

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230147

# 间伐套种对杉木人工林生长、干形形质和材种结构的影响

王书韧<sup>1</sup>, 郭利娜<sup>1</sup>, 白彦锋<sup>1</sup>, 臧毅明<sup>2</sup>, 朱亚军<sup>2</sup>, 姜春前<sup>1\*</sup>

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091; 2. 安徽省青阳县林业局林业技术推广服务中心, 安徽 池州 247100)

**摘要:** [目的] 分析间伐套种措施对杉木林木生长形质性状、空间利用能力和林分产量的影响, 明确林分经营方向, 为杉木人工纯林改造提供科学依据。[方法] 对安徽省青阳县 23 a 林龄的杉木人工林设置 3 种间伐强度 (I: 47%; II: 56%; III: 65%), 林下套种 2 种阔叶树浙江楠 (*Phoebe chekiangensis*) 和樟木 (*Sassafras tzumu*), 并以未间伐套种的杉木人工纯林为对照 (CK: 0% 间伐, 保留密度 1 740 株·hm<sup>-2</sup>), 探究不同间伐与阔叶树套种处理对杉木人工林的影响, 并通过主成分分析法综合评价间伐与阔叶树套种对杉木生长的影响。[结果] (1) 间伐与阔叶树套种促进了杉木生长, III 处理的胸径、树高、单木材积、用材出材率均为最大, 分别比 CK 增加了 32.07%、21.60%、83.33%、6.77% ( $P<0.05$ ); 但高径比和胸高形数、小条木、小径材、薪材和废材的出材率均低于 CK, 分别降低了 8.64%、3.70%、90.88%、41.47%、54.50%、5.71%。(2) 间伐与阔叶树套种改变了杉木的空间利用能力, 冠幅、冠长、冠长率、冠形率、树冠表面积和树冠体积均显著高于 CK ( $P<0.05$ ), 分别提高了 12.16%~31.00%、55.58%~61.24%、30.00%~40.00%、16.11%~44.94%、67.17%~95.86%、84.74%~146.63%。(3) 间伐套种处理可以有效改善杉木人工林的生长特征, 各处理的综合得分由高到低依次为 III (1.186) > II (1.092) > I (0.671) > CK (-0.709)。[结论] 杉木人工林经营若以快速提升杉木人工林生长特征为目的, 本研究中 III 处理 (65% 间伐 + 套种阔叶树) 是最佳处理措施。

**关键词:** 杉木经营; 阔叶树套种; 空间利用能力; 主成分分析

**中图分类号:** S753.5

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2023)06-0048-10

杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 是我国南方主要造林树种。第九次全国森林资源清查结果显示, 我国杉木人工林面积达到  $9.90 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>, 蓄积量达 7.55 亿 m<sup>3</sup>, 分别占全国主要优势人工林树种的 1/4 及 1/3<sup>[1]</sup>。然而, 由于当前杉木人工林存在过纯、过密等, 导致林分结构单一、林地生产力下降和林分结构不稳定<sup>[2-3]</sup>。同时, 随着社会经济的发展, 人们对杉木的木材结构需求发生了变化, 逐渐由小径材转为大径材。因此, 杉木纯林不能满足人们的需求, 甚至影响到社会经济的可持续发展<sup>[4]</sup>。此外, 有研究表明, 营建

混交林可以改善林内空间结构, 增加林内光照的同时减少林内竞争<sup>[5]</sup>, 有利于林木生长和提高生物多样性<sup>[6]</sup>, 提高森林的经济和生态效益。因此, 如何通过调整优化林分结构, 提升杉木人工林的质量已成为亟待解决的问题。

在营造异龄复层混交林的研究上, 国外主要集中在阔叶树种<sup>[7-10]</sup>, 而国内重点是针叶树种。已有研究表明, 间伐套种处理改变了林分密度以及生长空间, 降低了林木竞争, 有利于林分生长、林分生物量和生长力增加<sup>[11-13]</sup>。李婷婷<sup>[14]</sup>对杉木人工林进行间伐补植改造, 发现林下补植阔叶树种可以显

收稿日期: 2023-04-12 修回日期: 2023-05-15

基金项目: 国家重点研发计划项目“南方低山丘陵区山水林田湖草沙系统治理方案与集成示范 (2022YFF1303005)” ; 国际合作研究项目“南方低山丘陵区森林恢复和可持续经营示范项目 (2016P2-CAF)”

\* 通讯作者: 姜春前, 博士, 研究员, 主要研究方向: 林业与气候变化研究。E-mail: jiangchq@caf.ac.cn

著提高林木单木材积和林分蓄积的年生长量, 并且大叶栎、红椎、格木、灰木莲适合与杉木进行混交种植。孙冬婧等<sup>[15]</sup>在对红椎、米老排、大叶栎、润楠与杉木混交林的生长与生态效应研究中得出, 混交林有利于林分生长, 并形成丰富的物种多样性, 无论在经济方面还是生态方面都比杉木纯林更加优化。欧建德<sup>[16]</sup>研究了福建南方红豆杉林下套种模式对人工林生长的影响, 结果表明: 林下套种后, 林分冠幅显著大于纯林模式。陈莹莹<sup>[17]</sup>以福寿林场杉木人工中龄林为研究对象, 通过在林下补植阔叶树, 将杉木纯林改造为异龄针阔混交林, 发现杉木的高径比、胸高形数和枝下高均随间伐强度的增强而减小。

目前, 国内外对间伐补植经营的研究大多集中在间伐强度对林分结构和生长、生物多样性和林地土壤养分的影响等方面<sup>[18-21]</sup>, 而对杉木人工林“间伐+冠下套种”后的杉木生长、干形形质特性和材种结构的量化评价不足。因此, 本研究以安徽省青阳县杉木人工林为研究对象, 调查林木的生长性状、空间利用能力、林分产量, 通过主成分分析法综合评价“间伐+套种”对杉木林分质量的提升效果, 为杉木人工林质量精准提升提供科学依据。

