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

间伐强度对干热河谷香椿人工林生长及土壤性状的影响

黄玲 肖远登 蒙鑫 王智慧 韦铄星 陆秋洁 王燕兰 黄志超

Effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations in dry-hot valleys

Huang Ling, Xiao Yuandeng, Meng Xin, Wang Zhihui, Wei Shuoxing, Lu Qiujie, Wang Yanlan, Huang Zhichao

引用本文:
黄玲, 肖远登, 蒙鑫, 王智慧, 韦铄星, 陆秋洁, 王燕兰, 黄志超. 间伐强度对干热河谷香椿人工林生长及土壤性状的影响[J]. 北京林业大学学报, 2026, 48(5):72–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250507
Huang Ling, Xiao Yuandeng, Meng Xin, Wang Zhihui, Wei Shuoxing, Lu Qiujie, Wang Yanlan, Huang Zhichao. Effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations in dry–hot valleys[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5):72–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250507

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250507

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

间伐强度和水分管理对毛白杨人工林土壤水分时空特征的短期影响

Short–term effects of thinning intensity and water management on the spatiotemporal characteristics of soil moisture in *Populus tomentosa* plantations

北京林业大学学报, 2026, 48(3): 26–39. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250329

间伐强度对马尾松人工林冠下套种树种生长的影响

Effects of thinning intensity on the growth of interplanting broadleaved trees under *Pinus massoniana* plantation

北京林业大学学报, 2021, 43(1): 58–65. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200086

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

Long–term effects of different thinning intensities on understory plant diversity of *Pinus taiwanensis* plantations in Dabieshan Mountain of central China

北京林业大学学报, 2025, 47(10): 11–18. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250208

金沙江干热河谷冲沟系统优先流影响下的土壤可蚀性

Soil erodibility under the influence of preferential flow in the gully system of the Jinsha River Dry Hot Valley

北京林业大学学报, 2023, 45(4): 101–113. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220135

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

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

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250507

间伐强度对干热河谷香椿人工林生长及土壤性状的影响

黄 玲[1] 肖远登[1] 蒙 鑫[2] 王智慧[2] 韦铄星[2] 陆秋洁[2] 王燕兰[1] 黄志超[1]
（1. 广西壮族自治区国有雅长林场，广西 百色 533099；2. 广西壮族自治区林业科学研究院广西林业实验室，广西 南宁 530002）

摘要:【目的】探究间伐强度对香椿人工林林分生长及土壤性状的影响，筛选适宜构建香椿复层异龄林的高效间伐模式，为香椿近熟林提质增效提供理论支持。**【方法】**在广西雅长林场，以 21 年生香椿人工单层纯林为对象，设置 3 种间伐强度处理：TPH（保留 1 050 株/hm^2）、TPM（保留 750 株/hm^2）和 TPL（保留 450 株/hm^2），并以未间伐林分为对照（CK）。在间伐后的林下及 CK 样地中，按 1∶1 比例补植大叶榉树和闽楠等珍贵树种，系统比较不同处理条件下林分生长及土壤性状的差异。**【结果】**(1)间伐显著促进了香椿胸径、树高和林分蓄积的增长，TPH 最有利于树高和蓄积增长，而 TPL 最有利于胸径增长。(2)林下补植苗的生长在不同处理间差异显著（$P < 0.05$），地径与苗高增量均表现为 TPM > TPH > TPL > CK。(3)不同处理对香椿人工林土壤理化性质的影响显著，TPH 在改善土壤 pH、有机质、全氮、全磷、速效钾和速效磷等方面表现最优；TPM 在提高土壤全钾含量上优势明显；而 CK 则在降低土壤容重、提升含水率与速效氮含量等方面表现最佳。(4)不同处理对香椿人工林土壤酶活性的影响显著，TPH 对过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性的提升作用最为突出，而酸性磷酸酶活性在 CK 中最高。**【结论】**TPH 能有效协调香椿人工林的生长、林下更新与土壤改良效应，是构建香椿人工复层异龄混交林，提升林分质量，实现香椿人工林多功能可持续经营的较优模式。

关键词：香椿人工林；林分生长；干热河谷；间伐强度；土壤理化性质；土壤酶活性；人工林可持续经营
中图分类号：S792.99　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2026)05−0072−10
引文格式：黄玲，肖远登，蒙鑫，等. 间伐强度对干热河谷香椿人工林生长及土壤性状的影响［J］. 北京林业大学学报，2026，48(5)：72−81. Huang Ling, Xiao Yuandeng, Meng Xin, et al. Effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations in dry-hot valleys［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2026, 48(5): 72−81.

Effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations in dry-hot valleys

Huang Ling[1] Xiao Yuandeng[1] Meng Xin[2] Wang Zhihui[2] Wei Shuoxing[2] Lu Qiujie[2]
Wang Yanlan[1] Huang Zhichao[1]
(1. Guangxi State-Owned Yachang Forest Farm, Baise 533099, Guangxi, China;
2. Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Laboratory of Forestry, Nanning 530002, Guangxi, China)

Abstract:［**Objective**］This paper explores the effects of thinning intensity on stand growth and soil properties of *Toona sinensis* plantations, aiming to screen efficient thinning models suitable for constructing multi-layered, uneven-aged *T. sinensis* forests and to provide theoretical support for improving the quality of near-mature *T. sinensis* plantations.［**Method**］A 21-year-old monoculture *T. sinensis* plantation in Guangxi Yachang Forest Farm of southern China was subjected to three thinning intensities: TPH (retaining 1 050

收稿日期: 2025−12−17　**修回日期:** 2026−02−28
基金项目: 广西重点研发计划（桂科 AB21220026），广西自筹经费林业科技项目（2023GXZCLK33），广西自筹经费林业科技项目（2025GXZCLK46）。
第一作者: 黄玲，工程师。主要研究方向：森林经营。Email: chenbei@bjfu.edu.cn　地址：533099 广西百色市右江区站前大道 109 号雅长林场。
责任作者: 蒙鑫，工程师。主要研究方向：森林经营。Email: 2537399586@qq.com　地址：530002 广西南宁市西乡塘区邕武路 23 号广西林科院。
本刊网址: https://j.bjfu.edu.cn; https://journal.bjfu.edu.cn

tree/ha), TPM (750 tree/ha), and TPL (450 tree/ha), with unthinned stands as the control (CK). Precious tree species such as *Zelkova schneideriana* and *Phoebe bournei* were under-planted in a 1∶1 ratio under the thinned and control stands. Differences in stand growth, soil physicochemical properties, and enzyme activities under different treatments were systematically compared. [**Result**] (1) Thinning significantly promoted the increase of DBH, tree height, and stand volume of *T. sinensis*. The TPH treatment was most conducive to the increase of tree height and volume growth, while TPL most strongly promoted DBH growth. (2) Growth of under-planted seedlings differed significantly among treatments ($P < 0.05$), with ground diameter and seedling height increments ranking as TPM > TPH > TPL > CK. (3) Thinning significantly affected soil physicochemical properties. TPH performed best in improving soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, available potassium, and available phosphorus; TPM showed the greatest advantage in increasing total potassium; while CK performed best in reducing bulk density and increasing moisture content and available nitrogen. (4) Soil enzyme activities were also significantly influenced. TPH most markedly enhanced catalase, urease, and sucrase activities, whereas acid phosphatase activity was highest in CK. [**Conclusion**] The TPH regime effectively coordinates tree growth, understory regeneration, and soil improvement in *T. sinensis* plantation. It is identified as a preferable management mode for establishing mixed uneven-aged multi-storey stands, improving stand quality, and supporting multifunctional sustainable management of *T. sinensis* plantations.

