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

间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响

邵曦媛 彭道黎 王程

Influence of thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations

Shao Xiyuan, Peng Daoli, Wang Cheng

引用本文:
邵曦媛, 彭道黎, 王程. 间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(4):116-124. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250393
Shao Xiyuan, Peng Daoli, Wang Cheng. Influence of thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4):116-124. doi: 10.12171/j.1000-1522.20250393

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250393

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

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

北京林业大学学报, 2025, 47(11): 48-57. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20250239

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

兴安落叶松人工林空间结构优化

Spatial structure optimal of *Larix gmelinii* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(4): 68-76. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20200228

庐山常绿阔叶林不同生长阶段林木空间结构特征及其评价

Spatial structure characteristics and its evaluation of evergreen broadleaved forest at different growth stages in Lushan Mountain, Jiangxi Province of eastern China

北京林业大学学报, 2022, 44(12): 32-40. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20210450

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

近自然森林景观空间结构参数化设计研究

Parametric design of close-to-nature forest landscape spatial structure

北京林业大学学报, 2023, 45(6): 100-107. https://doi.org/10.12171/j.1000-1522.20220010

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250393

间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响

邵曦媛　彭道黎　王　程
（北京林业大学森林资源和环境管理国家林业和草原局重点实验室，北京 100083）

摘要:【目的】分析间伐对华北落叶松人工林林分结构的调控效应，明确中龄林的最优间伐强度，为区域人工林的结构优化与质量提升提供科学依据。**【方法】**以河北省塞罕坝机械林场 12 块华北落叶松中龄林（28 a）标准样地为研究对象，设置 4 种处理：对照（CK，0% 间伐）、轻度间伐（LT，21% 间伐）、中度间伐（MT，40% 间伐）及重度间伐（HT，56% 间伐），系统量化间伐对非空间与空间结构中 11 个结构因子的驱动作用，基于熵权−乘除耦合模型构建林分结构评价指数（FSSI），评估不同间伐处理的综合效应。**【结果】**（1）与对照 CK 相比，间伐显著提高了林分的胸径、树高、冠幅及生产力，各指标增长幅度存在差异。（2）MT 与 HT 显著降低了林分的竞争指数与林层指数，但各处理对角尺度、密集度、大小比数及叶面积指数均无显著影响。（3）11 项结构指标中林层指数权重最高（18.39%），大小比数最低（3.96%）；FSSI 随间伐强度呈先升后降趋势，MT 处理最高（0.46），表明该处理林分综合结构最优。**【结论】**40% 中度间伐在促进保留木生长与控制立木损失间达到最佳平衡，是华北落叶松人工林结构调控的最佳阈值，可为该地区的森林可持续经营提供量化依据。

关键词：华北落叶松；间伐；非空间结构；空间结构；林分结构评价
中图分类号：S791.22　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)04−0116−09
引文格式：邵曦媛，彭道黎，王程. 间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(4)：116−124. Shao Xiyuan, Peng Daoli, Wang Cheng. Influence of thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(4): 116−124.

Influence of thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations

Shao Xiyuan　Peng Daoli　Wang Cheng
(Key Laboratory of Forest Resources & Environmental Management of National Forestry and Grassland Administration, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract:［**Objective**］This study aimed to analyze the regulatory effects of thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations, identify the optimal thinning intensity for middle-aged stands, and provide a scientific basis for the structural optimization and quality improvement of regional plantations.［**Method**］Taking twelve standard sample plots of *Larix principis-rupprechtii* middle-aged stands (28 a) in Saihanba Mechanical Forest Farm of Hebei Province as the research objects, four treatments were set up: control (CK, 0% thinning), light thinning (LT, 21% thinning), moderate thinning (MT, 40% thinning), and heavy thinning (HT, 56% thinning). The driving effects of thinning on 11 structural factors in both non-spatial and spatial stand structures were systematically quantified. Based on the entropy weight-multiplication and division coupling model, the forest stand structure index (FSSI) was established to evaluate the comprehensive effects of different thinning treatments.［**Result**］(1) Compared with the control, thinning treatments significantly increased the diameter at breast height, tree height, crown width, and

收稿日期: 2025−10−13　**修回日期:** 2025−12−03
基金项目: 国家重点研发计划 (2023YFD2200403)。
第一作者: 邵曦媛。主要研究方向：森林经营理论与技术。Email: 3278802549@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: 彭道黎，博士生导师，教授。主要研究方向：森林资源监测与评价。Email: dlpeng@bjfu.edu.cn　地址：同上。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

productivity of the stand, and the magnitudes of increase varied among these indicators. (2) MT and HT significantly reduced the competition index and stand layer index of the stand, while all treatments had no significant effect on the uniform angle index, crowding degree, neighborhood comparison, and leaf area index. (3) Among the 11 structural indicators, the stand layer index had the highest weight (18.39%), while the neighborhood comparison had the lowest (3.96%). The FSSI first increased and then decreased with increasing thinning intensity, reaching the maximum value (0.46) under the moderate thinning, indicating that this treatment yielded the optimal comprehensive stand structure. [**Conclusion**] Moderate thinning at 40% intensity achieved the best balance between promoting the growth of residual trees and controlling stand volume loss, and thus represents the optimal threshold for structural regulation in *Larix principis-rupprechtii* plantations. These results can provide a quantitative basis for sustainable forest management in this region.