## 1 试验地概况

试验地位于安徽省池州市青阳县庙前镇三义村窑西林场(117°40'~118°05'E, 30°19'~30°50'N), 该地属于北亚热带湿润季风气候, 温和多雨, 年平均气温 16.1℃, 年平均降水量 1 500 mm, 年平均

日照时数 2 066 h, 无霜期 218 d; 地形以丘陵为主, 土壤为黄壤。试验林营建于 2000 年, 平均林分密度为 1 740 株·hm<sup>-2</sup>, 立地指数为 18, 无施肥和间伐措施。优势种为杉木; 灌木植物以六月雪(*Serissa japonica* (Thunb.) Thunb.)、淡竹(*Phyllostachys glauca* McClure)、荚蒾(*Viburnum dilatatum* Thunb.)等为主; 草本层主要有边缘鳞盖蕨(*Microlepia marginata* (Houtt.) C. Chr.)、点腺过路黄(*Lysimachia hemsleyana* Maxim. ex Oliv.)、山麦冬(*Liriope spicata* (Thunb.) Lour.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 试验设计

2017 年底, 选取立地条件相近的杉木人工林地段, 根据伐除木的数量设计 47% (I 处理)、56% (II 处理) 和 65% (III 处理) 3 个间伐强度并设置样地。样地按照随机区组设计, I 处理、II 处理、III 处理、CK 处理各设置 20 m × 20 m 的样地 3 个, 同时 I 处理和 II 处理各增加 1 块对照样地, 共计 14 块样地; 为避免边界效应, 实际间伐作业面积为 30 m × 30 m。2018 年初, 在间伐处理后的样地中, 用浙江楠(*Phoebe chekiangensis* C. B. Shang) 和檫木(*Sassafras tzumu* (Hemsl.) Hemsl) 1 年生苗进行冠下套种, 随机均匀排列种植, 株行距为 4 m × 5 m, 2 树种种植密度均为 225 株·hm<sup>-2</sup>。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本概况

Table 1 General situation of sample plots

处理 Treatment	杉木保留密度 The retained density/ (tree·hm <sup>-2</sup> )	套种株数 The interplanting/ (tree·hm <sup>-2</sup> )	坡向 Aspect	坡度 Slope/(°)	杉木平均胸径(2018) Average DBH (2018)/cm	杉木平均树高(2018) Average tree height (2018)/m
CK (对照组)	1 740	0	东南	15-20	13.1	10.7
I (47%间伐+套种)	1 050	450	东南	15~20	15.1	11.4
II (56%间伐+套种)	825	450	东	15~20	15.6	11.8
III (65%间伐+套种)	675	450	东	15~20	17.2	12.8

分别在间伐套种第 0 年(2018 年)、第 2 年(2020 年)、第 4 年(2022 年)对样地进行调查, 对各样地的林木进行每木检尺, 使用胸径尺测量杉木胸径和套种树种的地径, 使用激光测高仪测量林木树高与枝下高, 使用皮尺测量林木树冠的南

北冠幅和东西冠幅, 使用 2022 年的每木调查数据对林分生长进行统计分析。

### 2.2 试验方法

2.2.1 评价指标 (1) 林木生长形质性状 采用胸径、树高、胸高形数、高径比、枝下高指标衡量

杉木的生长形质性状。

(2) 空间利用能力 空间利用能力从林木二维树冠和三维树冠两方面进行描述, 二维树冠用冠幅、冠长、冠长率、冠形率来表示, 三维树冠通过树冠表面积、树冠体积来表达。

(3) 林分产量 林分产量从杉木单木材积、林分蓄积和材种结构 3 方面进行描述, 材种结构用小条木、小径材、中径材、大径材出材率和用材、薪材、废材出材率来表示。

2.2.2 评价方法 应用 SPSS27.0 中的单因素方差分析法对不同处理下杉木林分特征的差异进行分析, 利用主成分分析法进行综合评价, 步骤为<sup>[22]</sup>:

首先, 将  $n$  种间伐套种处理的  $m$  项指标组成数据矩阵  $X$ 。

$$X = [X_{ij}]_{n \times m} (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (1)$$

式中:  $X_{ij}$  为第  $i$  种间伐套种处理的第  $j$  项指标的实测值。

其次, 利用 SPSS 或 Excel 软件将数据标准化, Excel 软件计算公式如下:

正向指标标准化:

$$X_{ij}^* = X_{ij} / \bar{X}_j \quad (2)$$

逆向指标标准化:

$$X_{ij}^* = \bar{X}_j / X_{ij} \quad (3)$$

式中:  $X_{ij}^*$  为  $X_{ij}$  的标准化数据;  $\bar{X}_j$  为第  $j$  项指标的平均值。

利用 KMO 检验法和 Bartlett 球体检验法对标准化处理后的数据进行适用性检验, KMO 数值  $\geq 0.60$  且 Sig 数值  $< 0.05$ , 表明各指标间关联程度较高, 可以进行主成分分析。

选取主成分的特征值  $> 1$  且方差累计贡献率  $> 90\%$  的前  $k$  个主成分, 建立主成分与标准化指标间的关系, 公式为:

$$Y_p = b_{p1} \times X_1^* + b_{p2} \times X_2^* + \dots + b_{pm} \times X_m^* (p = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (4)$$