Key words: *Toona sinensis* plantation; stand growth; dry-hot valleys; thinning intensity; soil physicochemical properties; soil enzyme activity; sustainable management of plantation

香椿（*Toona sinensis*）是楝科（Meliaceae）香椿属（*Toona*）落叶乔木，作为我国热带亚热带地区特有的速生珍贵用材树种，因其树干通直、木材纹理美观、色泽典雅而被誉为“中国桃花心木”，在家具制造与室内装饰领域具有极高的经济价值[1−2]。近年来，随着市场对优质木材需求的增长，香椿人工林在我国南方地区得以大面积推广[3]。然而，其规模化经营中存在两大突出问题：一方面，由于营建初期普遍采用过高密度，大量林分进入中龄林阶段后出现生长空间受限、竞争加剧、生长速率显著下降等现象[4]；另一方面，大规模单一纯林的培育模式容易导致林分病虫害频发、生物多样性下降、生产力降低和水土流失等生态风险[5]，严重制约了香椿人工林的可持续经营与长期生产力维持。因此，为促进香椿人工林结构优化、功能提升与生态稳定，有必要针对低质低效林分开展以密度调控为基础、兼顾生态稳定性提升的系统性经营改造研究，为实现其多功能可持续经营提供理论依据和技术支撑。

间伐作为调控林分密度、改善生境条件、促进林木个体生长的关键营林措施，在人工林集约经营中具有不可替代的作用[1, 4, 6−7]。且间伐后套种其他乡土珍贵阔叶树种以构建异龄混交林被视为提升林分经济效益、优化林地利用效率、增强生态功能的重要技术途径[5, 8]。然而，目前在香椿用材林培育研究中，多数成果仍集中于苗木种源选择[9]、容器育苗[10]、嫁接[11]、组培[12]及早期选择[13]等前端基础与幼林丰产技术方面[14−16]。虽有研究[1]对川中丘陵区 7 年生香椿中龄林开展间伐试验，认为间伐 1/3 后，1 100 株/hm^2 的保留密度可有效促进胸径、树高、单株材积与冠幅生长，并最大程度提升林分蓄积量，但关于香椿近熟林的质量提升培育，尤其是在间伐后套种混交模式的系统研究仍未见报道。

广西雅长林场雅庭分场地处典型的干热河谷气候区，受“焚风效应”影响，形成高温少雨、蒸发强烈的特殊生境[5, 17]。在此立地条件下，香椿人工林的质量提升更具挑战性与特殊性。因此，本研究以雅庭分场内进入近熟龄的香椿人工林为对象，设置 3 种间伐补植改培模式，通过分析不同模式下香椿及补植树种的生长表现、土壤理化性质与酶活性特征的变化，旨在为干热河谷区香椿人工林的精准提质增效提供科学依据，推动其实现高效、可持续的珍贵用材培育目标。

1　研究区概况与研究方法

1.1　试验地概况

本研究区位于广西国有雅长林场雅庭分场（24°44′N、106°20′E），地处云贵高原向广西盆地过渡的斜坡地带，属红水河干热河谷流域。林区为典型的低山地貌，海拔范围 600 ~ 800 m，坡度 15° ~ 36°，地形复杂，山高坡陡。成土母岩以砂岩、泥岩、砂页岩为主，土壤类型为红壤至黄红壤过渡类型，石砾含量适中，土层深厚[5, 17]。该林区属亚热带季风气候，

但由于云贵高原的屏障作用及深切的河谷地形，形成明显的焚风效应，使其气温显著高于同纬度其他地区，具有典型的干热河谷气候特征；年均气温 18.5 ℃，极端最高气温达 42.5 ℃，年降水量 1 050 ~ 1 100 mm，年平均日照时数 1 502.5 h，无霜期长[5, 17]。

1.2 试验设计

本试验改造对象为近熟龄香椿人工纯林，该林分于 20 世纪 90 年代末造林，初植密度约 1 560 株/hm^2。2021 年 5 月，对该林分实行 3 种不同强度的间伐措施，分别为 TPH（间伐后保留 1 050 株/hm^2）、TPM（间伐后保留 750 株/hm^2）、TPL（间伐后保留 450 株/hm^2），并以未间伐林分作为对照（CK）。伐后清理采伐剩余物，穴状整地。2023 年 5 月，在间伐后的林分以及 CK 样地，以 570 ~ 600 株/hm^2 均匀补植珍贵阔叶树种（未间伐的 CK 样地，选择在行间或林窗等稀疏处进行补植），种植位置距离香椿树蔸 1.5 ~ 2.0 m。补植树种为大叶榉树（*Zelkova schneideriana*）和闽楠（*Phoebe bournei*），采用 1∶1 的比例混合配置。补植用苗木规格为大叶榉树采用 1 年生以上优质容器苗，平均地径 0.55 ~ 0.60 cm，平均苗高 0.7 ~ 0.8 m；闽楠采用 1 年生以上优质容器苗，平均地径 0.45 ~ 0.50 cm，平均苗高 0.6 ~ 0.7 m（表 1）。

