升但幅度不大。与对照样地相比，LT 处理下的林分森林质量的提升幅度更大，恢复速度更快（图 1）。与采伐前相比 LT 处理下的林分森林质量指数的提升也最大（14.7%），表明轻中度采伐对森林质量有促进作用。

本研究通过 12 年长期监测发现，经过采伐处理后短期内林分的各种指标变化均不明显，森林质量的变化不大，而采伐处理 4 年以后林分的各种指标快速变化，体现出树木生长对采伐的响应存在滞后性，这与魏龙鑫等[37]的研究结果相符。

在目标树种响应方面，MT 处理（30% 采伐强度）下目标树种蓄积量占比的增长幅度最大，这与孙楠等[38]研究结果一致，这可能是由于中度采伐移除了一部分白桦等先锋树种，导致林分密度降低，使得红松、水曲柳和胡桃楸等保留的目标树种获得了更多的光照和水分，促进了目标树种的生长。然而，重度采伐在增加光照的同时也提高了环境的温度，导致水分的大量蒸发[39]，使一些保留下来的目标树种因为干旱的生活条件而死亡或者生长受到抑制，导致目标树种的蓄积量占比下降。尽管 MT 处理在促进森林更新和高价值树种生长方面表现突出，但综合来看，LT 处理（15% 采伐强度）的综合效益更优：其不仅使森林生态系统的恢复速度更快，还能同步显著促进森林生产力提升、物种多样性增加及森林更新优化，最终森林质量指数达到所有处理中的最高水平。因此，针对东北地区次生阔叶红松林，若以提升森林综合质量为核心目标，抚育采伐强度应控制在 15% 左右，这一结论与以往东北地区森林恢复研究[23]中提出的最佳采伐强度范围基本一致，进一步验证了该采伐强度的科学性与适用性。

本研究构建了包含 21 项指标的次生阔叶红松林质量评价体系，能够有效区分不同采伐强度、不同恢复时期的林分质量等级，为精准评估次生阔叶红松林质量现状及对采伐干扰的长期动态响应提供了科学支撑。相较于以往同类评价体系，该体系指标涵盖森林生产力、群落结构、更新状况、物种多样性及森林健康五大核心维度，数量更丰富、覆盖更全面，能更系统地反映森林生态系统的综合质量；在时间尺度上，本研究覆盖了 12 年的恢复期，延长观测周期，提升了评价结果的精度与准确性，为后续同类研究提供了更可靠的参考。

4 结　　论

次生阔叶红松林森林质量恢复呈现明显阶段性，采伐后前 4 年变化平缓，4～7 年进入快速恢复阶段。轻度采伐（15%）对提升森林质量具有更强的适用性，伐后 12 年恢复期内在年均蓄积量增长、枯死木比例控制、森林更新、物种多样性及森林健康等指标上均表现最优，且恢复速度最快。中度采伐（30%）能最大程度提高目标树种蓄积量占比（提升 8.95%），利于木材资源利用，但森林生产力恢复较慢，12 年后仍未回到伐前水平；重度采伐（50%）对森林生态系统干扰最大，短期内导致生产力、群落结构及物种多样性显著下降，虽能促进森林更新，但 12 年后森林质量指数仅恢复至伐前水平，且物种多样性未完全恢复。针对东北地区次生阔叶红松林，建议采用 15% 左右轻度采伐优化林分结构，未来需建立长期监测机制，针对不同恢复阶段动态调整管理策略，为次生阔叶红松林可持续经营提供科学参考。

参 考 文 献

[1] 冯继广, 王景升, 姚帅臣, 等. 基于因子分析的森林资源质量综合评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 27−32,42.
Feng J G, Wang J S, Yao S C, et al. Comprehensive evaluation of forest resources quality based on factor analysis [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1): 27−32,42.

[2] 邹文涛, 李婷婷, 辛绍钢. 森林质量评价指标体系构建及评估 [J]. 林业科技通讯, 2024(9): 7−10.
Zou W T, Li T T, Xin S G. Construction and evaluation of forest quality evaluation index system [J]. Forest Science and Technology, 2024(9): 7−10.

[3] 邹文涛, 陈绍志, 方庆, 等. 中国森林质量评价指标研究进展 [J]. 世界林业研究, 2024, 37(5): 67−72.
Zou W T, Chen S Z, Fang Q, et al. Research advances in China's forest quality evaluation indicators [J]. World Forestry Research, 2024, 37(5): 67−72.

[4] 李建, 彭鹏, 何怀江, 等. 采伐对吉林蛟河针阔混交林空间结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(9): 48−57.
Li J, Peng P, He H J, et al. Effects of thinning intensity on spatial structure of multi-species temperate forest at Jiaohe in Jilin Province, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(9): 48−57.