式中:  $Y_p$  为第  $p$  个主成分;  $b_{pm}$  为第  $p$  个主成分的因子载荷。

用第  $p$  个主成分的方差贡献率和所选取的  $k$  个主成分的方差总贡献率的比值表示各个主成分的权重, 将各个主成分的权重与  $k$  个主成分相结合, 得到综合评价函数  $Y$ 。Y 的得分越高, 则表明该间伐套种处理对杉木人工林的改造效果越好。公式如下:

$$Y = \sum_{k=1}^k \left( Y_p \times \left( \lambda_p / \sum_{k=1}^k \lambda_p \right) \right) \quad (5)$$

式中:  $Y$  为不同间伐套种处理的综合得分;  $\lambda_p$  为第  $p$  个主成分的方差贡献率。

### 3 结果与分析

#### 3.1 间伐与阔叶树套种对杉木生长和干形形质的影响

3.1.1 间伐与阔叶树套种对杉木胸径和树高的影响 由图 1 可知, I、II、III 处理的胸径、树高均显著大于 CK ( $P < 0.05$ ), 与 CK 相比, I、II、III 处理的胸径分别增长了 19.02%、30.01%、32.07%; 树高则分别增长了 10.40%、14.81%、21.60%。

#### 3.1.2 间伐与阔叶树套种对杉木干形形质的影响

由图 2 可知, CK 的高径比、胸高形数、枝下高均显著大于 I、II、III 处理 ( $P < 0.05$ )。其中,

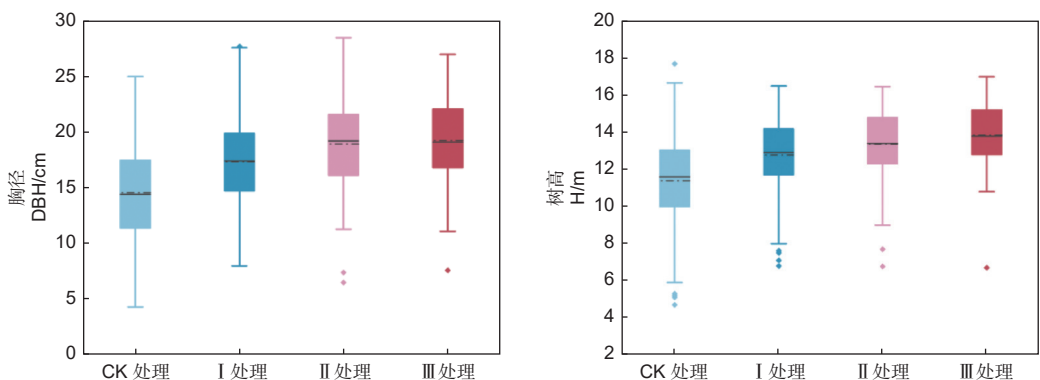


图 1 不同间伐套种下林木胸径和树高生长变化

Fig. 1 Changes of DBH and tree height growth under different thinning and interplanting

Ⅱ处理的高径比最小, 为 0.73; Ⅲ处理的胸高形数最小, 为 0.52, 显著低于Ⅰ处理; Ⅰ处理的枝

下高最小, 为 3.85 m, 显著低于Ⅱ与Ⅲ处理 ( $P<0.05$ ), Ⅱ与Ⅲ处理间的枝下高差异不显著。

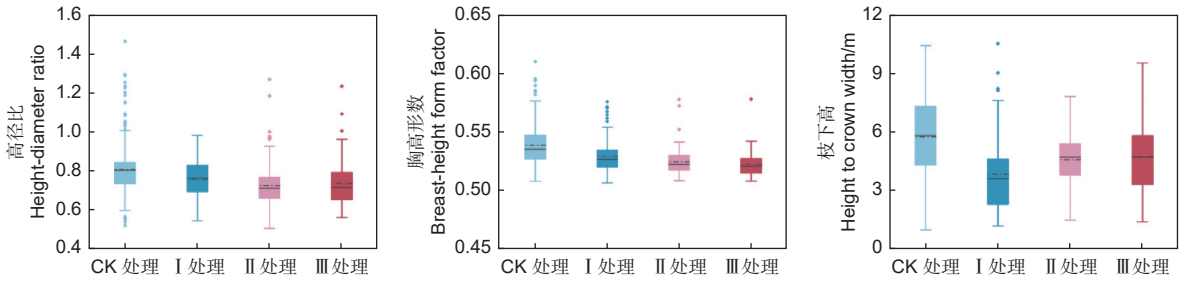


图2 不同间伐套种下林木干形生长变化

Fig. 2 Changes of stem-form growth under different thinning and interplanting

### 3.2 间伐与阔叶树套种对杉木的空间利用能力的影响

3.2.1 间伐与阔叶树套种对杉木二维树冠的影响  
对4个处理杉木的树冠结构进行分析(表2), 发现与CK相比, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理的冠幅增长率分

别为 12.16%、31.00%、21.27% ( $P<0.05$ ), 其中Ⅱ处理的冠幅增长最快; 冠长增长率依次为 58.05%、55.58%、61.24%, Ⅲ处理的冠长增长最快 ( $P<0.05$ )。

表2 不同处理组树冠的生长变化

Table 2 Growth changes of crown of different treatments

处理 Treatment	冠幅 Crown width/m	冠长 Crown length/m	冠长率 Crown ratio	冠形率 Crown shape
CK	3.29 ± 0.80 D	5.65 ± 2.17 B	0.50 ± 0.17 C	1.78 ± 0.72 C
I	3.69 ± 0.85 C	8.93 ± 2.13 A	0.70 ± 0.13 A	2.58 ± 0.94 A
II	4.31 ± 0.63 B	8.79 ± 2.24 A	0.65 ± 0.13 B	2.07 ± 0.55 B
III	3.99 ± 0.67 A	9.11 ± 1.81 A	0.66 ± 0.11 B	2.35 ± 0.61 A

注: 不同大写字母表示相同时间下不同间伐套种处理之间具有显著性差异 ( $P<0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different thinning and interplanting treatments at the same time ( $P<0.05$ ).