1.3 研究方法

1.3.1 样地布设及调查

2021 年 10 月，选择坡度、坡向和海拔等立地条件相似的地块布设样地，每块样地面积为 20 m × 30 m，每种模式各 3 块，共计 12 块。在样地内进行每木检尺，记录种名、胸径、树高等（表 1）。2024 年 10 月，再次对各个香椿混交林样地进行调查，记录种名、胸径、树高、以及补植珍贵树种的地径和苗高等。材积则按以下公式计算[5]：

$$V = 0.000\,066\,705\,4 \times D^{1.847\,954\,50} \times H^{0.966\,575}$$

式中：V 为香椿材积，H 为树高（m），D 为胸径（cm）。

1.3.2 土壤样品采集及测定

在对样地林分进行每木检尺的同时，采集土壤样品。每块样地内从上坡至下坡按“S”形随机布设 5 个采样点，去除土壤表面凋落物和杂质后，挖取土壤剖面 0 ~ 20 cm 的表层土；将 5 个采样点的土壤均匀混合后，装入塑封袋带回实验室，共获得土壤样品 12 份（4 种处理 × 3 块样地。留取适量新鲜土壤样品用作土壤酶活性测定后，其余则经自然风干、去杂、过 2 mm 的筛后用作土壤理化性质测定。土壤容重和含水率等物理性质使用环刀法取样测定；pH 值采用玻璃电极法测定；有机质含量采用硫酸−重铬酸钾氧化法测定；全氮含量采用凯氏定氮法测定；全磷含量采用钼抗比色法测定；全钾含量采用火焰光度计法测定；速效氮含量采用 NaOH 水解扩散法；速效磷含量使用钼蓝比色法测定；速效钾含量采用火焰光度计法测定；过氧化氢酶（catalase，CAT）、酸性磷酸酶（acid phosphatase，ACP）脲酶（urease，URE）蔗糖酶（sucrase，SAC）分别采用高锰酸钾滴定法、磷酸苯二钠比色法、苯酚钠次氯酸钠比色法、3,5-二硝基水杨酸比色法测定[18−19]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 对样地调查数据和实验测定数据进行录入与整理。调查数据主要包括林木的树高、胸径（地径）、单株材积等生长参数；实验测定数据主要包括土壤理化性质指标（如 pH 值、土壤容重、土壤含水率、有机碳、全氮、全磷、全钾、速效氮、速效磷、速效钾含量）以及土壤酶活性指标（如脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性）。使用 SPSS 25 软件对上述所有指标进行单因素方差分析（one-way ANOVA），检验不同施肥处理对各指标影响的显著性，并用最小显著差异法（LSD）进行多重比较（显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$）。采用 Origin 2021 软件绘制相关图表。

2 结果与分析

2.1 香椿改造林分生长特性分析

2.1.1 香椿生长状况

为消除间伐过程中“砍小留大，伐劣留优”造成的影响，本研究以经营前后香椿林分的胸径、树高和材积的增量来反映其生长状况。结果如图 1 所示，3 种间伐模式各生长指标增量均显著高于对照（CK）

表 1 样地概况

Tab. 1 General situation of sample plots

林分处理	坡度/(°)	坡向	海拔/m	平均胸径（2021）/cm	平均树高（2021）/m	补植苗林龄（2023）/a	补植苗平均地径（2023）/cm	补植苗平均苗高（2023）/m
TPH	20 ~ 25	东南、南坡	620 ~ 675	16.80	16.40	1.00 ~ 1.50	0.45 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80
TPM	20 ~ 25	东南、南坡	620 ~ 675	17.00	17.70	1.00 ~ 1.50	0.45 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80
TPL	20 ~ 25	东南、南坡	620 ~ 675	18.70	18.70	1.00 ~ 1.50	0.45 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80
CK	20 ~ 25	东南、南坡	620 ~ 675	15.00	16.20	1.00 ~ 1.50	0.45 ~ 0.60	0.60 ~ 0.80

组($p < 0.05$)。在胸径增长方面，不同处理间存在显著差异($p < 0.05$)，表现为 TPL > TPM > TPH。树高增长在不同模式间亦差异显著($p < 0.05$)，顺序为 TPH > TPM > TPL。就林分蓄积增长而言，总体上表现为 TPH > TPM > TPL，且各处理之间差异显著($p < 0.05$)。

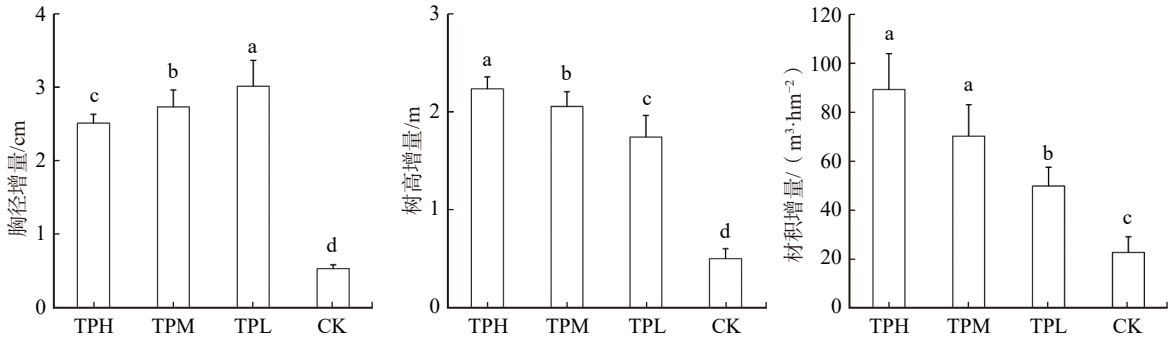
2.1.2　补植珍贵树种生长状况

为消除补植珍贵树种时苗木规格差异造成的误差，本研究同样以经营前后补植珍贵树种地径和苗高的生长增量来反映其生长状况。结果(图 2)表明，林下补植珍贵树种在不同处理中的生长存在显著差异($p < 0.05$)，地径和苗高增量均表现为 TPM > TPH > TPL > CK。具体来说，大叶榉树的地径和苗高增量均显著大于 CK($p < 0.05$)，表现为 TPM > TPH > TPL > CK，其中 TPM 和 TPH 差异不显著，但两者均显著大于 TPL($p < 0.05$)。闽楠地径和苗高增量均表现为 TPM > TPH > CK > TPL，其中地径增量方面仅 TPM 显著大于 CK($p < 0.05$)，而苗高增量方面 TPM 和 TPH 均显著大于 CK 和 TPL($p < 0.05$)。此外，除 CK 外，大叶榉树在各模式下的地径和苗高增量均显著大于闽楠($p < 0.05$)。

2.2　香椿改造林分土壤理化性质

由表 2 可知，试验地 pH 在 5.39 ~ 6.84，属于偏酸性土壤。在不同改造模式中，土壤 pH 随香椿保留密度的降低呈先升高后降低的变化趋势，表现为 TPH > CK > TPM > TPL。土壤容重为 1.14 ~ 1.43 g/cm^3，各处理间差异均达到显著水平($p < 0.05$)，且随香椿保留密度的降低而逐渐增加，表现为 TPL > TPM > TPH > CK。土壤含水率为 8.25% ~ 12.46%，在不同处理间亦存在较大差异，并随香椿密度的降低呈递减趋势，表现为 CK > TPH > TPM > TPL。

