

## 间伐追肥对杉木中龄林材种变化的早期效应\*

伍观娣<sup>1</sup> 胡德活<sup>1</sup> 郑会全<sup>1</sup> 王润辉<sup>1</sup> 韦如萍<sup>1</sup>  
晏姝<sup>1</sup> 黄荣<sup>1</sup> 邱智雄<sup>2</sup>

(1. 广东省森林培育与保护利用重点实验室/广东省林业科学研究院, 广东 广州 510520;

2. 韶关市国有韶关林场, 广东 韶关 512000)

**摘要** 为构建南岭山区杉木 *Cunninghamia lanceolata* 大径材高效培育技术体系, 提高南岭山区杉木大径材产量与质量, 采用正交设计对杉木中龄林进行间伐与施肥试验, 3 a 后进行林分生长分析。T 检验分析结果显示, 处理 T-3 (间伐后密度 1 500 株·hm<sup>-2</sup>, 每株尿素 200 g, 过磷酸钙 600 g)、T-6 (间伐后密度 1 200 株·hm<sup>-2</sup>, 每株尿素 200 g) 的单位面积蓄积在处理前、后间分别达显著 ( $P<0.05$ )、极显著差异 ( $P<0.01$ )。最优的胸径-树高生长模型拟合为  $y=3.7838x^{0.4727}$ 。不同材种生长分析结果显示, 处理前和处理后各材种总体呈现小径材递减, 中径材、大径材递增的趋势。正交试验分析表明, 密度控制和追肥效应对杉木中龄林材种结构有影响。间伐后增加大径材出材率最佳因素组合为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, 即最小密度 900 株·hm<sup>-2</sup>, 每株最大尿素用量 200 g 和中等水平过磷酸钙 300 g; 增加大径材出材量最佳因素组合为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>1</sub>, 即最小密度 900 株·hm<sup>-2</sup>, 每株最大尿素用量 200 g 和最低水平过磷酸钙 0 g。

**关键词** 杉木; 中龄林; 大径材培育; 密度控制; 施肥控制

中图分类号: S753 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 06-0010-08

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202406002

Early Effects of Thinning and Topdressing on Changes of Timber Assortment Structure in Middleaged *Cunninghamia lanceolata*WU Guandi<sup>1</sup> HU Dehuo<sup>1</sup> ZHENG Huiquan<sup>1</sup> WANG Runhui<sup>1</sup>  
WEI Ruping<sup>1</sup> YAN Shu<sup>1</sup> HUANG Rong<sup>1</sup> QIU Zhixiong<sup>2</sup>

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry,

Guangzhou, Guangdong 510520, China;

2. Guangdong Shaoguan State-owned Forest Farm, Shaoguan, Guangdong 512000, China)

**Abstract** To construct the efficient cultivation technology system of *Cunninghamia lanceolata* diameter timber in the Nanling mountain area, and improve the yield and quality of large diameter timber of *C. lanceolata* in the Nanling mountain area, the orthogonal design was used to carry out the thinning and fertilization experiment of *C. lanceolata* middle-aged forest, and the stand growth was carried out after 3 years. T-test analysis results showed that the unit area accumulation of T-3 (After thinning, the density was 1 500 plants per hm<sup>2</sup>, with each plant being fertilized with 200 g urea and 600 g calcium superphosphate) and T-6 (The density after