Key words: *Larix principis-rupprechtii*; thinning; non-spatial structure; spatial structure; forest stand structure evaluation

森林是陆地生态系统的核心组成单元，在调节区域气候、维系全球碳循环平衡等方面扮演着核心角色，其状态直接关系到国家生态安全格局，并对全球经济和社会可持续发展产生深远影响[1]。在森林经营技术体系中，抚育间伐是实现林分结构精准调控的关键手段，通过科学调整林分密度，可有效优化资源（光照、水分、养分等）的空间配置格局，改善林内环境（尤其是光环境），进而促进保留木生长发育，提升林分整体质量[2]。在人工林面积持续扩大、森林质量精准提升需求日益迫切的背景下，探究间伐对林分结构的影响机制，对实现森林可持续经营具有重要现实意义。

林分结构是生态系统功能实现的基础载体，其优劣直接决定森林的稳定性与服务效能[3]。现有研究通常将林分结构划分为非空间结构与空间结构两个维度。前者表征胸径、树高、生物量等静态属性，为森林经营提供宏观上的基础数据支撑[4]；后者聚焦林木空间分布格局，涵盖树种混交、竞争与分布形式等[5−6]，是理解森林生态过程与制定结构优化措施的重要依据。二者共同构成林分结构量化描述与优化调整的核心要素[7]。在间伐效应方面，学界普遍认为，适度的间伐干预对林分生长产生正向调控作用。比如，贾忠奎等[8]针对塞罕坝华北落叶松人工林的研究表明，当间伐强度为 38.6% 时，林分生产力达峰值；张培等[9]在研究江南油杉人工林时发现，抚育间伐能显著促进林木胸径和单株材积积累。然而，现有研究多集中在评价不同类型森林结构多样性[10−11]、量化林分空间结构特征[12]、森林空间结构优化目标[13]等方面，缺乏能够耦合林分的非空间结构与空间结构的综合评价体系，难以实现结构综合效益最优的阈值确定。更为关键的是，林分结构具有多属性、多目标的复杂系统特征，传统加权求和法难以处理指标间的信息重叠与冲突性问题[13]，亟需引入能够整合正负向指标，客观赋权并解决数据压缩难题的数学方法，构建具有生态学意义的综合评价指数。

鉴于此，本研究以华北落叶松（*Larix principis-rupprechtii*）人工林为研究对象，设置间伐梯度试验，解析间伐对林分结构的调控规律，基于熵权−乘除法构建森林结构综合指数（forest structure synthesis index，FSSI），并对林分结构进行综合效应评估，确定该区结构调控的最佳强度，以期为华北落叶松的林分结构调控提供理论基础和参考依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

本研究区位于河北省承德市围场满族蒙古族自治县境内的塞罕坝机械林场（42°02′ ~ 42°36′N，116°51′ ~ 117°39′E），地处内蒙古高原与华北平原的生态交错带，属于典型的半干旱半湿润寒温性大陆季风气候，海拔 1 010 ~ 1 940 m。极端最高气温 33.4 ℃，最低气温−43.3 ℃，年均气温−1.3 ℃，年均降水量 460.3 mm，年均积雪期达 7 个月，年均无霜期 64 d[14]。作为我国北方典型的人工造林示范区，该林场的主要造林树种包括华北落叶松、樟子松（*Pinus sylvestris*）、云杉（*Picea asperata*）、白桦（*Betula platyphylla*）等[15]。

1.2　样地设置与调查

在对塞罕坝机械林场华北落叶松人工林进行全面踏查的基础上，选择立地条件基本一致的试验点。1989 年，在仅伴生少量次生杂木的沙化荒地上以 3 300 株/hm^2 的初植密度营造华北落叶松人工纯林。2002 年进行第一次抚育，2008 年在面积约 200 hm^2 的人工纯林中设立了 12 块样地（20 m × 30 m），所有样地具有相似的林分密度（平均为 2 050 株/hm^2）、地

形特征和经营管理措施。为避免边缘效应，每个样地四周设 5 m 宽的缓冲带。任意两个样地的间距小于 3 km，以确保气候、地形及土壤条件的一致性。采用综合疏伐法，按间伐株数所占比例，将 12 块样地随机分为 4 种间伐强度：对照（CK，0% 间伐）、轻度间伐（LT，21% 间伐）、中度间伐（MT，40% 间伐）及重度间伐（HT，56% 间伐），每种处理作 3 个重复。样地的基本概况见表 1。

2024 年 9 月，对样地进行信息调查。调查内容包括：详细记录每块样地的坡度、坡位、坡向、经纬度坐标与海拔等立地因子；统计样地内林木数量；对胸径≥5 cm 的活立木实施每木检尺，其中胸径使用围尺测量，树高利用 Trupulse 200 激光测距仪测定，叶面积指数通过冠层分析仪（Canon EOS 50D 数码照相机外接 Sigma EX DG 8 mm 鱼眼镜头）获取。同时用玻璃绳将样地划分为若干 5 m × 5 m 的子网格，使用卷尺测定每株林木在子网格内的相对坐标（x，y），整合得到全样地林木的空间位置数据。

1.3 年轮解析与生产力计算

1.3.1 年轮数据获取

基于林分胸径和树高调查数据，于各样地内按约 10% 的抽样比例选取标准木作为年轮条的采集对象（样木）。样木选择标准：（1）在林分平均胸径（± 10%）和平均树高（± 5%）的范围内；（2）生长状况良好（树干通直、树冠饱满），无病虫害与机械损伤；（3）尽量在样地内分布均匀，确保代表性。

调查采用生长锥（直径 5 mm）进行树芯采集，每株样木在树干 1.3 m 高度处沿相互垂直的两个方向各钻取 1 个树芯，同时尽量保证每个年轮条树皮的完整性。将采集到的样芯带回实验室后，依次进行自然晾干（避免阳光直射）、环氧树脂固定成型、砂纸精细打磨等，直至年轮纹理清晰可见。利用 TSAPWin 图像分析系统（精度 0.01 mm）测量年轮宽度，使用 COFECHA 程序对年轮宽度序列进行交叉定年检验，确保数据的准确性。树芯年轮宽度反映了树木每年的胸径增长量，可反推得到树木的历年胸径。