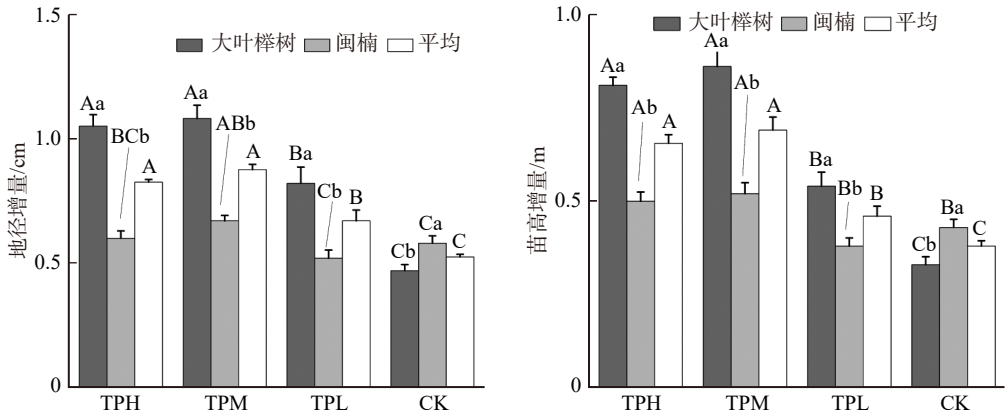
土壤有机质(SOC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)是评价土壤长期肥力状况的关键指标。从表 3 可知，各处理的上述指标均存在不同程度的差异。具体来说，SOC 含量为 24.54 ~ 52.22 g/kg，且随香椿保留密度的降低呈先升高后降低的趋势，各模式间差异显著($p < 0.05$)，表现为 TPH > CK > TPM > TPL；TN 含量为 1.89 ~ 2.76 g/kg，其在不同处理间的分布趋势与有机质相似，TPH 最高(2.76 g/kg)，CK、TPM 和 TPL 依次递减；TP 含量为 0.30 ~ 0.65 g/kg，随香椿保留密度的降低呈先升高后降低的趋势，表现为 TPH > TPM > CK > TPL；TK 含量为 5.49 ~



不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 1　不同间伐强度下香椿胸径、树高和蓄积增量

Fig. 1　Increments in DBH, tree height and volume of *Toona sinensis* under different thinning intensities



不同小写字母表示各补植苗间差异显著($p < 0.05$)；不同大写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。

图 2　不同间伐强度下补植苗地径和苗高生长状况

Fig. 2　Growth of ground diameter and seedling height of replanting seedlings under different thinning intensities

表 2 不同间伐强度下土壤性状

Tab. 2 Soil properties under different thinning intensities

处理	pH	容重/(kg·m^{-3})	含水率/%
TPH	**6.84 ± 0.06a**	1.23 ± 0.02b	10.95 ± 0.05b
TPM	6.10 ± 0.00c	1.36 ± 0.04a	9.75 ± 0.08c
TPL	5.39 ± 0.07d	**1.43 ± 0.12a**	8.25 ± 0.09d
CK	6.50 ± 0.39b	1.14 ± 0.03c	**12.46 ± 0.13a**

注：加粗数值表示该指标在不同处理中的最大值，不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

表 3 不同间伐强度下土壤化学性质

Tab. 3 Chemical properties of soil under different thinning intensities

处理	有机碳 /（mg·kg^{-1}）	全氮/（g·kg^{-1}）	全磷/（g·kg^{-1}）	全钾/（g·kg^{-1}）	速效氮/（mg·kg^{-1}）	速效钾/（mg·kg^{-1}）	速效磷/（mg·kg^{-1}）
TPH	**52.22 ± 1.78a**	**2.76 ± 0.08a**	**0.65 ± 0.05a**	10.29 ± 0.17a	336.70 ± 3.86c	**181.00 ± 3.15a**	**80.13 ± 0.36a**
TPM	28.68 ± 1.92c	2.22 ± 0.17b	0.44 ± 0.07b	**10.41 ± 0.29a**	307.77 ± 7.08d	144.67 ± 1.14b	3.29 ± 0.12d
TPL	24.54 ± 0.98d	1.89 ± 0.05c	0.30 ± 0.10c	5.49 ± 0.26c	364.23 ± 12.86b	105.67 ± 1.92d	6.00 ± 0.42b
CK	31.03 ± 2.90b	2.24 ± 0.26b	0.42 ± 0.11b	8.65 ± 0.18b	**370.30 ± 8.75a**	117.67 ± 3.94c	5.76 ± 0.31c

10.41 g/kg，TPM 和 TPH 差异不显著，但均显著高于 CK 和 TPL($p < 0.05$)，表现为 TPM > TPH > CK > TPL。综上所述，TPH 对提升林地土壤养分含量更具有积极作用。

土壤速效养分能够直接被作物吸收利用，是影响作物生长与产量的关键因素。从表 3 可知，各处理的土壤速效养分指标均存在较大差异。速效氮(AN)含量为 307.77 ~ 370.30 mg/kg，各处理间差异显著($p < 0.05$)，表现为 CK > TPL > TPH > TPM；速效钾(AK)含量为 105.67 ~ 181.00 mg/kg，各模式间差异显著($p < 0.05$)，其中 TPH(181.00 mg/kg)最高，TPM、CK 和 TPL 则依次递减；速效磷(AP)含量为 3.29 ~ 80.13 mg/kg，TPH(80.13 mg/kg)显著高于其他处理，表现为 TPH > TPL > CK > TPM。综合来看，TPH 在维持或提升土壤速效养分尤其是在 AK 和 AP 方面，表现出较好的效果。

2.3 香椿改造林分土壤酶活性变化

为深入解析不同改造模式对土壤关键生物化学过程的影响，本研究测定过氧化氢酶(CAT)、脲酶(URE)、酸性磷酸酶(ACP)和蔗糖酶(SAC)4 种土壤酶的活性，并进行多重比较分析。结果(表 4)表明，4 种酶活性在不同改培模式下均存在显著差异。CAT 活性为 1.54 ~ 2.30 U/g，其中 TPH(2.30 U/g)处理活性最高，显著优于其他处理($p < 0.05$)，整体表现为 TPH > TPL > CK > TPM。URE 活性为 6.66 ~ 26.54 U/g，其在不同处理间的变化趋势与 CAT 相似，TPH(26.54 U/g)同样高于其他处理($p < 0.05$)，表现为 TPH > TPL > TPM > CK。ACP 活性为 2.96 ~ 6.25 U/g，随着香椿保留密度的降低呈先减小后增大的趋势，具体表现为 CK > TPL > TPM > TPH。SAC 活性为 15.71 ~ 55.96 U/g，随香椿保留密度的降低呈先升高后降低的趋势，TPH(55.96 U/g)高于其他处理($p < 0.05$)，表现为 TPH > CK > TPM > TPL。综上所述，TPH 在提升土壤酶活性方面表现突出。

3 讨 论

3.1 间伐对林分生长的影响

本研究通过分析不同间伐强度下香椿人工林的生长动态，揭示了间伐对林木个体生长的关键调控作用。结果表明，3 种间伐处理均能显著促进香椿胸径、树高和林分材积增长，但不同生长指标对间伐强度的响应模式存在显著差异，反映了林木在变化环

