

不同改造措施对杉木林分生长和碳储量的影响

潘召龙^{1,2}, 袁慧¹, 杜超群¹, 艾训儒², 许业洲¹, 曹越¹, 潘磊¹

(1.湖北省林业科学研究院, 湖北 武汉 430075; 2.湖北民族大学 林学院园艺学院, 湖北 恩施 445000)

摘要: [目的] 探讨不同改造措施对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林分生长和碳储量的影响, 为该地区杉木林制定合理的改造措施提供理论依据。[方法] 以湖北省太子山石龙林场管理局杉木人工林为研究对象, 在近自然改造理论指导下, 采取间伐补植(T_1 , 间伐强度 50% 并补植木荷(*Schima superba*))和间伐(T_2 , 间伐强度 50%)措施, 以未改造样地为对照(CK), 测定了不同改造措施下杉木胸径、树高、单株材积、蓄积量, 分析胸径结构分布, 并比较乔木层、灌木层、草本层、植被层碳储量的差异。[结果] T_1 措施的胸径和单株材积 3 a 增长量均显著高于 CK ($p < 0.05$), 不同改造措施间树高增长量无显著差异 ($p > 0.05$)。 T_1 和 T_2 处理的中大径阶(≥ 20 cm)林木比例显著提升, CK 仍以小径阶林木为主。 T_1 处理中, 胸径 3 a 增长量在 2~4 cm 范围内的林木株数占比达 28.3%, 较 CK 显著提高 23.7%, 改造措施(尤其 T_1)使林分径阶结构向大径级方向偏移。各措施植被层碳储量均表现为: 乔木层 > 灌木层 > 草本层, T_1 措施的植被层及乔木层碳储量 3 a 增长量与 CK 无显著差异 ($p > 0.05$), 尽管 T_1 措施当前植被层总碳储量仍低于 CK (主要受间伐初期林木减少影响), 但其后期较高的碳储量增长速度表明其长期固碳潜力更大; 灌木层和草本层碳储量在各措施间无显著差异 ($p > 0.05$), 然而, T_1 提高了灌木层碳储量的年均增量, T_2 则提高了草本层碳储量的年均增量。[结论] 间伐补植在促进杉木人工林生长、结构优化及关键碳库(乔木层)恢复与增长方面, 效果显著优于间伐。在湖北太子山同类型杉木人工林的近自然化改造及提升森林碳汇功能实践中, 推广应用间伐补植木荷技术是更为合理的选择。

关键词: 杉木; 人工林退化; 近自然改造; 生长量; 碳储量; 太子山石龙林场

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)06-0280-10

中图分类号: S753.5, S791.27

文献参数: 潘召龙, 袁慧, 杜超群, 等. 不同改造措施对杉木林分生长和碳储量的影响[J]. 水土保持通报, 2025, 45(6): 280-289. Pan Zhaolong, Yuan Hui, Du Chaoqun, et al. Effects of different retrofitting measures on growth and carbon stocks in *Cunninghamia lanceolata* forest [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(6): 280-289.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.06.030

CSTR: 32312.14.stbctb.2025.06.030

Effects of different retrofitting measures on growth and carbon stocks in *Cunninghamia lanceolata* forest

Pan Zhaolong^{1,2}, Yuan Hui¹, Du Chaoqun¹, Ai Xunru², Xu Yezhou¹, Cao Yue¹, Pan Lei¹

(1.Hubei Academy of Forestry Science, Wuhan, Hubei 430075, China;

2.School of Forestry and Horticulture, Hubei Minzu University, Enshi, Hubei 445000, China)

Abstract: [Objective] The effects of different retrofitting measures on the growth and carbon stock of *Cunninghamia lanceolata* plantations were evaluated, in order to provide a theoretical basis for developing optimal forest retrofitting strategies for the region. [Methods] The research was conducted within *C. lanceolata* plantations at Taizishan Shilong Forestry Retrofitting Bureau, Hubei Province. Guided by near-natural forest retrofitting principles, three treatments were applied: thinning with replanting (T_1 , 50% thinning intensity with interplanting of *Schima superba*), thinning only (T_2 , 50% thinning intensity), and an unimproved control (CK). Diameter at breast height (DBH), tree height, individual tree volume, stand volume, and DBH class distribution were measured. Carbon stocks within the tree layer, shrub layer, herb layer, and total vegetation layer were also

收稿日期: 2025-07-22

修回日期: 2025-08-21

采用日期: 2025-08-21

资助项目: 国家重点研发计划专题“低质低效人工林群落结构优化技术集成与固碳增产效应评价(2023YFF1304402-08)”; 湖北省林业科技支撑重点项目“杉木人工林质量提升与固碳增汇关键技术研发”([2022]LYKJ03)

第一作者: 潘召龙(1999—), 男(汉族), 河北省邯郸市人, 硕士研究生, 研究方向为森林经营与森林生态。Email: 2482891129@qq.com。

通信作者: 潘磊(1976—), 男(汉族), 湖北省仙桃市人, 博士, 研究员, 主要从事森林生态研究。Email: panlei2008@126.com。

quantified and compared among treatments. [Results] After three years, DBH growth and individual tree volume increment were significantly higher in T_1 compared to CK ($p < 0.05$). Tree height growth showed no significant differences among treatments ($p > 0.05$). The T_1 and T_2 treatments significantly increased the proportion of trees in medium and large DBH classes (≥ 20 cm), while CK still dominated with small-diameter trees. Specifically, in T_1 , the proportion of trees with DBH increments of 2—4 cm over three years was 28.3%, representing a 23.7% increase over CK. Overall, the thinning measures, particularly T_1 , shifted the stand DBH distribution towards larger diameter classes. Carbon stock allocation within the vegetation layer followed the order: tree layer $>$ shrub layer $>$ herb layer across all treatments. The three-year growth in total vegetation layer carbon stock and tree layer carbon stock within T_1 did not differ significantly from CK ($p > 0.05$). Although the total vegetation carbon stock in T_1 remained lower than CK (primarily due to tree removal during thinning), its higher subsequent growth rate indicated greater long-term carbon sequestration potential. Carbon stock growth within the shrub and herb layers showed no significant differences among treatments ($p > 0.05$). However, T_1 significantly increased the mean annual increment (MAI) of carbon stock in the shrub layer, while T_2 significantly increased the MAI in the herb layer. [Conclusion] Thinning combined with replanting *C. lanceolata* demonstrated significant advantages over thinning alone in promoting the growth of dominant *C. lanceolata* trees, optimizing stand structure, and enhancing the carbon stock growth rate within the key carbon pool (tree layer). Consequently, T_1 represents a more suitable approach for promoting near-natural retrofitting in similar Chinese fir plantations and enhancing forest carbon sink functionality in the Taizi Mountain region of Hubei Province.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; degraded plantation forests; close-to-nature retrofitting; carbon stock; stand growth; Taizi Mountain Shilong forest farm