为充分反映不同间伐套种处理下杉木的树势和树冠立体状态的水平, 对杉木的冠长率和冠形率进行了研究(表2)。间伐与阔叶树套种处理显著提高了冠长率与冠形率, 其中Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理的冠长率分别比CK增加了40.00%、30.00%、32.00% ( $P<0.05$ ), Ⅱ与Ⅲ处理间的冠长率差异不显著; Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理的冠形率显著高于CK ( $P<0.05$ ), Ⅰ与Ⅲ处理间的冠形率差异不显著。

3.2.2 间伐与阔叶树套种对杉木三维树冠的影响  
由表3可知, 树冠表面积和树冠体积均随着试验处理强度的增强而先增大后减小。Ⅱ处理的值均最大, 分别为 61.99 m<sup>2</sup>、43.95 m<sup>3</sup>, 其次依次为Ⅲ处理、Ⅰ处理、CK。其中, CK与Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理间的树冠表面积存在显著性差异, Ⅰ与Ⅱ处理间的树冠表面积差异显著 ( $P<0.05$ ); 杉木人工林

单木树冠体积在各处理间呈现显著性差异。杉木树冠表面积和树冠体积的变异系数表现为: CK>Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ, 可见CK中单木树冠表面积、树冠体积分化程度较大, 而间伐与阔叶树套种处理可以降低树冠表面积和树冠体积的分化程度。

### 3.3 间伐与阔叶树套种对杉木林分产量的影响

3.3.1 间伐与阔叶树套种对杉木单木材积和林分蓄积的影响  
由表4可知, 随着试验处理强度的增强, 杉木的单木材积呈现逐渐增长的趋势, 杉木的林分蓄积则呈现逐渐下降的趋势。Ⅲ处理的单木材积最大, 为 0.22 m<sup>3</sup>; 其次为Ⅱ处理, 为 0.21 m<sup>3</sup>; CK最小, 为 0.12 m<sup>3</sup>。杉木的林分蓄积则表现为CK>Ⅰ>Ⅱ>Ⅲ, 与CK相比, Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ处理的林分蓄积分别下降了27.50%、28.15%、36.94% ( $P<0.05$ )。

表3 不同处理组三维树冠的生长变化

Table 3 Growth changes of three-dimensional canopy of different treatments

处理 Treatment	树冠表面积均值 Average canopy surface area/m <sup>2</sup>	树冠表面积变异系数 Coefficients of variation for canopy surface area/%	树冠体积均值 Average canopy volume/m <sup>3</sup>	树冠体积变异系数 Coefficients of variation for canopy volume/%
CK	31.65C ± 15.73	49.70	17.82D ± 12.46	69.92
I	52.91B ± 17.59	33.25	32.92C ± 17.09	51.91
II	61.99A ± 18.74	30.23	43.95A ± 18.09	41.16
III	58.94AB ± 15.71	26.65	39.15B ± 14.98	38.26

注：不同大写字母表示相同时间下不同间伐套种处理之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different thinning and interplanting treatments at the same time ( $P < 0.05$ ).

表4 间伐套种后杉木单木材积和林分蓄积的生长变化

Table 4 Growth changes of single tree and stand volume of fir plantation after thinning and interplanting

指标 Index	处理CK Treatment CK	处理 I Treatment I	处理 II Treatment II	处理 III Treatment III
单木材积 Single tree volume/m <sup>3</sup>	0.12 ± 0.08 C	0.18 ± 0.10 B	0.21 ± 0.09 AB	0.22 ± 0.10 A
林分蓄积 Stand volume/(m <sup>3</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	226.12 ± 37.11 A	163.94 ± 22.84 BC	162.47 ± 33.27 C	142.58 ± 18.26 D

注：不同大写字母表示相同时间下不同间伐套种处理之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different thinning and interplanting treatments at the same time ( $P < 0.05$ ).

### 3.3.2 间伐与阔叶树套种对杉木材种结构的影响

由图3可知，随着试验处理强度的增强，林分的薪材、废材出材量以及总出材量逐渐减小，用材出材量则呈现先减少后增加再减少的趋势，并且CK的值均最大，III处理的值均最小。

由图4可知，间伐套种处理降低了杉木林分内小条木、小径材的出材量，而中径材和大径材的出材量则在不同间伐套种处理下呈现不同的变化规律。其中，II处理的中径材出材量最大，为80.87 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>，I处理的中径材出材量最小，为61.33 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>；大径材出材量则表现为I > III > II > CK。

对杉木用材、薪材、废材出材率的分析表明

(表5)，间伐与阔叶树套种处理可以提高杉木用材出材率，降低薪材和废材出材率。间伐套种处理后，杉木用材出材率表现为III > II > I > CK，薪材和废材出材率则表现为CK > I > II > III。其中，II与I、II与III处理间用材和薪材出材率差异不显著，II与III处理间废材出材率差异不显著。

间伐与阔叶树套种处理对各材种出材率的影响不同，其中，小条木、小径材的出材率呈下降趋势，与CK相比，I、II与III处理的小条木出材率分别降低了60.24%、88.35%、90.88% ( $P < 0.05$ )；中径材和大径材出材率则均呈升高趋势，间伐套种处理林分的中径材和大径材出材率显著高