表 4 不同间伐强度下土壤酶活性特征

Tab. 4 Characteristics of soil enzyme activities under different thinning intensities U/g

处理	过氧化氢酶	脲酶	酸性磷酸酶	蔗糖酶
TPH	**2.30 ± 0.06a**	**26.54 ± 1.75a**	2.96 ± 0.30d	**55.96 ± 1.41a**
TPM	1.54 ± 0.12d	12.42 ± 1.73b	3.47 ± 0.41c	26.79 ± 1.01c
TPL	2.08 ± 0.03b	13.13 ± 3.62b	5.79 ± 0.40b	15.71 ± 1.18d
CK	1.93 ± 0.53c	6.66 ± 0.95c	**6.25 ± 0.13a**	38.50 ± 1.42b

境下的资源分配策略与竞争机制。在胸径增长上，香椿人工林胸径增长量随间伐强度的增加而提高，表现为 TPL > TPM > TPH，这与前人的研究结果[1, 4, 6–7, 20–22]相似。其原因在于间伐直接降低个体竞争压力，释放光照、水分和养分等限制性资源，使保留木将更多光合产物优先分配于径向生长，以拓展资源获取空间[4,7]。树高增长则呈现相反趋势（TPH > TPM > TPL > CK），与香椿中龄林研究中的发现类似[4]，该结果反映了竞争压力与资源获取之间的权衡机制：TPH 在缓解过度竞争的同时，维持较高的林分郁闭度，持续的侧方遮阴形成垂直光梯度，驱动林木为争夺光照而将资源优先投入高生长以获取顶端优势；而 TPL 虽光照充足，但因竞争压力过小，林木无需通过高生长争夺光源，资源更多分配于径向生长；同时，CK 树高增量最低，其原因在于过度拥挤引发的资源匮乏—高密度林分中光照穿透受限，下层叶片光合贡献低，且根系竞争激烈导致水分养分供给不足，林木整体生长受限，无法支撑有效的高生长[4, 23]。林分蓄积作为胸径、树高生长以及保留株数的综合体现，其增长总体表现为 TPH > TPM > TPL > CK，这说明尽管高强度间伐（TPL）极有效地促进了胸径增长，但中低强度间伐（TPH, TPM）通过在树高和胸径上取得相对均衡的发展，并结合保留株数较多的优势，最终在林分蓄积积累上展现出优势。

林下补植是优化林分结构、提升森林质量和经济效益的重要改造措施。桉树（*Eucalyptus* spp.）[7]、马尾松（*Pinus massoniana*）[24]和杉木（*Cunninghamia lanceolata*）[25]等林分间伐后补植阔叶树种的研究显示，中高强度的间伐对林下补植苗的生长促进更显著。而本研究在香椿间伐林下补植大叶榉树与闽楠的结果表明，适度的上层遮阴有利于林下苗木的初期定植与生长，中低间伐强度对补植苗木生长的促进作用更显著，补植苗地径和苗高增量总体上均表现为 TPM > TPH > TPL > CK。中低间伐强度处理能产生最佳的补植效果，其核心在于创造了一种“适度遮阴”的微环境，既能有效规避高强度间伐下因过度透光可能导致的干热胁迫和土壤水分过快蒸发，又能显著改善未间伐下的光照匮乏状况，在资源供给（光照）与环境胁迫（干热）之间取得最佳平衡，为幼苗生长提供更为湿润、温和且光照适宜的小气候条件。且本研究还发现，补植的大叶榉与闽楠表现出截然不同的生态适应能力。除未间伐对照（CK）外，大叶榉在各间伐模式下的地径与苗高生长均显著优于闽楠，这种差异主要源于两者生态习性的不同：大叶榉为喜光树种，幼年期生长较快，兼具较强的水分调节能力、保水能力与抗逆性，因而能够较好地适应 TPM 与 TPH 等“适度遮荫”环境，而在 CK 的高遮荫条件下则受到明显抑制[5, 26]。闽楠虽具耐荫特性，但幼苗期生长缓慢，对环境条件的适应范围较窄，在 CK 下受限于光照不足，在 TPL 的高光照环境下，又可能因不耐强光与干旱胁迫而生长受阻，致使其在两种极端生境下均表现不佳[5, 27]。

3.2　间伐对土壤理化性质的影响

间伐改造对土壤性状的影响具有多重复杂性。在土壤 pH 值方面，尽管部分研究表明其对间伐强度的响应较弱[4, 28–29]或随间伐强度的增大而提高[7, 30]，本研究中香椿人工林土壤 pH 却呈现出先升后降的变化趋势（TPH > CK > TPM > TPL），与曹春芮等[6]的研究结论相似。该变化可能与间伐后林地微环境改变有关：TPH 处理在维持适当郁闭度的同时，改善了林内通风与光照条件，促进枯落物分解和微生物活动，有助于中和土壤酸性，而 TPL 处理则因植被覆盖度显著降低，增强降雨对表土的直接冲刷，加剧盐基离子淋失，从而促进土壤酸化进程[30]。在土壤容重方面，尽管有研究[29–31]认为，间伐有助于降低土壤容重，本研究中，香椿人工林土壤容重却随保留密度下降而显著上升（TPL > TPM > TPH > CK），这一差异可能与林木根系对土壤结构的改良作用相关：CK 和 TPH 处理因保留木较多，其发达的根系持续发挥“生物犁”效应，有效维持了土壤的疏松结构，而 TPL 处理则因林木大量移走导致根系总量锐减，叠加间伐作业中机械和人为活动产生的压实效应，共同导致土壤容重的显著增加[32]。关于土壤水分状况，本研究观察到的土壤含水率随香椿密度降低而递减的趋势（CK > TPH > TPM > TPL）亦与其他研究[30, 33–35]中关于间伐提高土壤含水率的结论有所不同，这可能与林冠层对土壤水分的调控有关：CK 处理凭借茂密的林冠有效减少了阳光直射地表，降低了近地表风速，从而显著抑制了土壤水分的物理蒸发，而随着间伐强度加大，林冠遮阴效果减弱，林内温度升高，空气流动加剧，导致土壤水分蒸发散失量增大[34–35]。

土壤化学性质是衡量土壤肥力与生产潜力的关键指标。合理的间伐改造结合混交措施能够促进土壤有机质的矿化与腐殖化过程，从而有效提升土壤养分含量。在间伐强度对土壤化学性质的影响方面，现有研究存在不同观点。部分研究表明，土壤养分含量随间伐强度的增大而升高。黄木易等[7]研究发现，桉树间伐后与阔叶树混交可改善连作林地的土壤养分状况，其中有机质、全磷、全氮、速效磷、速效氮和速效钾在较低桉树密度的改培林分（桉树纯林间伐后套种珍贵树种形成混交林）中表现较优。李金