人工林在保障木材供给、维护生态安全和减缓气候变化等方面发挥着日益重要的作用^[1]。然而,相较于天然林,人工林在生物多样性保护及水土保持等生态系统服务功能方面通常存在不足^[2]。优化经营措施是提升其综合服务效能的关键途径^[3-4]。中国作为全球人工林面积最大的国家,拥有丰富的成熟林与近熟林资源,且生态公益林比例持续增加^[5],迫切需要通过科学经营(特别是调控林分组成与结构^[3]),协同提升其经济与生态效益,实现可持续发展。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国主要的人工造林树种之一,其面积和蓄积分别占全国主要优势树种人工林的25%和33%^[5]。然而,当前广泛存在的单一纯林、高密度经营模式,导致林分结构简单、生态系统稳定性下降、立地生产力衰退^[6],难以满足市场对大径级木材的持续增长需求^[7]。研究表明,构建混交林(特别是通过间伐后补植乡土阔叶树种)能有效优化林分空间结构、缓解种内竞争、促进目标树(大径材)生长,并显著提升生物多样性和综合生态效益^[8]。值得注意的是,间伐等措施短期内可能因移除生物量导致碳储量下降,但长期来看,通过释放生长空间,促进保留木加速生长,可产生补偿效应,甚至实现碳储量的净增长^[9]。

尽管混交改造与间伐对杉木人工林的积极效应已获得一定认识,但研究空白依然显著。湖北省作

为杉木自然分布的北缘,近年来频发的干旱高温事件已严重威胁该区域杉木人工林的生存,导致普遍的生长衰退与枯死。针对这一生态敏感脆弱区,成熟杉木人工林对不同改造措施的响应,尤其是关键生长指标、林分结构优化及碳储量恢复动态,尚不明确。因此,本研究聚焦湖北北缘生态脆弱区的成熟杉木人工林,通过对比间伐补植木荷(*Schima superba*)与间伐两种改造措施,旨在评估杉木个体生长与林分蓄积动态、林分胸径结构特征、林分碳储量动态是否存在显著差异,并验证间伐补植措施是否具有更优的综合效益。研究结果将为湖北省及同类地区杉木人工林的质量精准提升,结构优化调控,固碳能力增强及差异化经营策略提供科学依据。

1 研究区概况

研究区地处湖北省太子山林场管理局石龙林场(112°48'45"—113°03'45"E, 30°48'30"—31°02'30"N),北临大洪山,南邻江汉平原。区域地势自北东向南西渐次递减,山脉呈北西—南东走向,溪流系统沿北东至南西方向发育。地貌类型可划分为低山、低山丘陵、丘陵、岗地及溪谷5类。经营总面积7 600 hm²,森林覆盖率83%,活立木总蓄积量为4.57×10⁵ m³。该区域位于北亚热带向中亚热带过渡带,属北亚热带湿润季风气候,年均气温16.4℃,无霜期240 d,年日照时数1 949.9 h,年降水量1 094.6 mm;海拔

40.3~467.4 m。土壤类型为黄棕壤,呈弱酸性(pH 5.5~6.6)。林场植被多样性显著,主要建群树种包括杉木、马尾松(*Pinus massoniana*)、柏木(*Cupressus funebris*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、元宝枫(*Acer truncatum*)、冬青(*Ilex chinensis*)、红果冬青(*I. rubra*)及樟(*Camphora officinarum*)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

在太子山石龙林场,选择 1996 年杉木实生苗造林,分别于 2007 年、2013 年及 2019 年分阶段实施相

同间伐强度的间伐作业,并在 2020 年 1 月,每个间伐样地行状补植 50 株木荷。设置 2 种近自然改造措施,其中 T_1 为 50% 间伐强度+补植木荷, T_2 为 50% 间伐强度,CK 为纯林对照。每种处理设置 3 个重复,共建立 9 块 20 m×30 m 的固定样地,每块样地周围均设 12 m 宽缓冲带。分别于 2021 年和 2024 年底对改造林样地进行调查,对样地内所有活立木进行每木检尺,主要调查林分因子包括胸径、树高、冠幅、郁闭度、地理坐标、海拔、坡向、坡度及坡位。因 2021 年与 2024 年杉木、木荷保留密度基本一致,故样地概况选用 2024 年数据(表 1)。

表 1 太子山石龙林场样地概况

Table 1 Overview of sample plots at Taizi Mountain Shilong forest farm

样地号	处理	杉木保留密度/ (株·hm ⁻²)	木荷成活密度/ (株·hm ⁻²)	杉木平均 胸径/cm	杉木平均 树高/m	郁闭度
1	T_1	567	750	21.2	15.7	0.6
2	T_2	583	—	19.9	15.0	0.6
3	CK	1 017	—	18.4	15.4	0.9
4	T_1	650	750	17.4	13.3	0.6
5	T_2	667	—	19.5	15.1	0.6
6	CK	1 133	—	18.0	15.0	0.9
7	T_1	550	750	21.2	15.4	0.6
8	T_2	567	—	18.1	14.1	0.6
9	CK	1 133	—	17.4	14.8	0.9

注: T_1 为 50% 间伐强度+补植木荷; T_2 为 50% 间伐强度;CK 为纯林对照。

2.2 样品采集与处理

基于 20 m×30 m 固定样地,依据乔木胸径调查数据,采用《主要树种立木生物量模型与碳计量参数》所载异速生长方程^[10]计算单株生物量。通过样地内所有单株生物量累加获得林分生物量,并折算为单位面积生物量(t/hm²)。每个样地内随机布设 3 个 3 m×3 m 灌木样方与 5 个 1 m×1 m 草本样方,测定灌草生物量。采用刈割法分离灌草地上与地下部分,分别称重后取样(灌木 400~500 g,草本 150~250 g),并于 85 °C 恒温烘箱中烘干至恒质量。用乔木层、灌木层与草本层生物量分别乘以相应的碳转换系数(0.499 0,0.435 6,0.361),即可得出各层碳储量。