1.3.2 林分生产力计算

本文用 2024 年实测胸径减去近 5 年的胸径增长量，获取单木 2019 年胸径，进而计算 2019 年的单木生物量，采用近 5 年林分生物量之差的均值表征林分生产力。通过一元生物量模型获取单木生物量，林分生物量为样地内所有单木生物量的累加值，计算公式如下。

$$W_i = 0.073\,02 D_i^{2.472\,98} \tag{1}$$

$$M_k = \frac{(10\,000/600)\sum_{i=1}^{n} W_i}{1\,000} \tag{2}$$

$$N_{PP} = (M_{2024} - M_{2019})/5 \tag{3}$$

式中：W_i 为林分中第 i 株林木的生物量，D_i 为林分中第 i 株林木的胸径，M_k 为第 k 年的林分生物量，n 为样地内林木株数，M_{2024}、M_{2019} 分别为 2024 年、2019 年的林分生物量，N_{PP} 为林分生产力。

1.4 林分非空间结构指标的选取

林分结构评价中非空间结构指标的选取包括：胸径，直接反映树木径向生长状况，能够有效表征林分的基本组成和发育阶段；树高，作为反映树木垂直生长的核心指标，可揭示林分在垂直维度上的结构复杂性和立地的内在生产潜力；冠幅，表征林分水平结构上资源利用与竞争态势；生物量，综合反映林分碳储量与生态系统服务功能；生产力，表征林分生长

表 1 样地基本概况

Tab. 1 Basic overview of plots

间伐强度	林龄/a	样地号	坡度/(°)	海拔/m	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度/(株·hm^{-2})	蓄积量/(m^3·hm^{-2})
对照（CK）	28	1	2	1 630	13.9	13.8	2 167	197.65
		2	1	1 623	14.2	12.6	2 000	187.16
		3	2	1 617	14.0	11.0	1 983	178.52
21%间伐（LT）	28	4	3	1 637	16.6	13.8	1 667	237.78
		5	2	1 628	15.4	12.1	1 534	173.50
		6	3	1 625	15.6	12.2	1 650	196.51
40%间伐（MT）	28	7	2	1 657	20.5	18.2	1 217	246.25
		8	4	1 645	17.5	15.7	1 183	181.50
		9	2.5	1 643	17.1	15.0	1 284	183.72
56%间伐（HT）	28	10	2	1 657	19.0	16.9	916	172.25
		11	2	1 656	18.4	17.2	833	144.14
		12	2	1 657	18.0	16.7	950	159.20

潜力与可持续性。

1.5　林分空间结构指标的选取

参考惠刚盈等[16]提出的“1 + 4”结构，选取 6 项空间结构指标，全面表征林分空间结构特征。角尺度，量化相邻木围绕对象木的空间分布均匀性；密集度，通过对象木与相邻木的冠幅重叠度及水平距离，反映林分空间拥挤程度；大小比数，通过对比对象木和相邻木的胸径差异，表征林木大小分化程度；竞争指数，综合反映林木上方遮盖及侧方挤压程度；林层指数，量化林分垂直结构多样性；叶面积指数，反映冠层的光合能力与资源捕获效率。

1.6　林分结构参数权重的计算

采用熵权法（客观权重法）计算 11 项林分结构参数的权重[17]，具体步骤如下。

（1）定义参数：设林分结构参数数量为 m（本研究 $m = 11$），样地数量为 n（本研究 $n = 12$），x_{ij} 表示第 i（i=1，2，3，…，n）块样地的第 j（j = 1，2，3，…，m）项结构参数，其取值为样地内所有对象木对应参数的平均值。

（2）数据归一化处理：由于不同参数量纲存在差异，故需将数据进行归一化转换。正向指标（值越大越优）、负向指标（值越小越优），分别采用公式（4）、（5）转换；角尺度以接近 0.5 为优，故将该参数减去 0.5 后取绝对值。

$$g_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{1j},...,x_{nj})}{\max(x_{1j},...,x_{nj}) - \min(x_{1j},...,x_{nj})} \tag{4}$$

$$g_{ij} = \frac{\max\left(x_{1j},...,x_{nj}\right) - x_{ij}}{\max\left(x_{1j},...,x_{nj}\right) - \min\left(x_{1j},...,x_{nj}\right)} \tag{5}$$

式中：g_{ij} 为归一化后的参数值；min( )、max( )分别表示该参数在所有样地中的最小值与最大值。

（3）信息熵计算：将归一化后的 g_{ij} 代入公式（6）~（8），计算第 j 项参数的信息熵 G_j。

$$u = 1/\ln n \tag{6}$$

$$f_{ij} = \frac{g_{ij}}{\sum_{i=1}^{n} g_{ij}} \tag{7}$$

$$G_j = -u\sum_{i=1}^{n} f_{ij}\ln f_{ij} \tag{8}$$

式中：u 为信息熵系数；f_{ij} 为第 i 块样地中第 j 项参数的占比；G_j 为第 j 项指标的熵值，取值范围 0 ~ 1，值越小表明该参数的变异程度越大，对评价的贡献越大。