武等[4]对香椿中龄林的研究显示，间伐强度为 1/3 的林分土壤碳、氮、磷、钾含量较低，而间伐强度为 1/2 的林分土壤养分则有所回升。另一方面，多项研究支持低强度间伐更有利于土壤养分的积累。戒建涛等[36]报道柳杉（*Cryptomeria fortunei*）人工林土壤全氮、全磷、全钾、水解性氮、速效磷和速效钾含量随间伐强度增加呈下降趋势。王杰等[30]发现，尾巨桉（*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*）林分在低强度间伐补植处理后，能维持较高水平的全氮、硝态氮、铵态氮、全磷、全钾及速效养分含量。丁磊等[32]研究日本落叶松（*Larix kaempferi*）人工林时也指出，低强度均匀间伐有助于提升土壤有机碳、全氮、全磷、全钾、有效磷、有效钾和铵态氮含量。何盼盼等[37]对油松（*Pinus tabuliformis*）林的研究进一步揭示，高密度林分的全氮、全磷、全钾和速效磷含量较高，而低密度林分则在速效氮和有机质方面更具优势。朱燕等[38]同样发现，高密度油松林的土壤有机碳、全氮和全磷含量显著高于其他密度。本研究结果则与低强度间伐的优势观点一致，香椿人工林在 TPH 模式下，土壤有机碳、全氮、全磷、速效钾和速效磷含量均达最高水平。TPH 在维持和提升土壤肥力方面展现出最佳综合效果。其原因可能在于该模式通过将香椿保留密度调控在 1 050 株/hm^2 的适度水平，成功构建一个“高输入、快循环、低损耗”的土壤生态系统。相较于未间伐（CK）的过度郁闭和高强度间伐（TPL）的过度开放，TPH 模式既保留足够的林木以保障凋落物持续输入，为土壤有机质和全量养分的积累提供充足原料，又通过适度改善林内通风透光条件，优化土壤微环境，有效促进微生物活动与凋落物分解速率，从而加速氮、磷、钾等养分的矿化与循环过程。这一机制在显著提升的速效磷（AP）与速效钾（AK）含量上得到直接体现。同时，该模式维持较为发达的林木根系网络，既发挥“生物犁”作用，保持土壤疏松结构，又通过与有机质的协同作用减少钾等养分的淋失风险，最终在“资源输入”与“环境消耗”之间建立最优平衡[36−39]。

3.3 间伐对土壤酶活性的影响

抚育间伐通过改善林冠透光度和林内通风条件，进而影响土壤微环境，是调控土壤酶活性的重要营林措施。已有研究[32,40]表明，间伐有助于显著提升土壤酶活性。成向荣等[41]在杉木人工林中的研究表明，间伐 2 年后，各土层土壤过氧化氢酶、脲酶、磷酸酶及转化酶活性均有所提高，其中强度间伐处理的效果尤为显著。李国雷等[42]对飞播油松林的研究进一步揭示，不同土壤酶对间伐强度的响应存在差异，弱度间伐更有利于过氧化氢酶、脲酶和转化酶活性的提升。然而，亦有研究[43]显示，间伐对部分酶活性影响不显著，表明间伐对土壤酶活性的调控效应具有复杂性，其效果很大程度上取决于间伐后林内环境是否有利于微生物群落的发育[41, 44]。在本研究中，TPH 模式下过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性均显著高于其他处理，而酸性磷酸酶活性则以未间伐的 CK 为最高。这一分异规律揭示不同酶系对间伐强度的特异性响应机制：过氧化氢酶活性的显著提升与 TPH 模式通过适度间伐改善土壤通气状况、增强微生物分解能力密切相关[17]。蔗糖酶活性的突出表现印证了该模式在促进土壤碳循环方面的优势，与卢志锋等[17]观察到的较高土壤有机质含量相吻合。值得注意的是，尽管 TPH 模式下脲酶活性显著增强，表明有机氮矿化过程活跃，但其速效氮含量却是各处理中最低，而全氮含量最高。这一现象揭示 TPH 模式构建的高效氮素循环机制——通过强劲的矿化作用产生的速效氮被旺盛生长的林木快速吸收利用，并同步被土壤微生物固持，从而更多地转化为有机形态储存于土壤库中，实现了氮素在生态系统中的高效循环与持留[17]。与此同时，ACP 活性在 CK 模式下最高则表明，在未间伐的高郁闭度林分中，微生物通过分泌更多磷酸酶以应对磷素限制，而在养分有效性较高的 TPH 模式下，磷素相对充足反而降低了对酸性磷酸酶的依赖。综上所述，TPH 模式通过优化林分结构，在维持较高养分有效性的同时，实现碳、氮循环关键酶活性的显著提升，从而构建更为高效的土壤养分循环体系。

4 结　　论

本研究通过对不同间伐改造模式下香椿人工林的林木生长及土壤理化与酶活性特征的综合分析，得出以下主要结论：

（1）与对照相比，3 种间伐处理（TPH、TPM、TPL）均显著促进了香椿胸径、树高和林分蓄积的增长。其中，TPH 模式最有利于树高和林分蓄积增长，而 TPL 模式最有利于胸径增长。

（2）林下补植的大叶榉树和闽楠的生长在不同间伐处理下存在显著差异。TPM 总体上最有利于两种补植珍贵树种的生长。补植效果表明，适度的上层木疏伐（TPM）能最佳平衡林下光资源与竞争，促进补植苗木建成。

（3）不同处理对香椿人工林土壤理化性质的影响显著。其中，TPH 在改善土壤 pH、有机质、全氮、全磷、速效钾和速效磷方面表现最优；TPM 在提高土壤全钾含量上优势明显；而 CK 则在降低土壤容重、提升含水率与速效氮含量等方面表现最佳。

(4)间伐模式显著改变了土壤酶活性。TPH 模式对提升过氧化氢酶、脲酶和蔗糖酶活性具有最显著的积极影响，而酸性磷酸酶活性在 CK 中最高。

综上所述，适当间伐改造能有效促进香椿人工林林木生长、改善林下补植效果并调节土壤功能。TPH 模式在促进林木树高生长、提升土壤综合肥力及激发土壤生物化学活性方面展现出最全面的积极效应，是实现人工林多功能经营的较优模式。研究结果为干热河谷区香椿人工林近自然化改造与森林质量提升提供了重要的科学依据和参考。

参　考　文　献

[1] 肖兴翠, 索怀俊, 李成勇, 等. 不同间伐强度对香椿中龄林生长和干形的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(3): 10−17.
Xiao X C, Suo H J, Li C Y, et al. Effects of thinning intensity on growth and stem form of middle-aged *Toona sinensis* plantation [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(3): 10−17.