2.3 单株材积和林分蓄积量计算

基于实测杉木胸径与树高数据,应用杉木二元材积公式^[11]测算单株材积。样地总材积由内部所有单株材积累加获得,而单位面积蓄积量则为该区域内杉木平均单株材积与林木株数的乘积。计算公式为

$$V = 0.000\ 062\ 678 \cdot D^{1.704\ 3} \cdot H^{1.148\ 6} \quad (1)$$

式中: V 为单株材积(m³); D 为胸径(cm); H 为树高(m)。

2.4 林分直径分布偏度、峰度计算

为评估近自然改造措施对大径材培育的成效,依据《杉木大径材培育技术规程》^[12]林业标准,将胸径≥26,20~26 和 <20 cm 的林木分别定义为大径材、中径材和小径材。对 T_1 , T_2 ,CK 样地内所有活立木,以 2 cm 径阶距进行划分,统计各径阶株数及林分的直径分布情况,并计算偏度(S_k)和峰度(K),描述不同改造措施的直径分布特征^[13],各处理 3 a 增长量以 1 cm 径阶划分。计算公式为

$$S_k = n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 / (n-1)(n-2)\sigma^3 \quad (2)$$

$$K = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 / \sigma^4 \right] - 3 \quad (3)$$

式中: n 为林分内活立木株数; x_i 为林分活立木直径; \bar{x} 为林分平均直径; σ 为标准差。

2.5 碳储量

植被层碳储量的计算公式为

$$T_G = T_t + T_s + T_h \quad (4)$$

式中: T_G 为植被层碳储量(t); T_t 为乔木层碳储量(t); T_s 为灌木层碳储量(t); T_h 为草本层碳储量(t)。

2.6 数据处理

对数据进行正态性检验(Shapiro-Wilk test)和方差齐性检验(Levene's test)。运用SPSS 24.0软件对不同处理的林分生长状况及碳储量数据执行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用LSD进行多重比较检验,数据可视化通过Origin 2024软件实现。

3 结果与分析

3.1 不同改造措施对杉木人工林生长量的影响

研究结果(表2)表明,杉木人工林改造初期与改造3 a后均表现为 T_1 、 T_2 处理平均胸径及平均树高均呈现增长,相较于CK, T_1 和 T_2 的平均胸径增长差异显著($p < 0.05$),而树高差异未达显著水平($p > 0.05$), T_1 林分的平均胸径增长量及年增长率均显著高于 T_2 和CK($p < 0.05$);树高增长量及年均增长率虽高于CK和 T_2 ,但差异不显著($p > 0.05$);改造初期、改造3 a后、3 a增长量单株材积均表现为: $T_1 > T_2 > CK$,而蓄积量排序则为: $CK > T_1 > T_2$ 。林分改造显著促进了生长, T_1 增速最大(胸径0.53 cm/a;材积0.016 m³/a),CK蓄积增长量最大(0.754 m³/a)。林分总蓄积量由单株材积和林木株数共同决定,近自然改造措施虽有效促进杉木人工林胸径与树高的生长速率,其胸径的提升尤为显著,但本研究 T_1 和 T_2 处理显著降低保留株数,与CK相比, T_1 处理尤为显著,其单株材积增长量提高38.24%($p < 0.05$),年增长率提高22.61%($p < 0.05$),但蓄积量增长量却降低26.65%。改造措施虽促进单株生长,但因显著降低株数,导致短期蓄积补偿不足,致使 T_1 和 T_2 的总蓄积量仍低于CK。差异主因在于 T_2 的50%间伐强度或超过短期恢复阈值,增量最低; T_1 补植优化林分结构与资源利用,缓解间伐负效应;CK凭借株数优势维持高蓄积量,缺乏结构优化带来的可持续增长动力。因此,间伐强度是调控短期蓄积响应的关键因子,而结合补植的结构优化(T_1)展现出更可持续的长期潜力。

3.2 不同改造措施对杉木人工林胸径结构特征的影响

不同改造措施影响杉木人工林的胸径结构分布(图1)。改造初期,除 T_2 呈多峰分布外,其他均为单峰分布;2种改造措施中,径阶20 cm以上峰值对应为22 cm径阶,其中 T_1 峰值分别比 T_2 和CK高0.028 7和0.209 8。改造3 a后除 T_1 转为多峰分布外,其他仍为单峰分布; T_2 与CK径阶20 cm以上峰值仍为22径阶, T_1 峰值由22 cm径阶变为24 cm径阶,且 T_1 峰值分别比 T_2 和CK高0.098 7和0.234 7。由此可见, T_1

中大于中大径阶峰值迁移幅度达58.49%,高于CK,同时,混交改造(T_1)比间伐(T_2)更显著缓解杉木竞争压力,表现为 T_1 的中大径阶峰值迁移幅度较 T_2 提高9.67%,表明木荷补植通过种间互补进一步优化杉木生长空间。 T_1 措施直径分布曲线的峰值呈现向高阶移动的趋势明显。

表2 不同改造措施对林分胸径、树高、单株材积和蓄积量的影响

Table 2 Effects of different retrofitting measures on stand diameter at breast height, tree height, volume of timber per plant and volume of standing stock

指标	改造措施	改造初期	改造3 a后	3 a增长量	年平均增长率/%
DBH/cm	T_1	18.2 ^a	19.8 ^a	1.6 ^a	2.930 ^a
	T_2	18.1 ^a	19.2 ^a	1.1 ^b	2.026 ^c
	CK	16.8 ^b	17.9 ^b	1.2 ^b	2.380 ^b
树高/m	T_1	13.7 ^a	14.7 ^a	1.1 ^a	2.676 ^a
	T_2	13.8 ^a	14.7 ^a	0.9 ^a	2.174 ^a
	CK	14.1 ^a	15.0 ^a	0.9 ^a	2.128 ^a
单株材积/m ³	T_1	0.186 ^a	0.233 ^a	0.047 ^a	8.422 ^a
	T_2	0.181 ^a	0.216 ^{ab}	0.035 ^b	6.446 ^b
	CK	0.165 ^b	0.200 ^b	0.034 ^b	6.869 ^b
总蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²)	T_1	6.575 ^b	8.235 ^b	1.660 ^b	8.416 ^a
	T_2	6.586 ^b	7.845 ^b	1.259 ^b	6.372 ^b
	CK	10.852 ^a	13.115 ^a	2.263 ^a	6.951 ^b

注:相同指标不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$)。

综合偏度与峰度指标分析(表3)及分布曲线形态(图1),结果表明,杉木人工林改造3 a后, T_1 和 T_2 的直径分布呈现右偏趋势(偏度 > 0 ,表明中大径阶林木占比较高),而CK的分布则接近对称(偏度 ≈ 0);同时, T_2 和 T_1 的分布峰度相对更高(改造3 a后 T_2 峰度 > 0 , $T_1 < 0$ 但绝对值较小),其直径分布范围较CK相对更窄,即林木径阶分化程度相对较低。