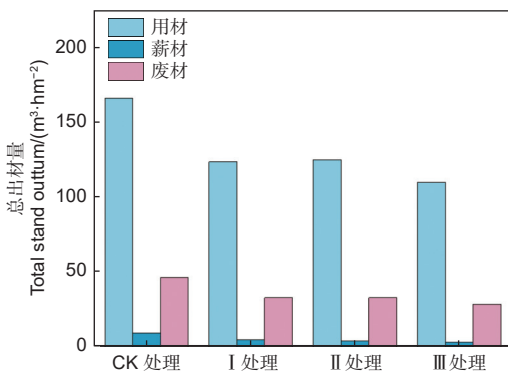


图3 间伐套种后林分总出材量的结构

Fig. 3 Structure of total stand output after thinning and interplanting

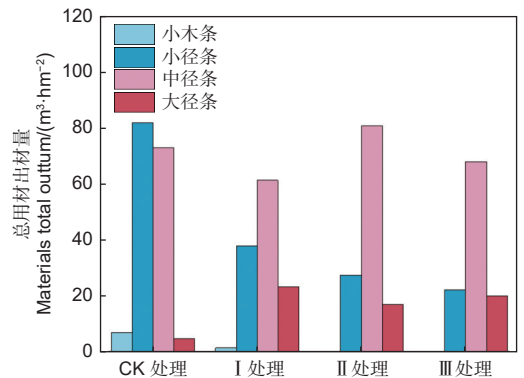


图4 间伐套种后林分用材出材量的结构

Fig. 4 Structure of materials output after thinning and interplanting

表 5 间伐套种处理后不同材种出材率

Table 5 The timber assortments timber-produced rate after thinning and interplanting

处理 Treatment	小条木 Small strips of wood	小径材 Small diameter wood	中径材 Medium diameter wood	大径材 Large diameter wood	用材 Materials	薪材 Firewood	废材 Waste wood
CK	10.64 ± 19.05 A	42.87 ± 30.23 A	17.57 ± 29.38 C	0.73 ± 5.51 B	71.80 ± 6.85 C	6.66 ± 6.84 A	21.54 ± 1.93 A
I	4.23 ± 12.41 B	35.15 ± 32.08 B	29.16 ± 33.48 B	6.36 ± 20.05 A	74.90 ± 4.05 B	4.23 ± 2.82 BC	20.87 ± 1.29 C
II	1.24 ± 7.77 B	26.77 ± 33.55 BC	42.63 ± 34.42 A	5.53 ± 16.05 A	76.16 ± 4.05 AB	3.44 ± 4.00 CD	20.40 ± 0.73 BD
III	0.97 ± 6.92 B	25.09 ± 31.26 C	42.58 ± 32.99 A	8.02 ± 20.71 A	76.66 ± 2.68 A	3.03 ± 1.95 D	20.31 ± 1.68 B

注: 不同大写字母表示相同时间下不同间伐套种处理之间具有显著性差异 ( $P < 0.05$ )。

Note: Different capital letters indicate significant differences between different thinning and interplanting treatments at the same time ( $P < 0.05$ ).

于未处理林分 ( $P < 0.05$ )。

### 3.4 杉木人工林不同间伐套种处理效果评价

为了消除各指标间单位和量纲的影响, 对各指标 ( $X_1$ : 胸径、 $X_2$ : 树高、 $X_3$ : 枝下高、 $X_4$ : 高径比、 $X_5$ : 胸高形数、 $X_6$ : 冠幅、 $X_7$ : 冠长率、 $X_8$ : 冠形率、 $X_9$ : 树冠表面积、 $X_{10}$ : 树冠体积、 $X_{11}$ : 小条木出材率、 $X_{12}$ : 小径材出材率、 $X_{13}$ : 中径材出材率、 $X_{14}$ : 大径材出材率、 $X_{15}$ : 薪材出材率、 $X_{16}$ : 废材出材率、 $X_{17}$ : 用材出材率、 $X_{18}$ : 单木材积、 $X_{19}$ : 林分蓄积) 进行了标准化处理, 并对标准化处理后的数据进行适用性检验, 发现 KMO 数值为 0.612, Sig 数值为 0.00, 各指标间关联程度较高, 可以进行主成分分析。

**3.4.1 主成分提取** 由表 6 可知, 前 6 个主成分的累计贡献率高达 91.228%, 并且各主成分的特征值均大于 1, 说明这 6 个主成分可代表上述的 19 个指标。因此, 提取这 6 个主成分, 分别为  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_3$ 、 $Y_4$ 、 $Y_5$ 、 $Y_6$ 。

**3.4.2 主成分特征值与荷载结果** 由表 7 可知: 在第一主成分的特征向量中, 胸径、树高、胸高形

数、单木材积的特征向量值较高。在第二成分的特征向量中, 枝下高和冠长率的特征向量值较高; 在第三主成分的特征向量中, 小条木出材率和小径材出材率的特征向量值较高; 在第四主成分的特征向量中, 冠幅和冠形率的特征向量值较高; 在第五主成分的特征向量中, 大径材出材率、薪材出材率和废材出材率的特征向量值较高; 在第六主成分的特征向量中, 中径材出材率和大径材出材率的特征向量值较高。

**3.4.3 综合得分** 由表 8 可知, 各处理的综合得分排名由高到低依次为: III 处理 (1.186)、II 处理 (1.092)、I 处理 (0.671) 和 CK (-0.709)。其中, III、II 和 I 处理的综合得分均大于 0, 林分生长均优于林分平均水平; CK 的综合得分小于 0, 林分生长低于林分平均水平。