[5] 陈辉荣, 周新年, 蔡瑞添, 等. 天然林不同强度择伐后林分空间结构变化动态 [J]. 植物科学学报, 2012, 30(3): 230−237.
Chen H R, Zhou X N, Cai R T, et al. Tracking analysis of forest spatial structure change after different selective cutting intensities in a natural forest [J]. Plant Science Journal, 2012, 30(3): 230−237.

[6] 梅浩, 佘宇晨, 陆翔. 基于小班尺度的生态公益林质量评价指标筛选研究 [J]. 中南林业科技大学学报, 2019, 39(11): 14−22.
Mei H, She Y C, Lu X. Study on the quality assessment index selection of ecological public-welfare forests based on subcompartment scale [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2019, 39(11): 14−22.

[7] 赵海兰, 菅宁红, 刘珉, 等. 森林质量精准提升工程进展、监测与评价：以四川省乐山市为例 [J]. 西部林业科学, 2022, 51(6): 101−107.
Zhao H L, Jian N H, Liu M, et al. Progress, monitoring and evaluation of the accurate improvement project of forest quality: Taking Leshan City, Sichuan Province as an example [J]. Journal of West China Forestry Science, 2022, 51(6): 101−107.

[8] 朱教君, 刘足根. 森林干扰生态研究 [J]. 应用生态学报, 2004, 15(10): 1703−1710.
Zhu J J, Liu Z G. A review on disturbance ecology of forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(10): 1703−1710.

[9] Zhou D, Zhao S Q, Liu S, et al. A meta-analysis on the impacts of partial cutting on forest structure and carbon storage [J].

Biogeosciences, 2013, 10(6): 3691−3703.

[10] 周梦丽, 张青, 亢新刚, 等. 不同采伐强度对云冷杉天然林主要针叶树种生长的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2015, 43(7): 7−10,30.
Zhou M L, Zhang Q, Kang X G, et al. Effects of different cuttings on growth of primary coniferous species in natural spruce-fir forest [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2015, 43(7): 7−10,30.

[11] Geng Y, Yue Q, Zhang C, et al. Dynamics and drivers of aboveground biomass accumulation during recovery from selective harvesting in an uneven-aged forest [J]. European Journal of Forest Research, 2021, 140(5): 1163−1178.

[12] 刘相兵, 刘亚茜, 李兵兵, 等. 生态疏伐对林分密度及直径结构的影响 [J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 145−149.
Liu X B, Liu Y (Q /X), Li B B, et al. Influences of ecological thinning on the stand density and diameter structure [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3): 145−149.

[13] 苏文会, 朱晓武, 范少辉, 等. 采伐对森林生态系统的影响综述 [J]. 林业资源管理, 2017(3): 35−40.
Su W H, Zhu X W, Fan S H, et al. Review of effects of harvesting on forest ecosystem [J]. Forest Resources Management, 2017(3): 35−40.

[14] 李仲芳, 王刚. 种内竞争对一年生植物高生长与生物量关系的影响 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2002, 38(2): 141−146.
Li Z F, Wang G. The effects of intraspecific competition on the relationship between height growth and biomass of annual plants [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2002, 38(2): 141−146.

[15] 欧江, 张捷, 崔宁洁, 等. 采伐林窗对马尾松人工林土壤微生物生物量的初期影响 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2036−2047.
Ou J, Zhang J, Cui N J, et al. The early effects of forest gap harvesting on soil microbial biomass in Pinus massoniana plantations [J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2036−2047.

[16] Peng C, Zhou X, Zhao S, et al. Quantifying the response of forest carbon balance to future climate change in Northeastern China: model validation and prediction [J]. Global and Planetary Change, 2009, 66(3−4): 179−194.

[17] 于大炮, 周旺明, 周莉, 等. 长白山区阔叶红松林经营历史与研究历程 [J]. 应用生态学报, 2019, 30(5): 1426−1434.
Yu D P, Zhou W M, Zhou L, et al. Exploring the history of the management theory and technology of broad-leaved Korean pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) forest in Changbai Mountain Region, Northeast China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(5): 1426−1434.

[18] Yue Q, Geng Y, von Gadow K, et al. Effects of neighborhood interaction on tree growth in a temperate forest following selection harvesting [J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108663.

[19] 吴志军, 苏东凯, 牛丽君, 等. 阔叶红松林森林资源可持续利用方案 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 24−30.
Wu Z J, Su D K, Niu L J, et al. Evaluation of a sustainable forest utilization program for broadleaved Korean pine mixed forests in the Changbai Mountain region of Northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 24−30.

[20] 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.