表3 不同改造措施胸径径阶分布特征值
Table 3 Characteristic values of diameter step distribution of breast diameter with different retrofitting measures

时期	改造措施	偏度	峰度
改造初期	T_1	0.451±0.20	0.099±0.79
	T_2	0.710±0.02	0.094±0.37
	CK	-0.008±0.20	-0.004±0.29
改造3 a后	T_1	0.335±0.20	-0.170±0.55
	T_2	0.661±0.06	0.144±0.51
	CK	-0.022±0.24	0.078±0.37

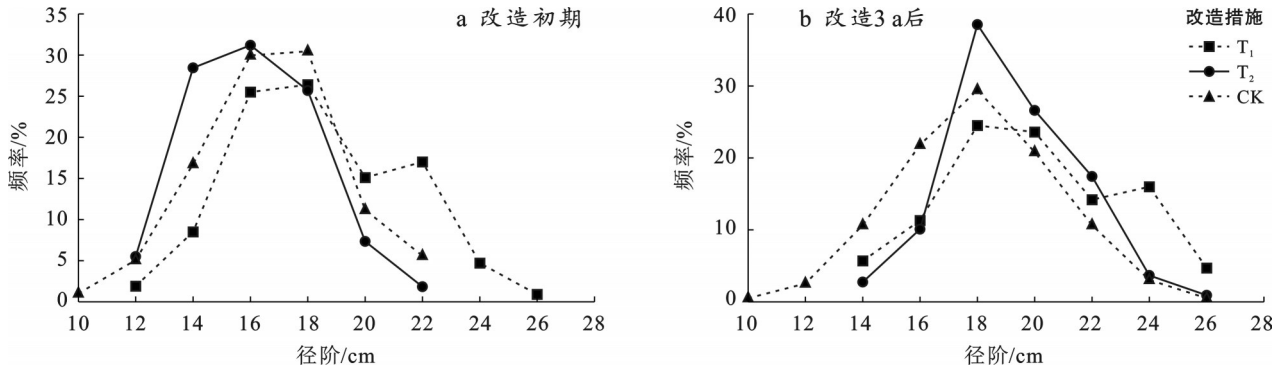


图1 不同改造措施径阶变化特征

Fig.1 Characteristics of changes in diameter steps of different retrofitting measures

各改造林分的直径分布(详见图1)表明,改造初期,以小径材为主,CK, T₁, T₂的小径阶材分别占90.36%, 71.7%和81.65%。改造3 a后,小径材占比下降,CK, T₁, T₂分别降至77.66%, 54.72%和64.15%,同时T₁中大径材占比达45.28%,较T₂和CK分别提高26.30%和103.00%,表明其中大径材转化效率最优。

改造措施改变了林木3 a增长量株数分布频率(图2)。在0~4 cm径阶中,T₁中2~4 cm径阶株数占比达28.3%,显著高于CK(4.6%)和T₂(2.8%),表明补植措施有效促进杉木生长径阶右移过渡,这与前述直径分布右偏趋势(T₁偏度值0.335)及峰值向高阶移动特征一致。林分密度降低,促使杉木直径分布向高阶径级偏移。

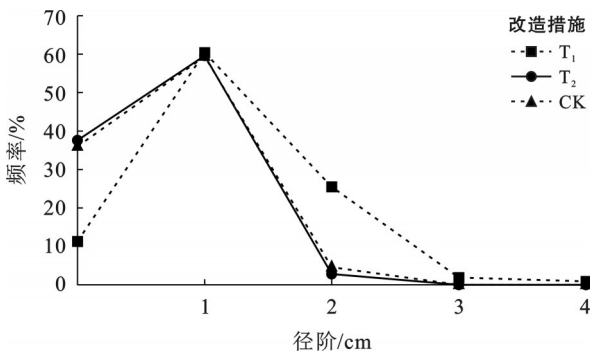


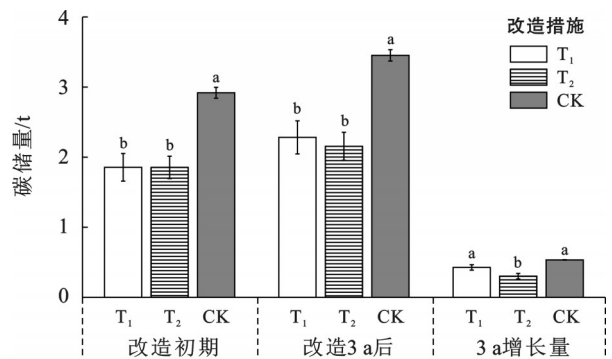
图2 不同改造措施3 a增长量径阶株数变化频率

Fig.2 Plant number changing frequency in 3-year growth radial order of different retrofitting measures

3.3 不同改造措施对杉木人工林碳储量的影响

乔木层是植被层碳储量的主体(占比>92%),其碳储量动态受改造措施影响显著($p<0.05$),并呈现阶段性特征。改造初期,CK乔木层碳储量(2.919 t)显著高于T₁(1.855 t)和T₂(1.854 t)。改造3 a后,CK碳储量(3.452 t)仍显著高于T₁(2.282 t)和T₂(2.155 t)。然而,各处理间乔木层3 a碳储量增量存在显著差异

($p<0.05$), T₁措施的增量(0.427 t)显著高于T₂(0.301 t; $p<0.05$),且与CK的增量(0.533 t)无显著差异($p>0.05$)。同期,T₁, T₂, CK措施下乔木层碳储量占比分别下降2.73%, 2.11%, 1.49%。改造初期与改造3 a后均显著抑制乔木层碳储量,造成初始损失(表现为显著低于CK)。T₁措施显著促进乔木层碳储量的增长,其增量接近CK, T₂措施增量显著低于T₁措施。尽管T₁措施乔木层占比下降最多,但其碳储量增量上的显著优势(相比T₂),揭示在改造后短期内乔木层碳积累具有更高的促进效率。这一规律凸显T₁措施在提升乔木层碳汇功能上的相对优势(表4,图3)。