\* 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600301)。

第一作者: 伍观娣 (1984—), 女, 高级工程师, 主要从事林业科研管理与林木良种选育工作, E-mail: 308472984@qq.com。

通信作者: 王润辉 (1974—), 男, 高级工程师 (教授级), 主要从事林木遗传育种与森林培育技术研究, E-mail: wrunh@163.com。

thinning was 1 200 plants per  $\text{hm}^2$ , with each plant being fertilized with 200 g) reached significant ( $P < 0.05$ ) and extremely significant difference ( $P < 0.01$ ) before and after treatment, respectively. The optimal DBH-height growth model fitting was  $y = 3.7838x^{0.4727}$ . The results of growth analysis of different timber assortment structures showed that before and after treatment, timber assortment structures showed a decreasing trend of small diameter timber, and an increasing trend of medium diameter timber and large diameter timber. Orthogonal test analysis showed that the density control and topdressing effect had an effect on the timber assortment structures of *C. lanceolate* middle age forest. The optimal combination of factors for increasing the yield of large diameter timber was  $A_3B_3C_2$ , that is, the minimum density (900 plants per  $\text{hm}^2$ ), the amount of urea (200 g per plant), and the medium level of calcium superphosphate (300 g per plant), which is the most conducive to increase the yield of large diameter timber. The best combination of factors to increase the output of large diameter timber was  $A_3B_3C_1$ , that is, the minimum density (900 plants per  $\text{hm}^2$ ), the amount of urea (200 g per plant), and the minimum level of calcium superphosphate (0 g per plant).

**Key words** *Cunninghamia lanceolate*; middle age forest; cultivation for large diameter timber; density control; fertilization control

杉木 *Cunninghamia lanceolate* 为我国南方重要的速生用材树种, 生长快、产量高、材质好、用途广、经济效益高, 在南方各省(区)广泛种植。第九次森林资源连续清查数据显示, 2017年广东省杉木人工林栽培面积为  $79.61 \times 10^4 \text{ hm}^2$ , 占全省人工林面积的 16.46%; 杉木人工林的蓄积量占全省人工林蓄积量的 19.0%<sup>[1]</sup>, 在广东省林业生产中占有举足轻重的地位。近年来, 广东正处于绿美广东生态建设的重要时期, 也是森林质量精准提升行动实施的关键阶段, 广东省杉木林经营正面临着以种植面积扩张为主向以质量提升为主的转变, 定向培育优质大径材成为杉木人工林经营的重要方向。

国内学者围绕定向培育优质杉木大径材开展了许多研究。合理地保留密度和科学施肥能在相对较短时间内提高大径材产量<sup>[2]</sup>。适宜的立地条件及密度范围, 有利于杉木大径材的培育, 在南岭山区立地指数 18 以上, 间伐后密度宜为 1 100~1 300 株· $\text{hm}^{-2}$ <sup>[3]</sup>。宋重升等<sup>[4]</sup>对杉木人工林进行了不同强度间伐抚育, 间伐后林分密度分别为 900、1 200 和 1 415 株· $\text{hm}^{-2}$ , 间伐 3 a 后, 林分蓄积量随间伐强度的增大而递减, 在立地质量  $\geq 22$  及  $0 \leq$  间伐强度  $\leq 35\%$  的条件下, 间伐强度越大, 越适宜培育大径材。蒋华<sup>[5]</sup>对实施不同间伐强度和施肥处理后 3 a 的杉木中龄林生长效果分析发现, 杉木林分平均胸径和平均单株材积均随间伐强度的增大而增加, 林分蓄积量随着间伐强度的增大而递减。

崔子佳<sup>[6]</sup>提出施肥是实现杉木人工林速生丰产的重要手段, 其中施肥方法、施肥量和施肥种类是研究杉木施肥的核心问题。如何将抚育间伐和施肥有机结合, 加快杉木大径材的生长速度, 值得深入研究。本研究通过对南岭山区 16 a 生杉木中龄林开展间伐和施肥的抚育措施效果分析, 以期以南岭山区杉木中龄林林分改培大径材提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于广东省韶关市浈江区国有韶关林场<sup>[7]</sup>, 经纬度为  $24^{\circ}35'N$ 、 $113^{\circ}55'E$ , 林场位于南岭山脉中段, 海拔 100~200 m, 坡向西南, 坡位中下坡, 坡度  $5^{\circ}$ ~ $15^{\circ}$ , 土层厚度 1 m 以上, 年平均气温  $20.3^{\circ}C$ , 年平均雨量 1 537.4 mm, 无霜冻期 305 d, 年平均日照时数 1 529.2 h, 年积温平均为  $7 436.0^{\circ}C$ , 光、热、水资源丰富。试验林地立地指数为 16~18, 造林时间为 2001 年, 面积  $1.5 \text{ hm}^2$ , 造林苗木为本地种源, 造林后每年抚育、追肥各 1 次, 持续 2 a, 每株施放尿素 100 g 作追肥。根据《商品林经营管理规范 DB44/T 1143-2013》<sup>[8]</sup>划定的标准, 该杉木试验林分为中龄林, 间伐前密度为 2 100 株· $\text{hm}^{-2}$ 。