[21] 王惠, 李倩, 韩雪梅, 等. 采伐干扰下长白山阔叶红松林优势树种生态位变化动态 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(10): 18−20,53.
Wang H, Li Q, Han X M, et al. Effect of harvesting on niche dynamics of main arborous species in broadleaved-Korean pine mixed forests in Changbai Mountain [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(10): 18−20,53.

[22] 刘晨, 张春雨, 赵秀海. 采伐干扰对吉林蛟河针阔混交林生产力稳定性的影响 [J]. 林业科学, 2022, 58(3): 1−9.
Liu C, Zhang C Y, Zhao X H. Effects of disturtance by thinning on productivity stability of conifer−broadleaf mixed forest in Jiaohe, Jilin Province [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2022, 58(3): 1−9.

[23] 李明鲁, 吴兆飞, 邱华, 等. 采伐对吉林蛟河阔叶红松林生态功能的短期影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(9): 40−49.
Li M L, Wu Z F, Qiu H, et al. Short−term effects of tending felling on ecological services of mixed broadleaved−Korean pine forests at Jiaohe in Jilin Province, northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(9): 40−49.

[24] 梁晶文, 翟凯涛, 李静, 等. 大兴安岭次生林森林生态系统健康评价研究 [J]. 西南林业大学学报, 2024, 44(11): 98−106.
Liang J W, Zhai K T, Li J, et al. Study on forest ecosystem health evaluation of secondary forest in the greater Hinggan Mountains [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2024, 44(11): 98−106.

[25] GB/T 26424—2010 森林资源规划设计调查技术规程 [S].
GB/T 26424−2010 Technical regulations for inventory for forest management planning and design[S].

[26] 20171243-T—432 森林资源连续清查技术规程 [S].
20171243-T−432 Technical regulations for continuous forest inventory[S].

[27] T/CSF 002—2021 森林生态质量监测指标体系及技术规范 [S].
T/CSF 002−2021 Monitoring indicator system and technological specification of forest ecological quality[S].

[28] GB/T 44351—2024 退化林修复技术规程 [S].
GB/T 44351—2024 Code of practice for degraded forest remediation and restoration[S].

[29] 李霄宇. 国家级森林类型自然保护区保护价值评价及合理布局研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011.
Li X Y. Conservation value evaluation and reasonable distribution of national nature reserve for forest[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011.

[30] Thorpe H C, Thomas S C, Caspersen J P. Residual−tree growth

responses to partial stand harvest in the black spruce(*Picea mariana*) boreal forest [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2007, 37(9): 1563−1571.

[31] Curzon M T, D'Amato A W, Fraver S, et al. Harvesting influences functional identity and diversity over time in forests of the northeastern USA [J]. Forest Ecology and Management, 2017, 400: 93−99.

[32] 米爽, 宋子龙, 秦江环, 等. 抚育采伐对吉林蛟河针阔混交林幼苗更新的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5): 159−169.
Mi S, Song Z L, Qin J H, et al. Effects of tending thinning on seedling regeneration in a mixed conifer−broadleaf forest in Jiaohe, Jilin Province of northeastern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 159−169.

[33] 董希斌, 王立海. 采伐强度对林分蓄积生长量与更新影响的研究 [J]. 林业科学, 2003, 39(6): 122−125.
Dong X B, Wang L H. Impacts of cutting intensity on volume increment and regeneration of different forests [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(6): 122−125.

[34] 张晓, 潘磊磊, Semyung Kwon, 等. 沙地天然樟子松径向生长对干旱的响应 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 27−35.
Zhang X, Pan L L, Kwon S, et al. Climatological response of radial growth for Pinus sylvestris var. mongolica to drought in Hulun Buir Sandland, Inner Mongolia of northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(7): 27−35.

[35] 龚固堂, 牛牧, 慕长龙, 等. 间伐强度对柏木人工林生长及林下植物的影响 [J]. 林业科学, 2015, 51(4): 8−15.
Gong G T, Niu M, Mu C L, et al. Impacts of different thinning intensities on growth of *Cupressus funebris* plantation and understory plants [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(4): 8−15.

[36] 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 broad-leaved forest in northeastern China [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(2): 1−12.

[37] 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.

[38] 孙楠, 李兴安, 张怡春. 采伐强度对水胡黄硬阔叶混交林主要树种及林下更新生长的影响 [J]. 林业科技, 2015, 40(1): 30−33.
Sun N, Li X A, Zhang Y C. Effects of logging intensity on dominant tree species and understory regeneration growth in Fraxinus mandshurica, Juglans mandshurica, and Phellodendron amurense mixed hardwood forests [J]. Forestry Technology, 2015, 40(1): 30−33.

[39] Bataineh M, Kenefic L, Weiskittel A, et al. Influence of partial harvesting and site factors on the abundance and composition of natural regeneration in the Acadian Forest of Maine, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 306: 96−106.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 张会儒）