注:相同指标不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

图3 不同改造措施对乔木层碳储量的影响

Fig.3 Effects of different retrofitting measures on carbon storage in tree layer

相较于乔木层,灌木层碳储量占比较小且基数较低,但其动态对改造措施仍表现出一定的响应特征。改造初期,T₂灌木层碳储量最高(0.095 t),CK次之(0.082 t),T₁最低(0.057 t)。改造3 a后,T₂碳储量(0.148 t)仍为最高,CK和T₁分别为0.145 t和0.131 t。灌木层3 a碳储量增量依次为T₁(0.067 t)>CK(0.065 t)>T₂(0.046 t)。同期,T₁, T₂, CK灌木层碳储量占比分别上升2.41%, 1.50%, 1.28%。不

同改造措施灌木层碳储量及其 3 a 增量均未达到统计学显著水平 ($p > 0.05$), 表明改造措施对灌木层碳储量的影响强度相对较弱。在改造初期与改造 3 a 后, T_2 处理的灌木层碳储量始终最高, 显示出 T_2 措施可能更有利于维持或积累灌木层碳储量。尽管改造初期 T_1 措施的灌木层碳储量基数最低, 但其在 3 a 间表现出最大的 3 a 增量 (0.067 t) 和最大增幅 (2.41%)。这表明 T_1 措施更有利于促进灌木层碳储量的增长, 尤其是在改造初期 (人为除杂后)。在非显著水平上, T_2 措施维持较高碳储量的趋势, 而 T_1 措施则表现出促进碳储量增长的潜力 (表 4, 图 4)。

草本层是植被层中碳储量最低的组分, 其动态对不同改造措施的响应最为微弱。改造初期, 草本层碳储量, CK, T_1 和 T_2 分别为 0.017, 0.016 和 0.015 t。改造 3 a 后, T_2 , T_1 和 CK 分别为 0.032, 0.028 和 0.028 t。草本层 3 a 碳储量增量表现为 T_2 (0.017 t) $>$ T_1 (0.012 t) $>$ CK (0.011 t), 同期, T_2 , T_1 , CK 草本层碳储量占比分别上升 0.61%, 0.32% 和 0.21%。不同改造措施草本层碳储量及其 3 a 增量均未达到统计学显著水平 ($p > 0.05$), 表明改造措施对草本层碳储量的影响有限。尽管整体差异不显著, 数据仍显示出一定的

非显著趋势性差异。改造初期 CK 林分最高, T_2 林分最低, 但在改造 3 a 后, T_2 林分最高, 表明 T_2 措施可能更有利于促进草本层碳储量的增长。 T_1 措施碳储量增量虽低于 T_2 , 仍高于 CK。表明不同改造措施均有助于草本层的碳积累, 尤其 T_2 措施呈现最大增量 (0.017 t) 和最大增幅 (0.61%)。在非显著水平上, 不同措施间存在微弱的趋势性差异, 其中 T_2 措施表现出相对更有利于草本层碳储量积累的潜力 (表 4, 图 5)。

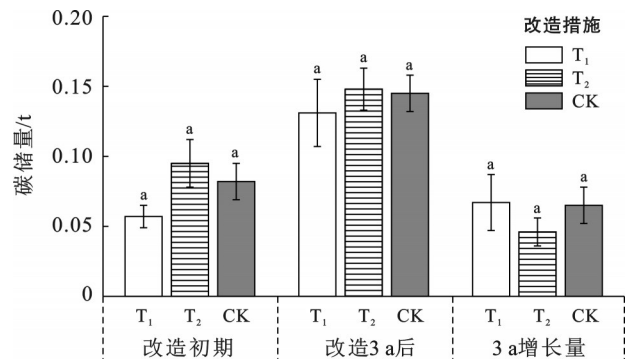


图 4 不同改造措施对灌木层碳储量的影响
Fig.4 Effects of different retrofitting measures on carbon storage in shrub layer

表 4 不同改造措施下杉木人工林植被层碳储量及其百分比
Table 4 Carbon stocks and its percentage of vegetation layer in *Cunninghamia lanceolata* plantation forest by different rehabilitation measures

处理	改造初期				改造 3 a 后				3 a 增量			
	乔木	灌木	草本	小计	乔木	灌木	草本	小计	乔木	灌木	草本	小计
T_1	1.855 (96.21%)	0.057 (2.96%)	0.016 (0.83%)	1.928 (100%)	2.282 (93.48%)	0.131 (5.37%)	0.028 (1.15%)	2.441 (100%)	0.427 (84.39%)	0.067 (13.24%)	0.012 (2.37%)	0.506 (100%)
T_2	1.854 (94.40%)	0.095 (4.84%)	0.015 (0.76%)	1.964 (100%)	2.155 (92.29%)	0.148 (6.34%)	0.032 (1.37%)	2.335 (100%)	0.301 (82.69%)	0.046 (12.64%)	0.017 (4.67%)	0.364 (100%)
CK	2.919 (96.72%)	0.082 (2.72%)	0.017 (0.56%)	3.018 (100%)	3.452 (95.23%)	0.145 (4%)	0.028 (0.77%)	3.625 (100%)	0.533 (87.52%)	0.065 (10.67%)	0.011 (1.81%)	0.609 (100%)

注: 括号外数值为碳储量(t), 括号内数值为其所占比例。

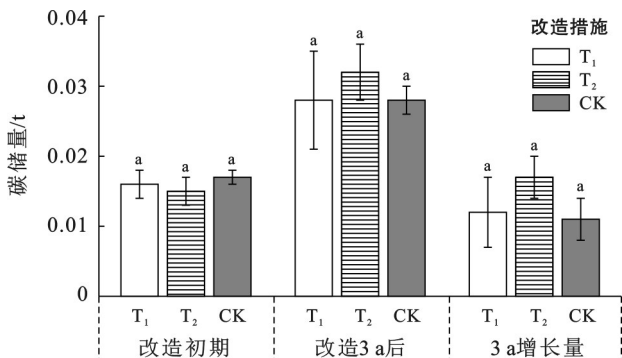


图 5 不同改造措施对草本层碳储量的影响
Fig.5 Effects of different retrofitting measures on carbon storage in herbaceous layer

植被层总碳储量的动态变化主要受乔木层碳库主导。改造初期, CK 总碳储量 (3.018 t) 显著高于 T_1 (1.928 t) 和 T_2 (1.964 t)。改造 3 a 后, CK (3.625 t) 仍显著高于 T_1 (2.441 t) 和 T_2 (2.335 t)。植被层 3 a 碳储量增量表现为: CK (0.609 t) $>$ T_1 (0.506 t) $>$ T_2 (0.364 t), 其中 T_1 的增量显著高于 T_2 ($p < 0.05$)。植被层碳储量在改造初期与改造 3 a 后的动态变化, 主要受乔木层碳储量的变化驱动 (参见乔木层碳储量结果)。 T_1 措施下的 3 a 碳储量增量显著高于 T_2 措施 ($p < 0.05$), 这一显著的增量优势, 主要归因于 T_1 措施对乔木层碳积累的更高效的促进作用 (表 4, 图 6)。