（4）权重计算：把信息熵 G_j 代入公式（9），得到第 j 项参数的权重 S_j。

$$S_j = \frac{1 - G_j}{\sum_{j=1}^{m}\left(1 - G_j\right)} \tag{9}$$

式中：S_j 越大表明该参数对林分结构评价的影响越显著。

1.7　林分结构评价指数

根据乘除法思想，把 11 个结构参数归纳到公式（10）中，得到林分结构评价指数 FSSI。

$$L = \frac{(1+D)\sigma_D(1+H)\sigma_H(1+O)\sigma_O(1+B)\sigma_B(1+P)\sigma_P(1+S)\sigma_S(1+M)\sigma_M}{(1+W)\sigma_W(1+C)\sigma_C(1+U)\sigma_U(1+I)\sigma_I} \tag{10}$$

式中：L 为 FSSI 值；D、H、O、B、P、S、M、W、C、U、I 分别为林分胸径、树高、冠幅、生物量、生产力、林层指数、叶面积指数、角尺度、密集度、大小比数、竞争指数的平均值；σ_D、σ_H、σ_O、σ_B、σ_P、σ_S、σ_M、σ_W、σ_C、σ_U、σ_I 分别为各项参数的权重。最后使用公式（4）将 FSSI 的数值范围转化成 0~1 之间，值越大表明林分结构越优。

1.8　数据处理

本研究利用 Excel 2019 进行数据整理与公式计算；使用 SPSS 26.0 进行统计分析，通过单因素方差分析（ANOVA）检验不同间伐强度处理对林分结构参数的影响，采用 LSD 多重比较法（显著性水平 α = 0.05）分析处理间的差异；采用 Origin 2021 绘图。

2　结果与分析

2.1　间伐对华北落叶松人工林非空间结构特征的影响

不同间伐强度对华北落叶松人工林的胸径、树高、冠幅、生产力均存在显著影响（$P < 0.05$），对生物量无显著影响（表 2）。与 CK 相比，各间伐处理下的胸径差异显著，LT、MT 和 HT 增幅分别为 13.60%、28.13% 与 32.21%。与 LT 相比，MT 和 HT 处理的胸径分别增加了 12.79% 和 16.38%，但 MT 与 HT 处理间无显著差异，表明间伐强度超过 40% 后，胸径增长效应趋于稳定。树高在 LT、MT 与 HT 处理下较 CK 分别增加了 2.43%、25.55%、36.86%，其中 MT 与 HT 处理均显著高于 CK 与 LT 处理，可见间伐强度达到 MT 后对树高生长产生显著促进作用。冠幅随间伐强度的增强而增加，且增幅不断提高；在间伐强度达到一定程度（MT）时，冠幅随间伐强度的增加显著提高，表明高强度间伐可有效扩大林木水平生长空间。就生产力而言，LT 处理产生了 53.12% 的最大增幅且增产效果显著，但随着间伐强度的增加（MT 与 HT），增产效应反而减弱。不同间伐强度对生物量无显著影响，与 CK 相比，LT、MT 处理下的生物量分别增加了 6.09%、6.46%，但 HT 处理下

表 2 不同间伐强度影响下华北落叶松人工林的非空间结构特征

Tab. 2 Non-spatial structural characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations under varying thinning intensities

非空间结构特征	CK	LT	MT	HT
胸径/cm	13.97 ± 0.15c	15.87 ± 0.37b	17.90 ± 0.61a	18.47 ± 0.29a
树高/m	12.37 ± 0.73c	12.67 ± 0.57c	15.53 ± 0.27b	16.93 ± 0.15a
冠幅/m	2.60 ± 0.06c	2.83 ± 0.13c	3.23 ± 0.09b	3.67 ± 0.03a
生产力/($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)	4.01 ± 0.43b	6.14 ± 0.42a	4.86 ± 0.37ab	4.13 ± 0.61b
生物量/($t \cdot hm^{-2}$)	111.64 ± 3.24a	118.44 ± 11.13a	118.85 ± 11.94a	92.22 ± 4.64a

注：不同小写字母表示不同间伐强度间差异显著($P < 0.05$)。

的生物量则降低了 17.40%。

2.2 间伐对华北落叶松人工林空间结构特征的影响

间伐对华北落叶松人工林空间结构特征的影响不尽相同(图 1)。MT 与 HT 显著($P < 0.05$)影响了竞争指数与林层指数，但各处理对角尺度、密集度、大小比数及叶面积指数均未产生显著影响。具体而言，竞争指数随间伐强度增大呈递减趋势，LT、MT 和 HT 处理较 CK 分别降低了 10.16%、32.42% 和 39.84%。其中，MT 与 HT 处理均与 CK 存在显著差异，HT 处理亦显著低于 LT，说明中度以上间伐可有