[2] 周祥斌, 周玮, 林玮, 等. 14 个香椿种源生长节律的观测与分析 [J]. 华南农业大学学报, 2016, 37(5): 84−90.
Zhou X B, Zhou W, Lin W, et al. Observation and analysis on growth rhythms of *Toona sinensis* of 14 provenances [J]. Journal of South China Agricultural University, 2016, 37(5): 84−90.

[3] 李成焰, 朱琴, 林林, 等. 四川盆地发展香椿芽蔬菜和香椿用材兼用林前景探讨 [J]. 四川林业科技, 2014, 35(3): 70−75.
Li C Y, Zhu Q, Lin L, et al. The development prospects of vegetables and timber forest of *Toona sinensis* in the Sichuan Basin [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2014, 35(3): 70−75.

[4] 李金武, 余冰, 刘闵豪, 等. 香椿中龄林间伐对林分生长和土壤酶活性及其化学计量比的影响 [J]. 西北林学院学报, 2026, 41(2): 103−111.
Li J W, Yu B, Liu M H, et al. Effects of thinning on soil enzyme activity and stoichiometric ratios in middle-aged *Toona sinensis* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2026, 41(2): 103−111.

[5] 王智慧, 岑祚舟, 刘晓璐, 等. 桂西北干热河谷区马尾松珍贵化改造对林分生长量的影响 [J]. 热带农业科学, 2025, 45(5): 84−88.
Wang Z H, Cen Z Z, Liu X L, et al. Effect of precious species transformation on stand growth in *Pinus massoniana* plantations in the dry-hot valley of northwest Guangxi, China [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2025, 45(5): 84−88.

[6] 曹春芮, 苏维剑, 张新科, 等. 不同间伐强度对桉树人工林生长及土壤理化性质的影响 [J]. 南方农业, 2025, 19(15): 6−10.
Cao C R, Su W J, Zhang X K, et al. Effects of different thinning intensities on the growth and soil physicochemical properties of *Eucalyptus* plantations [J]. South China Agriculture, 2025, 19(15): 6−10.

[7] 黄木易, 梁燕芳, 苏福聪, 等. 桉树不同间伐强度下套种乡土树种对林分生长和土壤理化性质的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(6): 81−90.
Huang M Y, Liang Y F, Su F C, et al. Effects of interplanting native tree species on stand growth and soil physical and chemical properties under different thinning intensities of *Eucalyptus* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2021, 41(6): 81−90.

[8] Marron N, Epron D. Are mixed-tree plantations including a nitrogen-fixing species more productive than monocultures? [J]. Forest Ecology and Management, 2019, 441: 242−252.

[9] 张海燕. 香椿种源生长差异性分析及早期评价 [J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(1): 38−42.
Zhang H Y. Analysis and evaluation of growth difference of different *Toona sinensis* provenances [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(1): 38−42.

[10] 代林利, 白轲, 刘闵豪, 等. 不同处理对香椿容器苗生长的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2025, 45(7): 82−90.
Dai L L, Bai K, Liu M H, et al. Effects of different treatments on the growth of *Toona sinensis* container seedlings [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025, 45(7): 82−90.

[11] 林兴春. 5 个香椿无性系嫁接苗苗期生长节律分析 [J]. 林业勘察设计, 2015(1): 124−127.
Lin X C. Analysis of seedling growth rhythm in five *Toona sinensis* clones' grafted seedlings [J]. Forestry Prospect and Design, 2015(1): 124−127.

[12] 肖华山, 肖祥希, 何文广, 等. 香椿种质资源与快速繁殖研究进展 (综述)[J]. 亚热带植物科学, 2014, 43(4): 343−346.
Xiao H S, Xiao X X, He W G, et al. Research advances on rapid propagation and germplasm in *Toona sinensis* [J]. Subtropical Plant Science, 2014, 43(4): 343−346.

[13] 胡继文, 麻文俊, 沈元勤, 等. 香椿无性系苗期生长及早期选择研究 [J]. 林业科学研究, 2019, 32(4): 165−170.
Hu J W, Ma W J, Shen Y Q, et al. Study on growth traits of different *Toona sinensis* clones and superior clone early selection [J]. Forest Research, 2019, 32(4): 165−170.

[14] 陈美珍. 香椿山地丰产林栽培技术研究 [J]. 防护林科技, 2011(4): 54−56.
Chen M Z. Cultivation techniques of high-yield forest for *Tooha sinensis* mountain [J]. Protection Forest Science and Technology, 2011(4): 54−56.

[15] 汪正新. 香椿速生丰产用材林栽培 [J]. 安徽林业, 2007(6): 38.
Wang Z X. Cultivation of fast-growing and high-yield timber plantations of *Toona sinensis* [J]. Anhui Forestry Science and Technology, 2007(6): 38.

[16] 周小玲, 袁穗波, 李二平, 等. 香椿丰产栽培技术研究 [J]. 中南林学院学报, 1997, 17(4): 64−69.
Zhou X L, Yuan S B, Li E P, et al. High-yield cultural techniques of *Toona sinensis* [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 1997, 17(4): 64−69.

[17] 卢志锋, 高风, 钟萍, 等. 广西干热河谷不同林龄香合欢群落多样性、土壤理化性质及酶活性特征 [J]. 热带农业科学, 2024, 44(10): 31−39.

Lu Z F, Gao F, Zhong P, et al. Characteristics of different forest stands of community diversity and soil physicochemical properties and enzyme activities in *Albizia odoratissima* forests in the dry and hot river valleys of Guangxi [J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2024, 44(10): 31−39.

[18] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
Guan S Y. Soil enzymes and their research methods [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986.

[19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Lu R k. Methods for soil agricultural chemical analysis [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000.

[20] 卢德浩, 冯铭淳, 黄焕强, 等. 间伐保留密度对杉木人工林生长的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2024, 52(4): 9−16.
Lu D H, Feng M C, Huang H Q, et al. Effect of thinning retention density on the growth of Chinese fir plantation [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2024, 52(4): 9−16.

[21] 王毓靖, 颜忠鹏, 李志辉. 不同间伐强度对桉树人工林林分生长的影响 [J]. 桉树科技, 2019, 36(3): 36−41.
Wang Y J, Yan Z P, Li Z H. Effects of different thinning intensities on stand growth of *Eucalyptus* plantation [J]. Eucalypt Science & Technology, 2019, 36(3): 36−41.

[22] 尤文忠, 赵刚, 张慧东, 等. 抚育间伐对蒙古栎次生林生长的影响 [J]. 生态学报, 2015, 35(1): 56−64.
You W Z, Zhao G, Zhang H D, et al. Effects of thinning on growth of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(1): 56−64.

[23] 钟思琪, 宁金魁, 黄锦程, 等. 基于混合效应的杉木人工林冠幅模型 [J]. 森林与环境学报, 2024, 44(2): 127−135.
Zhong S Q, Ning J K, Huang J C, et al. Crown width model of Chinese fir plantation based on mixed effect [J]. Journal of Forest and Environment, 2024, 44(2): 127−135.