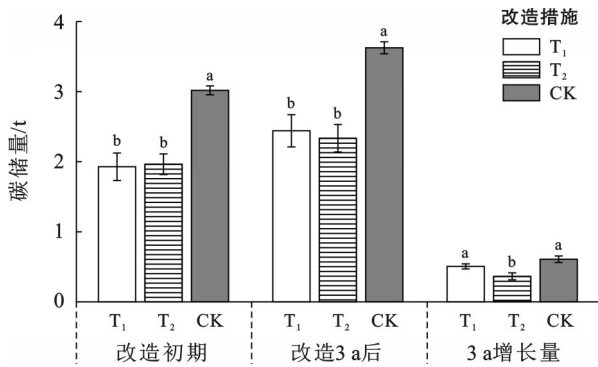


图 6 不同改造措施对植被层碳储量的影响

Fig.6 Impact of different retrofitting measures on carbon storage in vegetation layer

4 讨论

4.1 改造措施对杉木人工林生长的影响机制

乔木生长受林龄、立地条件、植物多样性及经营措施等因素调控。森林经营作为关键的人为干预手段,通过去除竞争个体、调控密度与空间结构以降低林分竞争强度、改善光照条件和土壤水肥供给,并加速养分循环,促进保留木的生长,差异化的经营措施还能促使保留木更有效利用其生物学特性、空间位置及竞争关系^[14]。基于上述调控机制,本研究通过设计差异化改造处理(T₁, T₂)验证其对杉木生长的影响。在林龄与立地条件一致的前提下, T₁与 T₂处理通过移除病弱木、霸王树、被压木及部分长势不良林木,显著改善保留木的生长空间与竞争环境,促进杉木人工林生长。其中, T₁处理效果更优,可能因其补植措施形成混交结构(优化的树种组成),通过促进林下植被养分循环及其适配林分需求的抚育强度^[15],显著提升资源利用效率。胸径年均增长率的排序为: T₁>CK>T₂,且年均增长率 T₁分别比 CK 和 T₂高 23.11% 和 44.62%,表明 T₁是培育大径材的有效途径。该结论与 Wang Xiaoming 等^[16]对马尾松人工林的研究结果一致,即近自然改造通过结构优化可显著提升目标树种生长量。 T₂处理(50%间伐强度)的年均增长率最低(2.026%),可能源于高强度间伐引发的短期环境胁迫、次生植被竞争加剧以及资源分配策略改变。不同改造措施间树高生长量、年均生长率差异不显著,与徐金良等^[17]的研究结果一致,这可能由于间伐实施时杉木树高生长已趋于稳定,或树高主要受遗传特性、立地条件及互作效应影响,对采伐强度响应相对较弱。尽管本研究显示 T₁和 T₂处理当前蓄积量低于 CK,陈哲等^[18]研究表明,高强度抚育间伐短期内会降低林分蓄积量,这是因为蓄积量变化是一个长期过程,受多因素综合影响;

即便单株材积年平均增长率增加,且年均增长率分别比 CK 和 T₂高 22.61% 和 30.65%,但林分密度在改造初期急剧下降,导致总蓄积量减少。然而,随着时间推移,密度对蓄积的影响减弱,抚育间伐的促进作用将逐渐显现^[19]。如张丹丹^[20]研究表明改造后蓄积量最终超越对照。鉴于本研究观测期仅 3 a,推测随经营时间延长, T₁与 T₂的蓄积量可显著高于 CK。

4.2 改造措施对杉木人工林胸径结构优化的影响

通过对杉木林实施间伐后补植木荷的近自然化改造,结果表明改造林分的直径分布较 CK 发生明显偏移。2种改造措施下的直径分布较 CK 提升中大径阶(≥20 cm)株数比例。该现象与多树种人工林经营研究结论一致。张俊艳等^[21]证实未经营云南松(*P. yunnanensis*)呈小径阶左偏分布(峰度高),近自然改造后,分布曲线右移且峰度降低,大径木比例增加。王科等^[22]发现近自然经营马尾松林,使小径阶林木占比下降,大径阶比例提升。程冀文^[23]指出油松(*P. tabuliformis*)、落叶松(*Larix gmelinii*)人工林及白桦(*Betula platyphylla*)天然林经营后,径阶分布峰值区间向大径阶迁移,其中近自然措施的大径阶增幅最大。彭文成等^[24]在海南观察到近自然改造杉木林直径分布由正态分布向异龄化“J”型转变。王翰琛等^[25]阐明间伐移除低活力个体后,保留木通过资源垄断效应加速径向生长,促使大径材比例上升。本研究表明, T₁处理的 3 a 净增量的 2~4 cm 径阶株数占比达 28.3%,显著高于 CK(4.6%)。表明杉木一木荷近自然化改造通过优化竞争结构,显著提升了大径材培育效率,为人工林高价值木材定向培育提供了有效路径。

4.3 改造措施提升杉木人工林碳汇功能的潜力

本研究表明,不同改造措施实施后,杉木人工林乔木层碳储量在改造后 3 a 内均显著低于 CK($p < 0.05$),净增量表现为: CK>T₁>T₂。这与高强度间伐初期导致乔木层碳库净损失的研究结论相符^[26]。尽管短期改造后,林分碳储量低于对照,但研究结果揭示不同改造措施在提升未来碳汇功能上的差异化潜力,尤以间伐补植措施(T₁)的乔木层碳储量增量显著高于 T₂措施($p < 0.05$),表明补植木荷可通过更有效地利用释放的空间资源(如光、水、养分)或改善微生境,加速乔木层的整体碳积累速率。本研究仅观测改造后 3 a 的动态,许多补植的木荷尚处于幼苗阶段,未达到起测胸径,其固碳潜力尚未充分释放。作为速生且碳储量较高的乡土阔叶树种,木荷的碳积累能力预计将随龄级增长。 T₁林分通过间伐降低密度并引入木荷,形成更合理的树种组成(杉木-木荷