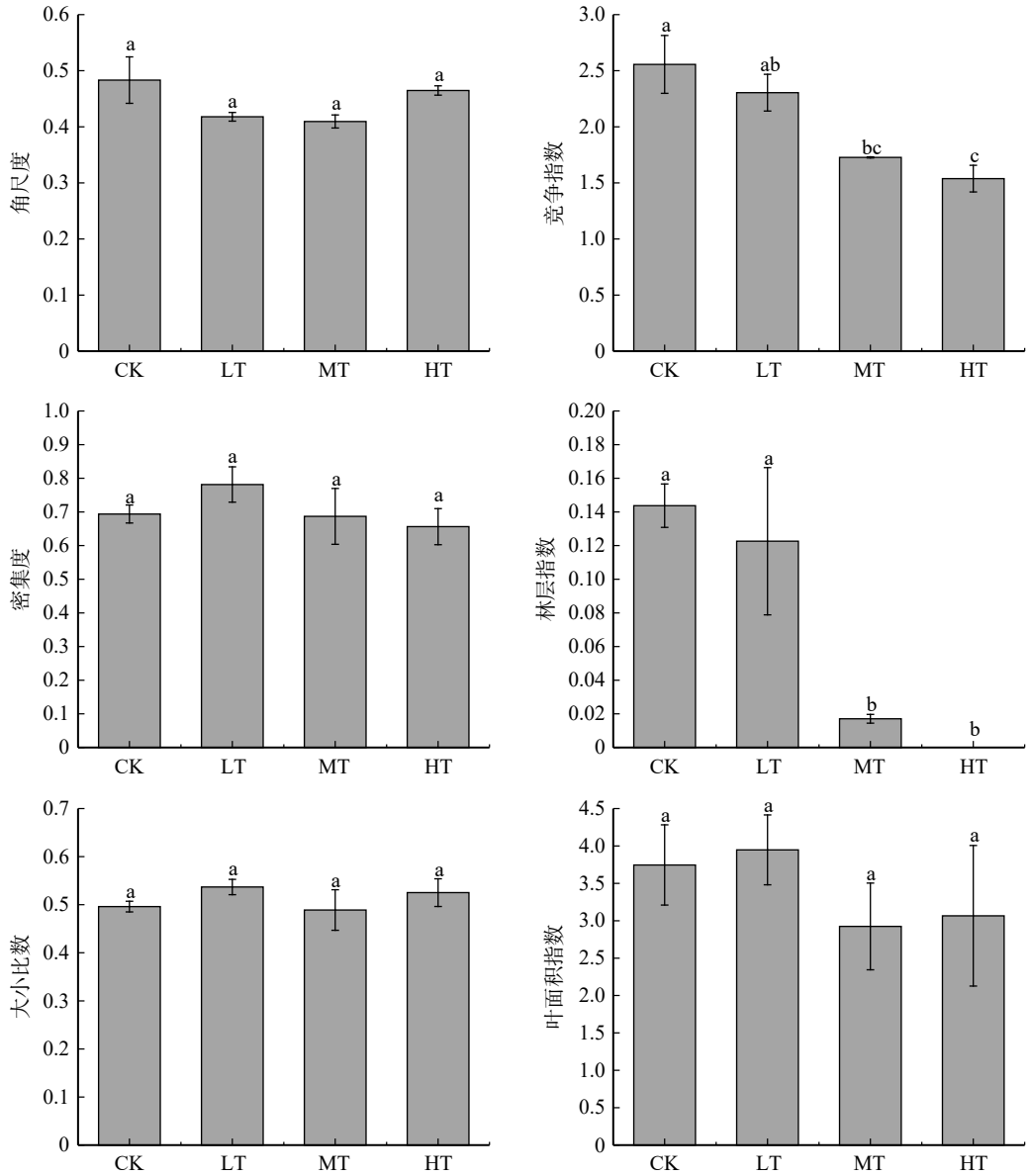


图 1 不同间伐强度影响下华北落叶松人工林的空间结构特征

Fig. 1 Spatial structural characteristics of *Larix principis-rupprechtii* plantations under different thinning intensities

效缓解林木竞争压力。林层指数变化更为明显，LT、MT 与 HT 处理分别较 CK 降低了 14.29%、85.71% 与 100.00%，MT 与 HT 处理均显著低于 CK 与 LT。

间伐前后的角尺度均处于随机分布状态，且不同处理间无显著差异，可见间伐未改变林木水平分布格局，林分仍保持理想水平结构。密集度随间伐强度呈“先升后降”趋势：LT 处理较 CK 提升 13.04%，HT 处理较 CK 降低 4.35%，但各处理间无显著差异，反映间伐对林分空间拥挤程度的影响较弱。CK、LT、MT 和 HT 处理下的大小比数分别为 0.50，0.54，0.49 和 0.53，整体都属于中庸状态，说明林木的胸径差异不明显，林木分化不严重，但竞争压力仍然存在。叶面积指数在 LT 处理下较 CK 提高 5.33%，而 MT 与 HT 处理下分别降低了 22.13% 和 18.13%，这反映了适度间伐可促进冠层扩展，过度间伐则会产生负效应。

2.3　不同间伐强度下华北落叶松人工林林分结构综合评价

采用熵权法计算 11 个林分空间结构参数的权重（表 3）。林层指数权重最高（18.39%），对林分结构评价的贡献最大，表明林分垂直分层是影响结构优劣的核心因子，调整和优化的效应最明显；密集度权重次之（12.88%）；大小比数权重最小（3.96%），对评价的贡献最小，表明林木大小分化对林分整体结构的影响较弱，调整和优化的效应较不明显。

FSSI 随间伐强度的提高呈现先增至峰值后下降的规律（图 2）。CK、LT、MT 和 HT 的林分结构评价指数分别为 0.01、0.34、0.46 和 0.43，显而易见，MT 处理下的 FSSI 最大，表明中度间伐（40%）对林分结构的综合改善效果最优，可实现非空间结构（生长促进）与空间结构（竞争缓解）的协同优化。

表 3　林分结构参数权重

Tab. 3　Stand structure parameter weights

林分结构参数	权重/%
林层指数	18.39
密集度	12.88
冠幅	9.66
竞争指数	9.43
胸径	8.69
叶面积指数	7.90
生产力	7.65
树高	7.31
角尺度	7.30
生物量	6.83
大小比数	3.96

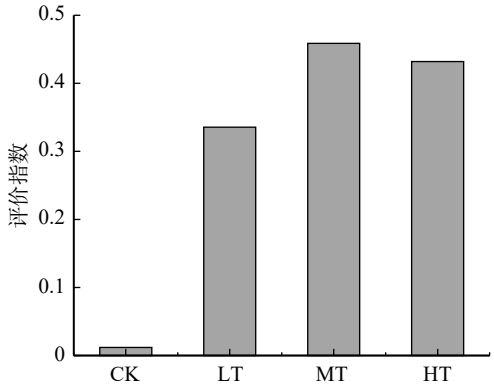


图 2　不同间伐强度华北落叶松人工林结构评价指数

Fig. 2　Evaluation indices of forest structure in *Larix principis-rupprechtii* plantations under different thinning intensities