## 4 讨论

### 4.1 间伐与阔叶树套种对杉木生长和干形形质的影响

杉木作为我国特有的用材林树种之一, 间伐套

表 6 主成分提取结果

Table 6 Extraction results of principal compositions

成分 Composition	初始特征值 Initial eigenvalue			提取载荷平方和 Extract the sum of squares and load it		
	总计 Total	方差百分比 % of variance/%	累积百分比 Accumulate/%	总计 Total	方差百分比 % of variance/%	累积百分比 Accumulate/%
1	8.831	46.479	46.479	8.831	46.479	46.479
2	3.110	16.370	62.849	3.110	16.370	62.849
3	1.791	9.428	72.276	1.791	9.428	72.276
4	1.342	7.065	79.341	1.342	7.065	79.341
5	1.199	6.311	85.652	1.199	6.311	85.652
6	1.059	5.576	91.228	1.059	5.576	91.228

表 7 主成分特征值与荷载结果

Table 7 Principal component characteristic values and load results

指标 Index	成分 Composition					
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>
X <sub>1</sub>	0.960	-0.147	0.125	0.136	0.095	-0.006
X <sub>2</sub>	0.890	-0.107	-0.201	0.135	0.044	-0.042
X <sub>3</sub>	0.091	-0.947	0.029	-0.011	0.013	0.009
X <sub>4</sub>	-0.663	0.204	-0.305	-0.022	-0.004	0.020
X <sub>5</sub>	-0.919	0.172	0.209	-0.135	0.009	0.039
X <sub>6</sub>	0.722	-0.008	0.103	-0.594	-0.120	0.189
X <sub>7</sub>	0.313	0.910	-0.140	0.078	-0.002	-0.044
X <sub>8</sub>	0.205	0.690	-0.302	0.562	0.101	-0.193
X <sub>9</sub>	0.826	0.459	-0.024	-0.226	-0.028	0.086
X <sub>10</sub>	0.801	0.376	0.063	-0.334	-0.042	0.135
X <sub>11</sub>	-0.709	0.296	0.520	0.106	-0.177	0.202
X <sub>12</sub>	-0.372	-0.180	-0.862	-0.162	0.046	0.168
X <sub>13</sub>	0.703	-0.021	0.432	0.029	-0.232	-0.503
X <sub>14</sub>	0.397	0.012	0.242	0.275	0.526	0.644
X <sub>15</sub>	-0.698	0.211	0.214	-0.278	0.530	-0.223
X <sub>16</sub>	-0.618	0.142	0.192	0.242	-0.592	0.371
X <sub>17</sub>	0.833	-0.239	-0.256	0.196	-0.338	0.109
X <sub>18</sub>	0.922	-0.069	0.231	0.178	0.189	0.077
X <sub>19</sub>	-0.362	-0.453	0.103	0.358	0.126	-0.120

表 8 主成分得分及综合得分

Table 8 Principal component score and comprehensive score

处理 Treatment	主成分 Principal component						综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>	Y <sub>5</sub>	Y <sub>6</sub>		
CK	-1.322	-0.658	0.063	0.143	0.008	-0.067	-0.709	4
I	1.050	1.181	-0.309	0.161	0.046	0.084	0.671	3
II	2.191	0.650	0.136	-0.632	-0.108	0.105	1.092	2
III	2.308	0.745	-0.036	-0.159	0.028	0.079	1.186	1

种已经成为其营建针阔混交林的主要方式<sup>[23]</sup>。以往研究表明,间伐可以增加林木的可用资源,促使林木胸径和树高的增加<sup>[24-25]</sup>,本研究结果与其一致。

在本研究中,CK的高径比、胸高形数比间伐套种处理林分的高径比、胸高形数表现好<sup>[26]</sup>,但枝下高随着间伐强度的增强呈现先迅速减小后逐渐增大的趋势,与前人结论“枝下高随着林分密度的降低而逐渐增加<sup>[27]</sup>”不一致。原因与林分密度有关,林分密度大幅度降低后,林内光照和生长空间发生变化,单木下部枝条受到的自身和相邻木的遮阴减少,导致枝下高增长缓慢。但随着林分密度的降低,冠幅逐渐增大,下层冠层受光减少,加剧自然

整枝的程度,导致枝下高逐渐增大<sup>[28]</sup>。

#### 4.2 间伐与阔叶树套种对杉木空间利用能力的影响

林木冠幅生长通常随着林分密度的增大而减小<sup>[29]</sup>,而在本研究中,随着林分密度的增大,杉木冠幅呈现先增大后减小的趋势。原因可能为Ⅲ处理的间伐强度为65%,伐除木过多,伐除过程中破坏了部分保留木冠层侧枝,导致冠幅因子出现误差。

在本研究中,冠长、冠长率、冠形率随着间伐强度的减弱整体呈现减弱的趋势,与公宁宁<sup>[30]</sup>对油松人工林树冠、段劫等<sup>[31]</sup>对侧柏树冠特征因子

的研究结果一致。但冠长、冠长率、冠形率在 I 处理出现上升, 原因为: 随着间伐强度的增强, 杉木树高增大, 但枝下高先减小后增大<sup>[28]</sup> 并且在处理 I 中最低, 导致冠长在 I 处理出现上升, 从而间接影响了杉木冠长率、冠形率的生长; 冠幅随着林分密度的增大而先增大后减小并且在 II 处理中最高, 导致树冠表面积、树冠体积在 II 处理中出现上升。

#### 4.3 间伐与阔叶树套种对杉木林分产量的影响

杉木经过间伐套种处理之后, 随着间伐强度的增强, 杉木的单木材积呈现逐渐增长的趋势, 这与张晓红等<sup>[32]</sup> 的研究一致。但随着间伐强度的增强, 林分蓄积量逐渐降低。原因在于林分的蓄积量受到单木材积和单位面积株数的共同影响, 虽然各间伐套种处理间杉木的单木材积均有所增加, 但是间伐之后保留的株数减少。如果间伐强度过大则会因为林分增长的蓄积量不足与伐除木的蓄积量抵消, 进而出现单木材积增加但是林分蓄积量减少的情况, 这与郑鸣鸣<sup>[33]</sup> 对杉木中龄林间伐的研究、SULLIVAN<sup>[34]</sup> 对美国黑松不同间伐强度的研究结果一致。