混交)和林分结构,可促进木荷根系生长量显著增加,还增强林分稳定性和抗逆性,为长期、持续的碳积累提供结构性基础^[27]。基于木荷的生长特性及其在混交林中的潜在互补效应,预计随着时间推移, T_1 林分乔木层的年碳增量将维持在较高水平,其碳储量总量有潜力逐步接近并最终超越CK和 T_2 林分。这一预期与关于长期近自然经营提升森林碳汇功能的研究结论一致^[28]。持续实施以间伐补植(T_1)为代表的近自然改造,并通过定期疏伐维持合理的林分密度与结构,是实现杉木人工林长期碳汇功能显著提升与培育大径级优质木材双重目标的关键路径。短期观测到的碳储量差距可视为林分结构转型过程中的暂时性现象,而结构优化所驱动的长期碳增益则代表其核心潜力所在。

灌木层和草本层作为森林生态系统的重要组成部分,其碳储量动态亦受改造措施影响。本研究中,灌木层碳储量增量表现为: $T_1 > CK > T_2$,草本层则表现为: $T_2 > T_1 > CK$ 。然而,在3a观测期内,灌草层碳储量及其增量的措施差异均未达到统计学显著水平($p > 0.05$)。 T_1 措施表现出较高的灌木层碳增量趋势。邹丰虎等^[28]在马尾松林的研究中发现近自然经营有助于提升灌木层碳汇潜力,主要源于 T_1 降低林分郁闭度,有利于灌木生长所需的光照等资源的获取。随着 T_1 林分结构持续优化和稳定,对灌木层碳积累的促进作用有望进一步增强。 T_2 措施下草本层表现出最高的碳增量趋势,这与高强度间伐后草本层快速响应的研究结论一致^[29]。间伐显著降低林分密度和郁闭度,短期内极大改善林下光照和空间资源,促进喜光草本植物的快速生长和扩散,表明 T_2 措施在扰动后短期内激发草本层碳积累方面显示出相对优势。张桢铭^[30]对柏木林的研究表明间伐补植后草本层碳储量最高,然而,在本研究中, T_1 措施的草本层增量较低,可能是为促进补植木荷生长,进行频繁的林下植被管理,移除草本生物量,延缓其恢复。然而长期来看,随着 T_1 林分乔木层郁闭度逐渐恢复稳定,以及管理干扰的减少, T_1 措施有望为林下灌草层创造更适宜且稳定的生长环境,从而促进其碳储量的累积。从提升林下植被碳汇功能的角度, T_1 措施因其对灌木层的积极影响及为草本层提供的长期稳定环境,展现出更具持续性的碳汇提升潜力,长期监测将有助于验证这些基于趋势的潜力预测。

植被层总碳储量动态变化主要受乔木层碳库主导。其3a碳储量增量表现为: $CK > T_1 > T_2$,且 T_1 显著高于 T_2 ($p < 0.05$),这与乔木层的结果一致。CK的高碳储量主要源于高林分密度。短期内, T_1 的总碳

储量增量虽低于CK,但其显著高于 T_2 的增量,有力支持 T_1 相对于 T_2 在提升碳汇效率方面的短期相对优势。 T_1 措施通过“采小留大”和补植木荷,显著优化林分结构。这种结构优化旨在提升资源利用效率和促进保留木生长,为长期、高效的碳积累奠定结构性基础。结合乔木层展现的恢复速率和灌草层的潜在趋势, T_1 措施植被各层次的碳汇功能具有协同提升的空间。 T_1 措施不仅短期内展现出相对于 T_2 的碳汇效率优势,更因其结构优化带来的多层次碳积累潜力,成为实现杉木人工林长期碳汇功能显著提升的更优路径。坚持近自然改造理念的 T_1 措施,在更长的观测周期内,其植被层总碳储量积累具有更大的潜力实现可持续增长。

5 结论

(1) 2种改造措施的平均胸径、平均树高及单木平均材积均显著高于对照(CK)。不同措施间胸径、单株材积存在显著差异($p < 0.05$),而树高差异未达显著水平。 T_1 措施的胸径、树高、单株材积与蓄积量年均增长率均为最优,其中胸径年均增长率较CK提升23.11%,单株材积年均增长率提高22.61%。

(2) 不同措施下中大径阶排序为: $T_1 > T_2 > CK$ 。间伐补植措施(T_1)和间伐(T_2)中大径阶(≥ 20 cm)林木株数显著提升。 T_1 措施胸径3a增量2~4 cm范围内林木株数占比达28.3%,较CK提高23.7%,改造措施(尤其 T_1)使林分径阶结构向大径级方向偏移,有利于培育杉木大径材。植被层与乔木层碳储量在措施间呈显著差异($p < 0.05$),灌木层与草本层无显著差异, T_1 措施对植被层、乔木层及灌木层碳储量均具有促进作用, T_2 措施则提升草本层碳储量。

(3) 间伐补植木荷(T_1)在促进杉木人工林生长、结构优化及关键碳库(乔木层)恢复与增长方面,效果显著优于间伐(T_2)。因此,在湖北太子山同类型杉木人工林的近自然化改造及提升森林碳汇功能实践中,推广应用间伐补植木荷技术是更为合理的选择。

参考文献(References)

- [1] 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 Shirong, Yang Yujing, Wang Hui. 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.