3　讨　　论

3.1　间伐对华北落叶松人工林非空间结构特征的影响

抚育间伐是实现森林优质、高效和可持续经营目标的关键路径，其调控效应涵盖林分生长动态、总收获量提升、林分结构优化及森林环境改善等多个维度，并且关于间伐影响的探讨一直是研究的热点[18−20]。我国关于抚育间伐对人工纯林的影响已有较多研究[21−24]，其中关于林分直径生长的结论与本研究高度一致：随间伐强度增加，直径生长量加大，HT 处理对胸径的促进效应最显著[25−26]，MT、HT 处理下的胸径显著高于 LT[25]。就林分的非空间结构而言，随着间伐强度增加，林木胸径、树高和冠幅呈上升趋势，这可能是因为间伐后林分密度减小，资源竞争减弱，保留木获得更多生长空间[27−28]，也可能是林内光照增强，促进了林下植被的生长与更新，提升了生物多样性水平，增强了人工林生态系统的结构稳定性与自我调节能力[29]，为保留木生长营造了更适宜的长期立地基础。

间伐对林分的影响存在“增长效应”与“失去效应”的权衡：“增长效应”体现为保留木生长空间扩大与资源获取能力的提升，“失去效应”体现为伐除木导致的林分蓄积与生物量的损失[30]。MT 与 HT 处理虽然在一定程度上促进了林木个体的生长，但随着间伐强度的增大，两种处理下的林分生产力与生物量均有所下降，且 HT 处理下的生物量甚至低于 CK，表明间伐强度过高可能导致林分资源（如林地空间）未能被有效利用，“失去效应”大于“增长效应”。这与张会儒等[31]提出的“高强度采伐导致生态位空间过度释放，不利于资源高效利用及林木生长”的观点一致。因此，从非空间结构综合来看，MT 处理更有利于实现林分生长促进与生物量维持的平衡。

3.2 间伐对华北落叶松人工林空间结构特征的影响

林分空间结构分析是森林结构优化和调整的关键，本研究发现随间伐强度的增加，林分的竞争指数不断减小，这是因为间伐后林地的生长空间增大、林冠开阔度显著增加，改善了林分结构[32]，林木资源利用程度增加，竞争得到缓解[2]。研究结果表明，间伐使得林分的垂直结构趋于简化[33]。MT 与 HT 处理下的林层指数显著降低，下降幅度分别达 85.71%、100.00%，意味着垂直结构几乎完全丧失。田平等[34]在研究中发现间伐虽然增加了林分冠层结构的空间异质性，但显著降低了叶面积指数，这就会导致林层分化程度下降，从而削弱了林分的垂直异质性，这与本研究的结果一致。同时，CK 与 LT、MT 与 HT 间林层指数差异分别不显著，主要原因可能在于前者（LT）的间伐强度过低不足以有效诱导林层分化，而后者（HT）则可能已达到该林分条件下林层结构响应的强度饱和点，故而导致过高的间伐强度并未产生额外的显著效应。本研究的结果表明，叶面积指数变化趋势不一致，反映了林分冠层恢复能力的差异性。叶面积指数在 LT 处理下略有提升，而 MT 与 HT 处理下则明显下降，小于 CK，与管惠文等[35]的研究结果相似。这说明 LT 处理有助于保留木冠层扩展，提高光合面积，而过高的间伐则会因冠层减少导致叶面积指数下降。同时研究表明，角尺度、密集度和大小比数等结构参数在不同处理下略有变化，但未达到显著水平，这一结果可能是因为间伐主要去除生长不良或受压木，对整体空间分布格局扰动较小，也可能是因为以上结构参数对间伐的响应具有一定的滞后性，需更长时间或更大强度才能显现显著变化。因此，建议后续研究延长观测周期，以评估间伐对林分结构的长期影响。

3.3 间伐对华北落叶松人工林林分结构的综合影响

林分结构评价指数的构建需兼顾非空间与空间结构的协同性——由于不同参数间可能存在相互依赖或排斥关系，单一参数最优无法代表整体结构最优，因此需通过多参数整合实现综合评价。基于此，本研究的试验结果表明，中度间伐（MT，40%）可在多方面综合促进华北落叶松人工林林分长期可持续性发展，这与王芸等[36]提出的 17% 的间伐强度能够更好地实现华北落叶松整体林分结构的稳定性、合理性、平衡性发展的观点有所差别，其原因可能与试验区的立地条件、林分的初始密度以及评价体系的侧重点不同有关，前者侧重林分物种结构与空间结构，而本试验则是综合林分的非空间结构与空间结构。而常陈豪等[37]虽然也认为中度间伐对中龄林的林分整体影响最有利，但因所研究树种、选取参数因子的差异以及具体间伐梯度设置的不同而导致最终得出的具体结论也有所区别。同时，赵衍征等[38]、姚甲宝等[39]及周雨飞等[3]也在研究中得出与本试验相似的结论。