[24] 陈贝贝, 姜俊, 陆元昌, 等. 间伐强度对马尾松人工林冠下套种树种生长的影响 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(1): 58−65.
Chen B B, Jiang J, Lu Y C, et al. Effects of thinning intensity on the growth of interplanting broadleaved trees under *Pinus massoniana* plantation [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(1): 58−65.

[25] 曾冀, 朱雪萍, 唐继新, 等. 杉木人工林间伐后套种阔叶树种的生长动态 [J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 97−103.
Zeng J, Zhu X P, Tang J X, et al. Growth dynamic of hardwood species inter-planted under intensively thinned *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(5): 97−103.

[26] 周世武. 大叶榉树栽培技术 [J]. 现代农业科技, 2023(16): 126−128,132.
Zhou S W. Cultivation techniques for *Zelkova serrata* [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2023(16): 126−128,132.

[27] 魏阿荣. 抚育间伐对杉木人工林及套种楠木生长的影响 [J]. 绿色科技, 2021, 23(23): 117−119.
Wei A R. Effects of thinning on the growth of Chinese fir plantations and intercropped *Phoebe zhennan* [J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(23): 117−119.

[28] 汪星星, 廖文海, 孟芳芳, 等. 林分密度对杉木人工林土壤理化性质和酶活性的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2023, 52(3): 329−336.
Wang X X, Liao W H, Meng F F, et al. Effect of stand density on soil physicochemical properties and enzyme activities of Chinese fir plantations [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2023, 52(3): 329−336.

[29] 杨贺, 刘盛, 李国伟, 等. 修枝和间伐对长白落叶松人工幼龄林下草本植物多样性和土壤理化性质的短期影响 [J]. 南京林业大学学报 (自然科学版), 2026, 50(2): 187−195.
Yang H, Liu S, Li G W, et al. The short-term effects of pruning and thinning on the diversity of herbaceous plants and soil physicochemical properties under the artificial *Larix olgensis* young forest [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2026, 50(2): 187−195.

[30] 王杰, 杨梅, 徐圆圆, 等. 间伐后不同处理对尾巨桉林分光环境及土壤理化性质的影响 [J]. 广西林业科学, 2023, 52(4): 411−418.
Wang J, Yang M, Xu Y Y, et al. Effects of different treatments after thinning on light environment and soil physicochemical properties of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations [J]. Guangxi Forestry Science, 2023, 52(4): 411−418.

[31] 王立超. 间伐及修枝对黄河三角洲典型林分生长和土壤理化特征的影响 [D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
Wang L C. Effects of thinning and pruning on growth and soil physical and chemical characteristics of typical stands in the Yellow River Delta [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.

[32] 丁磊, 潘丕克, 李淳, 等. 间伐方式对日本落叶松人工林生长状况、林下植物多样性及土壤性质的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2024, 53(4): 483−490.
Ding L, Pan P K, Li C, et al. Effect of thinning method on growth, understory plant diversity and soil characteristics of *Larix kaempferi* plantation [J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2024, 53(4): 483−490.

[33] 贾忠奎, 温志勇, 贾芳, 等. 北京山区侧柏人工林水源涵养功能对抚育间伐的响应 [J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 62−66,71.
Jia Z K, Wen Z Y, Jia F, et al. Effects of thinning on water conservation of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing mountain area [J]. Journal of Soil and Water Conservasion, 2012, 26(1): 62−66,71.

[34] 刘杰. 抚育间伐和修枝对华北落叶松人工林土壤质量影响的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
Liu J. Thinning and pruning effect on soil quality in *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013.

[35] 颜忠鹏. 不同抚育间伐强度对桉树人工林林分及土壤性质的影响 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
Yan Z P. Effects of different tending thinning intensities on stands and soil properties of *Eucalyptus* plantations [D]. Changsha:

Central South University of Forestry & Technology, 2019.

[36] 戎建涛, 张晓红, 郜爱玲, 等. 不同间伐强度经营对柳杉人工林土壤理化性质的影响 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 206−211.
Rong J T, Zhang X H, Gao A L, et al. Effects of different thinning intensity managements on soil physicochemical properties of *Cryptomeria fortunei* plantations [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(4): 206−211.

[37] 何盼盼, 马全林, 陈徵尼, 等. 密度调控对陇西黄土高原油松人工林林下植被与土壤环境的影响 [J]. 中南林业科技大学学报, 2024, 44(12): 143−153.
He P P, Ma Q L, Chen Z N, et al. Effects of density regulation on understory vegetation and soil environment of *Pinus tabuliformis* plantation on Longxi Loess Plateau [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2024, 44(12): 143−153.

[38] 朱燕, 翟博超, 孙美美, 等. 黄土丘陵区不同密度刺槐和油松人工林土壤理化性质与化学计量特征 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 160−167.
Zhu Y, Zhai B C, Sun M M, et al. Soil physicochemical properties and stoichiometry characteristies in *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabuliformis* plantations across different densities in the loess hilly region [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 160−167.

[39] 吕金林, 闫美杰, 宋变兰, 等. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2017, 37(10): 3385−3393.
Lü J L, Yan M J, Song B L, et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in an oak forest and a black locust plantation in the loess hilly region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(10): 3385−3393.

[40] 张鼎华, 范必有, 危廷林. 抚育间伐对人工林土壤肥力的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 672−676.
Zhang D H, Fan B Y, Wei T L, et al. Influence of thinning on soil fertility in artificial forest [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 672−676.

[41] 成向荣, 袁健军, 刘佳, 等. 间伐对杉木人工林土壤酶和活性有机碳的短期影响 [J]. 中国农学通报, 2014, 30(4): 17−22.
Cheng X R, Yuan J J, Liu J, et al. Short-term effects of thinning on soil enzyme and soil labile organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(4): 17−22.

[42] 李国雷, 刘勇, 甘敬, 等. 飞播油松林地土壤酶活性对间伐强度的季节响应 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(2): 82−88.
Li G L, Liu Y, Gan J, et al. Seasonal response of soil enzyme activity to thinning intensity in aerial seeding *Pinus tabulaeformis* stands [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(2): 82−88.

[43] Maassen S, Fritze H, Wirth S. Response of soil microbial biomass, activities, and community structure at a pine stand in northeastern Germany 5 years after thinning [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2006, 36(6): 1427−1434.

[44] 耿玉清, 戴伟, 余新晓, 等. 森林经营对土壤酶活性影响的研究进展 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(增刊 2): 132−138.
Geng Y Q, Dai W, Yu X X, et al. Research advances for the effects of forest management on soil enzyme activity [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(Suppl.2): 132−138.

（责任编辑　李　契
责任编委　孙向阳）