- [2] Hua Fangyuan, Bruijnzeel L A, Meli P, et al. The biodiversity and ecosystem service contributions and trade-offs of forest restoration approaches [J]. *Science*, 2022, 376(6595):839-844.
- [3] Felipe-Lucia M R, Soliveres S, Penone C, et al. Multiple forest attributes underpin the supply of multiple ecosystem services [J]. *Nature Communications*, 2018, 9:4839.
- [4] 周芳萍, 徐建民, 陆海飞, 等. 利用珍贵树种改造尾巨桉纯林的混交模式研究[J]. *林业科学研究*, 2022, 35(1): 10-19.
Zhou Fangping, Xu Jianmin, Lu Haifei, et al. Transformation of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* clone plantation into mixed-species forest using precious tree species [J]. *Forest Research*, 2022, 35(1):10-19.
- [5] 国家林业和草原局编制. 中国森林资源报告(2014—2018) [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014—2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019.
- [6] 赵铭臻, 刘静, 邹显花, 等. 间伐施肥对杉木中龄林生长和材种结构的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2023, 47(2): 70-78.
Zhao Mingzhen, Liu Jing, Zou Xianhua, et al. Effects of thinning and fertilization on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir forest [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2023, 47(2): 70-78.
- [7] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4521-4530.
Shu Weiwei, Lu Lihua, Li Hua, et al. Effects of stand density on understory vegetation and soil properties of *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11):4521-4530.
- [8] 李婷婷, 吴水荣, 王林龙, 等. 国内外混交林研究进展[J]. *世界林业研究*, 2022, 35(5): 42-48.
Li Tingting, Wu Shuirong, Wang Linlong, et al. Progress in national and international research on mixed forest [J]. *World Forestry Research*, 2022, 35(5):42-48.
- [9] 方晰, 田大伦, 项文化. 间伐对杉木人工林生态系统碳储量及其空间分配格局的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2010, 30(11): 47-53.
Fang Xi, Tian Dalun, Xiang Wenhua. Effects of thinning on carbon storage and its spatial distributions in Chinese fir plantation ecosystem [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2010, 30(11):47-53.
- [10] 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.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for major tree species: GB/T 43648—2024 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [11] 袁慧, 刘波, 陈书杭, 等. 湖北高密度杉木人工林生长规律研究[J]. *湖北林业科技*, 2021, 50(3): 1-7.
Yuan Hui, Liu Bo, Chen Shuhang, et al. Growth regularity of high density *Cunninghamia lanceolata* plantations in Hubei [J]. *Hubei Forestry Science and Technology*, 2021, 50(3):1-7.
- [12] 国家林业局. 杉木大径材培育技术规程: LY/T 2809—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
State Forestry Administration of the People's Republic of China. Technical regulation for cultivation of Chinese fir large-size timber: LY/T 2809—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [13] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2006.
Meng Xianyu. Forest mensuration [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2006.
- [14] Li Yuanfa, He Ji'an, Lu Lihua, et al. The long-term effects of thinning and mixing on species and structural diversity of Chinese fir plantations [J]. *New Forests*, 2021, 52(2):285-302.
- [15] 陈涵, 郭弘婷, 陈睿, 等. 杉木人工林林下植物多样性及其环境对不同间伐强度的短期响应[J]. *生态学报*, 2023, 43(24):10274-10284.
Chen Han, Guo Hongting, Chen Rui, et al. Understory plant diversity of *Cunninghamia lanceolata* plantations and its short-term environmental response to different thinning intensities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(24):10274-10284.
- [16] Wang Xiaoming, Lu Yuanchang, Xing Haitao, et al. Effects of close-to-nature conversion on *Pinus massoniana* plantations at different stand developmental stages [J]. *Tropical Conservation Science*, 2018, 11: 1940082918767953.
- [17] 徐金良, 毛玉明, 成向荣, 等. 间伐对杉木人工林碳储量的长期影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(7):1898-1904.
Xu Jinliang, Mao Yuming, Cheng Xiangrong, et al. Long-term effects of thinning on carbon storage in *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7):1898-1904.
- [18] 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 Zhe, Wei Haoliang, Zhou Qingying, 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.

- 2022,42(5):54-64.
- [19] 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 Wenzhong, Zhao Gang, Zhang Huidong, et al. Effects of thinning on growth of Mongolian oak (*Quercus mongolica*) secondary forests [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015,35(1):56-64.
- [20] 张丹丹.间伐对杉木人工林分生长和土壤质量的影响[D].安徽合肥:安徽农业大学,2019.
Zhang Dandan. Effects of thinning on growth and soil quality in a Chinese fir plantation [D]. Hefei, Anhui: Anhui Agricultural University, 2019.
- [21] 张俊艳,陆元昌,成克武,等.近自然改造对云南松人工林群落结构及物种多样性的影响[J].河北农业大学学报,2010,33(3):72-77.
Zhang Junyan, Lu Yuanchang, Cheng Kewu, et al. Impact of near nature modification on community structure and species biodiversity of artificial *Pinus yunnanensis* forest [J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010,33(3):72-77.
- [22] 王科,谭伟,戚玉娇.近自然经营间伐对黔中马尾松天然次生纯林生长的初期效应[J].浙江农林大学学报,2019,36(5):886-893.
Wang Ke, Tan Wei, Qi Yujiao. Initial effects of close-to-nature thinning on a natural secondary *Pinus massoniana* pure forest in central Guizhou [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2019,36(5):886-893.
- [23] 程冀文.近自然经营对森林林分生长的影响[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
Cheng Jiwen. Effects of close to natural management models on forest stand growth [D]. Hohhot, Inner Mongolia: Inner Mongolia Agricultural University, 2021.
- [24] 彭文成,杨佳,黄士琦,等.杉木人工林近自然化改造对林分结构及物种多样性的影响[J].热带林业,2023,51(3):23-27.
Peng Wencheng, Yang Jia, Huang Shiqi, et al. Effect of close-to-nature management on the stand structure and species diversity in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. Tropical Forestry, 2023,51(3):23-27.
- [25] 王翰琛,张雄清,张建国,等.杉木人工林不同密度间伐林分生长优势的变化规律分析[J].林业科学研究,2021,34(5):32-38.
Wang Hanchen, Zhang Xiongqing, Zhang Jianguo, et al. Variation of growth dominance in thinned Chinese fir stands with different planting densities [J]. Forest Research, 2021,34(5):32-38.
- [26] 肖军,雷蕾,曾立雄,等.不同经营模式对华北油松人工林碳储量的影响[J].生态环境学报,2022,31(11):2134-2142.
Xiao Jun, Lei Lei, Zeng Lixiong, et al. Effects of different management regimes on carbon stock of *Pinus tabulaeformis* plantations in northern China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022,31(11):2134-2142.
- [27] 王焱,肖以华,胡冬南,等.不同杉阔混交对退化杉木人工林土壤团聚体分布及其稳定性的影响[J].水土保持研究,2025,32(5):163-173.
Wang Yan, Xiao Yihua, Hu Dongnan, et al. Effects of different Chinese fir-broadleaf mixed forests on soil aggregate distribution and stability in degraded Chinese fir plantations [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025,32(5):163-173.
- [28] 邹丰虎,柴宗政.近自然经营对马尾松人工林生态系统碳储量的影响[J].广西科学,2024,31(3):405-415.
Zou Fenghu, Chai Zongzheng. Effects of close-to-nature management on carbon storage of *Pinus massoniana* plantation ecosystem [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(3):405-415.
- [29] 王有良,林开敏,宋重升,等.间伐对杉木人工林生态系统碳储量的短期影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2022,46(3):65-73.
Wang Youliang, Lin Kaimin, Song Chongsheng, et al. Short-term effects of thinning on carbon storage in Chinese fir plantation ecosystems [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2022,46(3):65-73.
- [30] 张桢铭.两种抚育措施对柏木人工林碳贮量与土壤活性有机碳库的初期影响[D].四川雅安:四川农业大学,2023.
Zhang Zhenming. Initial effects of two tending measures on carbon storage and soil active organic carbon pool of cypress plantation [D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2023.