林分密度是影响林分材种结构、出材数量和质的重要因素<sup>[35]</sup>, 间伐套种处理后林分内保留株数减少, 林木生长空间变大, 促进林木径阶偏移, 导致林分材种结构发生变化<sup>[36]</sup>。本研究发现, 间伐套种有利于提高林分用材出材率, 降低薪材和废材出材率, 有效提高了林分材种效益, 与前人的研究结果一致<sup>[37]</sup>。宋重升<sup>[38]</sup> 以 16 年生杉木为研究对象, 发现随着间伐强度的增强, 小径材和小条木出材量和出材率呈现减弱的趋势, 与本研究结果一致。此外, 宋重升发现小条木仅出现在未间伐林分内, 而在本研究中, 各间伐套种处理中均出现了小条木, 原因可能为初始间伐时林分林龄较大, 并且间伐套种处理时间较短, 导致林分胸径生长变化较小, 仍有较多林木胸径位于 14 径阶下。王有良等<sup>[39]</sup> 认为大径材蓄积量随保留密度的增大呈先增加而后减小的趋势, 这与本研究结果不完全一致。可能是受各径阶活立木株数的影响, 随着间伐强度的增大, 林木胸径递增, 径阶后移, 但林木株数逐渐减少, 导致林木大径材出材量呈现先增加后减小再增大的趋势<sup>[40]</sup>。

#### 4.4 杉木人工林不同间伐与阔叶树套种处理效果评价

样地经过不同间伐套种模式改造之后, 林内环

境发生改变, 导致林分生长形质性状、空间利用能力、林分产量均发生变化, 本研究对其进行综合分析, 发现得分由高到低依次为 III > II > I > CK, 表明间伐套种处理可以有效改善杉木人工林的生长特征。

## 5 结论

间伐与阔叶树套种处理提高了 23 a 林龄的杉木人工林的规格材出材率, 降低了非规格材出材率, 有利于杉木大径材培育; CK 是提升林木干形形质的最佳处理措施, 提高了杉木的高径比、胸高形数和枝下高; II 处理 (56% 间伐 + 套种阔叶树) 是提升林木空间利用能力的最佳处理措施, 提高了杉木的冠幅、冠长、冠长率和冠形率、树冠表面积、树冠体积; III 处理 (65% 间伐 + 套种阔叶树) 是快速提升杉木人工林生长特征的最佳处理措施, 提高了杉木人工林林分特征的综合得分。

#### 参考文献:

- [1] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [2] 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.
- [3] Lin N, Deng N, Lu D. et al. Short-Term Effects of Thinning on Tree Growth and Soil Nutrients in the Middle-Aged Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) Plantations[J]. Forests, 2023, 14(1): 74.
- [4] 舒韦维, 卢立华, 李华, 等. 林分密度对杉木人工林下植被和土壤性质的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(11): 4521-4530.
- [5] 方碧江. 杉木灰木莲混交林生长情况及土壤理化性质[J]. 森林与环境学报, 2022, 42(1): 46-52.
- [6] 李方兴, 张意苗, 易伟东, 等. 马尾松、木荷纯林及混交林的生长差异分析[J]. 南方林业科学, 2016, 44(5): 17-20.
- [7] Bi H Q, Long Y S, Turner J, et al. Additive prediction of above-ground biomass for *Pinus radiata* (D. Don) plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(12): 2301-2314.
- [8] Jacobs D F, Selig M F, Severeid L R. Aboveground carbon biomass of plantation-grown American chestnut (*Castanea dentata*) in absence of blight[J]. Forest Ecology and Management, 2009, 258(3): 288-294.
- [9] Ming A G, Jia H Y, Zhao J L, et al. Above-and below-ground carbon stocks in an indigenous tree (*Mytilaria laosensis*) plantation chronosequence in subtropical China[J]. PLoS One, 2014, 9(10): e109730.
- [10] Wang H, Liu S R, Wang J X, et al. Effects of tree species mixture on soil organic carbon stocks and greenhouse gas fluxes in subtropical plantations in China[J]. Forest Ecology and