### 1.2 试验方法

1.2.1 本底调查 于 2017 年 7 月在林分内设置  $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  典型样地 30 个, 对各标准样地的杉木进行每木检尺, 测定胸径、树高, 作为间伐和施肥处理前的本底数据。

1.2.2 试验设计 试验采用正交设计, 3 因素 3 水平, 以不间伐不施肥为对照, 共 10 个处理 (表 1~2)。每个处理设置 3 个重复, 3 个样地分别位

于中上坡、中坡、下坡。2018 年 5 月间伐, 2018 年 5 月和 2019 年 5 月连续 2 a 施肥。对试验样方进行复测。

表 1 韶关林场杉木中龄林大径材培育配方施肥正交试验因素和水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal test of fertilization formula for large diameter timber cultivation of *Cunninghamia lanceolata* middle age plantation in Shaoguan State-owned Forest Farm

水平 Levels	因素 Factors		
	间伐后密度/ (株·hm <sup>-2</sup> ) (A) Density after thinning	尿素/g (B) Urea	过磷酸钙/g (C) Calcium superphosphate
1	1 500	0	0
2	1 200	100	300
3	900	200	600

注: N 肥、P 肥施用量以土壤本底分析结果为依据。

Note: Amount of application N and P fertilizer base on the results of soil analysis.

表 2 杉木中龄林大径材培育密度、施肥试验组

Tab. 2 Density, fertilization experiment groups on large-diameter timber cultivation of *Cunninghamia lanceolata* middle age forest

处理号 Treatments	组合 Combinations	处理方式 Measures of the treatments
T-1	A <sub>1</sub> B <sub>1</sub> C <sub>1</sub>	间伐后密度 1 500 株·hm <sup>-2</sup>
T-2	A <sub>1</sub> B <sub>2</sub> C <sub>2</sub>	间伐后密度 1 500 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 100 g、过磷酸钙 300 g
T-3	A <sub>1</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>	间伐后密度 1 500 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 200 g、过磷酸钙 600 g
T-4	A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>2</sub>	间伐后密度 1 200 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施过磷酸钙 300 g
T-5	A <sub>2</sub> B <sub>2</sub> C <sub>3</sub>	间伐后密度 1 200 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 100 g、过磷酸钙 600 g
T-6	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>	间伐后密度 1 200 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 200 g
T-7	A <sub>3</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>	间伐后密度 900 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施过磷酸钙 600 g
T-8	A <sub>3</sub> B <sub>2</sub> C <sub>1</sub>	间伐后密度 900 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 100 g
T-9	A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	间伐后密度 900 株·hm <sup>-2</sup> , 每株施尿素 200 g、过磷酸钙 300 g
T-10	对照	不间伐不施肥

### 1.3 数据统计分析

1.3.1 胸径与材种统计 胸径以 2 cm 为 1 个径阶, 林分平均胸径采用林分断面面积平方平均直径<sup>[9]</sup>:  $d_i$  为径阶  $i$  的直径,  $d_{ind}$  为径阶  $i$  内各单株的直径。

$$d_i = \sqrt{\frac{1}{N_i} \sum d_{ind}^2}$$

计算各径阶的平均胸径  $d_i$ , 根据拟合的径阶胸径—树高生长模型, 计算各径阶的树高  $h_i$ <sup>[10]</sup>。

单株材积公式:  $V_{ia} = 0.000\ 058\ 777\ 042 \times d_i^{1.969\ 983\ 1} \times h_i^{0.896\ 461\ 57}$

原条材材积公式:  $V_o = 0.000\ 036\ 024\ 375 \times d_i^{1.947\ 520\ 76} \times h_i^{1.007\ 937\ 69}$