4 结 论

本研究量化分析了不同间伐强度对华北落叶松人工林非空间与空间结构特征的影响，构建 FSSI 并系统评估了各处理对林分结构的综合影响，得到以下结论：不同间伐强度对华北落叶松人工林的胸径、树高、冠幅、生产力均存在显著（$P < 0.05$）影响；MT 与 HT 处理显著降低了林分的竞争指数与林层指数，不同处理对其他空间指标无显著影响；在林分结构综合评价中，林层指数的贡献率最大，密集度次之，大小比数赋值最小；FSSI 在 MT 处理下达峰值。总的来看，40% 的间伐强度是实现华北落叶松人工林结构优化与可持续经营的理想阈值。未来，研究尚需进一步厘清间伐驱动下林分空间与非空间结构因子间的互馈机制，同时亟待拓展长期定位监测，以揭示间伐效应的持续性与稳定性，为森林多功能经营与可持续发展提供更精准的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 余新晓, 鲁绍伟, 靳芳, 等. 中国森林生态系统服务功能价值评估 [J]. 生态学报, 2005, 25(8): 2096−2102.
Yu X X, Lu S W, Jin F, et al. The assessment of the forest ecosystem services evaluation in China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(8): 2096−2102.

[2] 陈哲, 魏浩亮, 周庆营, 等. 抚育间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 54−64.
Chen Z, Wei H L, Zhou Q Y, et al. Influence of tending and thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(5): 54−64.

[3] 周雨飞, 罗超, 李生, 等. 亚热带马尾松林阔叶化改造对林分结构的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 11−21.
Zhou Y F, Luo C, Li S, et al. Effects of broadleaved transformation on stand structure of *Pinus massoniana* forest in subtropical area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 11−21.

[4] 刘帅. 天然次生林林分结构分析及多目标智能优化研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
Liu S. Research on the analysis and multi-objective intelligent optimization of stand structure of natural secondary forest [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2017.

[5] 汤孟平, 唐守正, 雷相东, 等. 林分择伐空间结构优化模型研究 [J]. 林业科学, 2004, 40(5): 25−31.
Tang M P, Tang S Z, Lei X D, et al. Study on spatial structure optimizing model of stand selection cutting [J]. Scientia Silvae

Sinicae, 2004, 40(5): 25−31.

[6] Aguirre O, Hui G, von Gadow K, et al. An analysis of spatial forest structure using neighbourhood-based variables [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 183(1−3): 137−145.

[7] Pommerening A, Goncalves A C, Rodriguez-Soalleiro R. Species mingling and diameter differentiation as second-order characteristics [J]. Allgemeine Forst-und Jagdzeitung, 2011, 182(7/8): 115−129.

[8] 贾忠奎, 公宁宁, 姚凯, 等. 间伐强度对塞罕坝华北落叶松人工林生长进程和生物量的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(03): 5−7,31.
Jia Z K, Gong N N, Yao K, et al. Effects of thinning intensity on the growth and biomass of *Larix principis-rupprechtii* plantation in Saihanba, Hebei Province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2012, 40(03): 5−7,31.

[9] 张培, 庞圣江, 杨保国, 等. 抚育间伐对江南油杉林分生长的影响 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(4): 84−88,147.
Zhang P, Pang S J, Yang B G, et al. Effects of thinning on the stand growth of *Keteleeria cyclolepis* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(4): 84−88,147.

[10] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于 4 株相邻木关系的林分空间结构多样性测度方法研究 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(7): 18−26.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Research on the measurement method of forest spatial structure diversity based on 4 neighborhood tree relationship [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(7): 18−26.

[11] 惠刚盈, 赵中华, 胡艳波, 等. 基于结构参数均值的林分空间结构综合评价研究 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(2): 12−21.
Hui G Y, Zhao Z H, Hu Y B, et al. Comprehensive evaluation of forest spatial structure based on the mean values of structural parameters [J]. Forest Research, 2023, 36(2): 12−21.

[12] 张岗岗, 刘瑞红, 惠刚盈, 等. 林分空间结构参数 N 元分布及其诠释: 以小陇山锐齿栎天然混交林为例 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(4): 21−31.
Zhang G G, Liu R H, Hui G Y, et al. *N*-variate distribution and its annotation on forest spatial structural parameters: a case study of *Quercus aliena* var. *acuteserrata* natural mixed forest in Xiaolong Mountains, Gansu Province of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(4): 21−31.

[13] 张斌, 尹尚勇, 曹欢, 等. 基于结构方程模型和单位圆法的中条山生态公益林林分状态评价对比 [J]. 中国水土保持科学, 2025, 23(6): 175−185.
Zhang B, Yin S Y, Cao H, et al. Comparisons of stand state evaluation forecological public welfare forest in Zhongtiao Mountain by methods of structural equation model and unit circle [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2025, 23(6): 175−185.

[14] 刘欣, 彭道黎, 邱新彩. 华北落叶松不同林型土壤理化性质差异 [J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(4): 735−743.
Liu X, Peng D L, Qiu X C. Differences in soil physicochemical properties between different forest types of *Larix principis-rupprechtii* [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(4): 735−743.

[15] 赵娱, 张菲, 许中旗, 等. 塞罕坝地区樟子松生长过程研究 [J]. 林业资源管理, 2017(5): 39−44.
Zhao Y, Zhang F, Xu Z Q, et al. Study on the growth of Scotch pine in Saihanba area [J]. Forest and Grassland Resources Research, 2017(5): 39−44.

[16] von Gadow K, Hui G. Characterizing forest spatial structure and diversity [C]// Björk L. Sustainable forestry in temperate regions. Lund: University of Lund, 2002.

[17] 李显良, 张贵, 李建军. 基于熵权−云模型的环洞庭湖森林健康评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(11): 119−128.
Zhang X G, Zhang G, Li J J. Assessment of forest health around Dongting lake based on entropy weight-cloud model [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(11): 119−128.