- Management, 2013, 300: 4-13.
- [11] Li W H. Degradation and restoration of forest ecosystems in China[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 201(1): 33-41.
- [12] Zhu J J, Yang K, Yan Q L, *et al.* Feasibility of implementing thinning in even aged *Larix olgensis* plantations to develop unevenaged larch-broadleaved mixed forests[J]. Journal of Forest Resource, 2010, 15: 71-80.
- [13] 欧建德. 不同林窗马尾松林对林下南方红豆杉形质生长的影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2020, 40(5): 10-17.
- [14] 李婷婷, 陆元昌, 庞丽峰, 等. 杉木人工林近自然经营的初步效果[J]. 林业科学, 2014, 50(5): 90-100.
- [15] 孙冬婧, 温远光, 罗应华, 等. 近自然化改造对杉木人工林物种多样性的影响[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 202-208.
- [16] 欧建德, 吴志庄. 林下套种对南方红豆杉树冠形态结构及干形变化的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 106-110.
- [17] 陈莹莹. 间伐补植阔叶树大苗对杉木人工林生长的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2017.
- [18] 郭丽玲, 潘 萍, 欧阳勋志, 等. 间伐补植对马尾松低效林生长及林分碳密度的短期影响[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(3): 48-54.
- [19] 彭文成, 黄士琦, 杨 佳, 等. 马占相思人工林近自然改造群落结构转型2年期效果初报[J]. 热带林业, 2023, 51(1): 30-35.
- [20] 刘思泽, 尹海锋, 沈 逸, 等. 间伐强度对马尾松人工林间伐初期林下植被群落物种组成和多样性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 2866-2874.
- [21] 翟凯燕, 马婷瑶, 金雪梅, 等. 间伐对马尾松人工林土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(3): 609-615.
- [22] 葛兆轩, 苑美艳, 黄选瑞, 等. 塞罕坝北落叶松人工林不同经营模式效果评价[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 38-47.
- [23] 王俊男. 林下套种楠木对杉木人工林生态系统的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [24] Ford K R, Jan K. Competition alters tree growth response to climate at individual and stand scales[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2017, 47: 53-62.
- [25] 姜 丽, 张雄清, 段爱国, 等. 不同林分密度指标在杉木单木直径年生长模型的应用[J]. 林业科学研究, 2022, 35(4): 123-129.
- [26] 韩明跃, 李莲芳, 郑 晔, 等. 间伐强度对云南松中龄低产林分结构的调整研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(2): 27-33.
- [27] 熊光康, 厉月桥, 熊有强, 等. 低密度造林对杉木生长、形质和材种结构的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 165-173.
- [28] 童书振, 盛炜彤, 张建国. 杉木林分密度效应研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(1): 66-75.
- [29] 苏日娜. 不同经营措施对长白落叶松人工林生长和土壤性质的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2022.
- [30] 公宁宁, 马履一, 贾黎明, 等. 不同密度和立地条件对北京山区油松人工林树冠的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 9-12.
- [31] 段 劫, 马履一, 贾黎明, 等. 北京地区油松人工林树冠竞争因子的测算与分析[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 14-18.
- [32] 张晓红, 张会儒, 卢 军, 等. 目标树抚育间伐对蒙古栎天然次生林生长的初期影响[J]. 林业科学, 2020, 56(10): 83-92.
- [33] 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.
- [34] Sullivan T P, Sullivan D S. Acceleration of old-growth structural attributes in lodgepole pine forest: tree growth and stand structure 25 years after thinning[J]. For Ecol Manage, 2016, 365: 96-106.
- [35] 卢立华, 农 友, 李 华, 等. 保留密度对杉木人工林生长和生物量及经济效益的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 717-724.
- [36] Zachara T. The influence of selective thinning on the social structure of the young Scots pine stand[J]. Prace Instytutu Badawczego Lesnictwa Seria A, 2000, 3: 35-61.
- [37] Nord-Larsen T, Cao Q V. A diameter distribution model for evenaged beech in Denmark[J]. Forest Ecology and Management, 2006, 231: 218-225.
- [38] 宋重升, 王有良, 张利荣, 等. 间伐强度对杉木人工林材种结构的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(2): 195-203.
- [39] 王有良, 宋重升, 何宗明, 等. 杉木材种结构及大径材生长保留密度与立地效应[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2022, 23(2): 246-252.
- [40] 程亚平, 吴伟华, 姚 俊, 等. 不同立地及间伐强度对杉木人工林生长的影响[J]. 南方林业科学, 2016, 44(2): 24-2751.

# Effects of Thinning and Interplanting on the Tree Growth, Stem-form Quality and Timber Structure of *Cunninghamia lanceolata*

WANG Shu-ren<sup>1</sup>, GUO Li-na<sup>1</sup>, BAI Yan-feng<sup>1</sup>, ZANG Yi-ming<sup>2</sup>, ZHU Ya-jun<sup>2</sup>, JIANG Chun-qian<sup>1</sup>

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Forestry Technology Extension Service Center of Qingyang Forestry Bureau, Anhui Province, Chizhou 247100, Anhui, China)

**Abstract:** [Objective] To analyze the effects of thinning and interplanting measures on the growth traits, spatial use capacity and stand yield for providing a scientific basis for managing Chinese fir plantation. [Method] The response of *Cunninghamia lanceolata* stand quality to thinning and interplanting was explored by comparing the pure forest of control treatment (CK: thinning intensity 0%, 1 740 trees left per hectare) with thinned forests ( I : 47%; II : 56%; III : 65%) and replanted *Phoebe chekiangensis* and *Sassafras tzumu*, and the improvement effect of thinning and interplanting on the growth of Chinese fir was comprehensively evaluated by principal component analysis. [Result] (1) Thinning and broadleaf trees interplanting promoted tree growth of Chinese fir. Forest had the highest DBH, tree height, individual tree volume, and timber yield under treatment III, which increased by 32.07%, 21.60%, 83.33%, and 6.77% respectively compared to CK ( $P < 0.05$ ). However, the height-diameter ratio, breast-height form factor, the yield of small strips, small diameter wood, fuelwood and waste wood were lower than CK, with a decrease of 8.64%, 3.70%, 90.88%, 41.47%, 54.50% and 5.71% respectively compared with CK. (2) The space use capacity of Chinese fir plantations changed significantly after thinning and broadleaf trees interplanting. The crown width, crown length, crown ratio, crown shape, canopy surface and canopy volume were all significantly higher than those of CK, with the growth rates of 12.16%~31.00%, 55.58%~61.24%, 30.00%~40.00%, 16.11%~44.94%, 67.17%~95.86%, 84.74%~146.63%. (3) The thinning and interplanting treatments can effectively improve the growth of Chinese fir. The comprehensive score in treatment III (1.186) was the highest, followed by II (1.092), I (0.671), and CK (-0.709). [Conclusion] If the Chinese fir plantation management is to rapidly improve the growth, treatment III (65% thinning and interplanting broadleaf trees) is the best measure.

**Keywords:** *Cunninghamia lanceolata* plantation; broadleaf trees interplanting; space utilization capacity; principal component analysis

(责任编辑: 彭南轩)