[18] Parrotta J A, Francis J K, Knowles O H. Harvesting intensity affects forest structure and composition in an upland Amazonian forest [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(3): 243−55.

[19] Lähde E, Laiho O, Norokorpi Y, et al. Development of Norway spruce dominated stands after single-tree selection and low thinning [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32(9): 1577−1584.

[20] Crow T R, Buckley D S, Nauertz e A, et al. Effects of management on the composition and structure of northern hardwood forests in upper Michigan [J]. Forest Science, 2002, 48(1): 129−145.

[21] 朱教君, 李凤芹, 松崎健, 等. 间伐对日本黑松海岸林更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1361−1367.
Zhu J J, Li F Q, Song Q J, et al. Influence of thinning on regeneration in a coastal *Pinus thunbergii* forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(11): 1361−1367.

[22] 董希斌, 李耀翔, 姜立春. 间伐对兴安落叶松人工林林分结构的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2000, 28(1): 16−18.
Dong X B, Li Y X, Jiang L C. The effects of thinning on stand structure for larch plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2000, 28(1): 16−18.

[23] 王书韧, 郭利娜, 白彦锋, 等. 间伐套种对杉木人工林生长、干形形质和材种结构的影响 [J]. 林业科学研究, 2023, 36(6): 48−57.
Wang S R, Guo L N, Bai Y F, et al. Effects of thinning and interplanting on the tree growth, stem-form quality and timber structure of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Forest Research, 2023, 36(6): 48−57.

[24] 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 P, He J Y, Zhang H J, 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.

[25] 郑鸣鸣, 任正标, 王友良, 等. 间伐强度对杉木中龄林生长和结

构的影响 [J]. 森林与环境学报, 2020, 40(4): 369−376.
Zheng M M, Ren Z B, Wang Y L, et al. Effect of thinning intensity on the growth and structure of a middle-aged Chinese fir forest [J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(4): 369−376.

[26] 徐金良, 毛玉明, 郑成忠, 等. 抚育间伐对杉木人工林生长及出材量的影响 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 99−107.
Xu J L, Mao Y M, Zheng C Z, et al. Effect of thinning on growth and timber outturn in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Forest Research, 2014, 27(1): 99−107.

[27] Rajeev J, Kumar K C J, Prasad D P, et al. Exploring the impact of thinning operations on forest ecosystems in tropical and temperate regions worldwide: a comprehensive review [J]. Journal of Resources and Ecology, 2023, 14(6): 1227−1242.

[28] Crecente-Campo F, Pommerening A, RodrÍguez-Soalleiro R. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(9): 1945−1954.

[29] 徐雪蕾, 孙玉军, 周华, 等. 间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(3): 1−12.
Xu X L, Sun Y J, Zhou H, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(3): 1−12.

[30] 翟明普. 森林培育学 [M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 2001.
Zhai M P. Forest cultivation[M]. Beijing: Central Radio & TV University Press, 2001.

[31] 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.
Zhang H R, Lei X D, Zhang C Y, et al. Research on theory and technology of forest quality evaluation and precision improvement [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 1−18.

[32] 刘雨欣. 间伐保留密度对杉木中龄林碳储量的影响 [J]. 福建林业科技, 2023, 50(1): 17−22,30.
Liu Y X. Effect of thinning reserve density on carbon storage in middle-aged Chinese fir plantations [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2023, 50(1): 17−22,30.

[33] Cheng F, Zhao X, Luo Y, et al. Effects of thinning on canopy structure, forest productivity, and productivity stability in mixed conifer-broadleaf forest: Insights from a LiDAR survey [J]. Journal of Environmental Management, 2025, 385: 125707.

[34] 田平, 韩海荣, 康峰峰, 等. 密度调整对太岳山华北落叶松人工林冠层结构及林下植被的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2016, 38(8): 45−53.
Tian P, Han H R, Kang F F, et al. Influence of density adjustment on canopy structure and understory vegetation of the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Taiyue Mountain, Shanxi, China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2016, 38(8): 45−53.

[35] 管惠文, 董希斌. 间伐强度对落叶松次生林冠层结构和林内光环境的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(10): 13−23.
Guan H W, Dong X B. Influence of thinning intensity on canopy structure and light environment inside *Larix gmelinii* secondary forest [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(10): 13−23.

[36] 王芸, 赵鹏祥, 杨永辉, 等. 间伐对华北落叶松林林分结构稳定性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(2): 193−199.
Wang Y, Zhao P X, Yang Y H, et al. Effects of thinning on the stand structure stability of *Larix principis-rupprechtii* forest [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(2): 193−199.

[37] 常陈豪, 吕康婷, 周梦丽, 等. 间伐对黄山松人工林林分空间结构及稳定性的影响 [J]. 西北林学院学报, 2022, 37(6): 138−144.
Chang C H, Lü K T, Zhou M L, et al. Effects of thinning on the spatial structure and stability of *Pinus taiwanensis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(6): 138−144.

[38] 赵衍征, 李耀翔, 李春旭, 等. 间伐作业对天然次生林林分结构特征的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 83−95,110.
Zhao Y Z, Li Y X, Li C X, et al. Effects of thinning on the structure characteristics of natural secondary forest [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(3): 83−95,110.

[39] 姚甲宝, 曾平生, 袁小平, 等. 间伐强度对木荷−萌芽杉木中龄混交林生长和林分结构的影响 [J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 511−517.
Yao J B, Zeng P S, Yuan X P, et al. Impacts of thinning intensities on growth and stand structure of *Schima superba*-sprouting *Cuninghamia lanceolata* mixed plantation [J]. Forest Research, 2017, 30(3): 511−517.

（责任编辑 孟 瑶
责任编委 张会儒）