各径阶的总材积计算公式:  $V_i = V_{ia} \times N_i$ , 其中  $N_i$  为第  $i$  阶总株数。样方的总材积则为各径阶总材

积:  $V = \sum_{i=1}^n V_i$ ,  $n$  为径阶数目。

按传统林分材种划分方法<sup>[11]</sup>, 当立木胸径  $d_{1.3} \geq 26$  cm, 划定为大径材;  $24 \text{ cm} \geq d_{1.3} \geq 18$  cm, 划定为中径材;  $1 \text{ cm} \geq d_{1.3} \geq 10$  cm, 划定为小径材;  $8 \text{ cm} \geq d_{1.3} \geq 6$  cm, 划定为小条木, 将各样地林分的大、中、小径材及小条木等的立木株数和径阶材积分别归并、汇总, 计算各径阶立木出材量, 并按各材种进行归并。

统计分析分别在 Excel、SPSS17、R4.1.0 等软件上进行。统计分析使用混合模型 (Mixed model), 重复为随机效应, 正交设计处理为固定效应<sup>[12]</sup>。多重比较采用 Duncan 方法进行<sup>[13]</sup>。

1.3.2 胸径—树高生长模型 按相聪伟<sup>[9]</sup>、邓伦秀<sup>[10]</sup> 博士毕业论文中杉木人工林材种结构的计算方法, 在每个重复中选择杉木生长分布有较好代表性的试验区域, 通过人工测高和激光测高仪相结合的方式, 测定每株杉木树高, 开展多种回归分析。

## 2 结果与分析

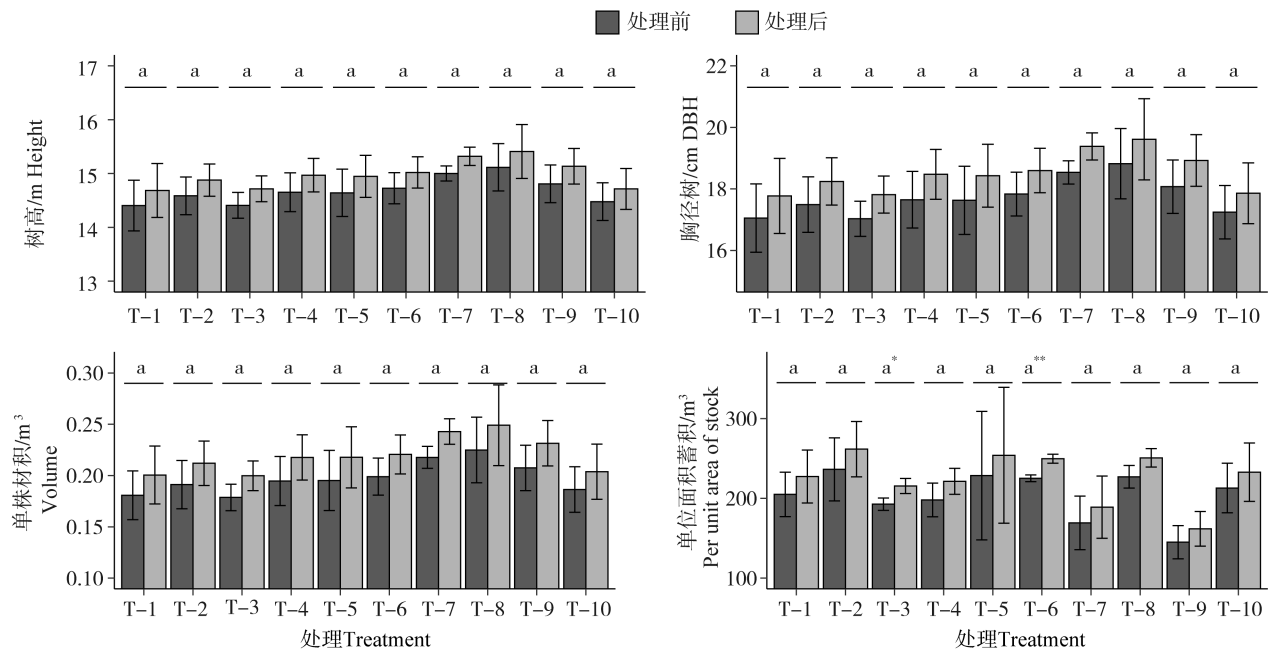
### 2.1 胸径-树高生长模型拟合

表3为4种胸径-树高回归模型，拟合优度依次是二次函数 ( $R^2 = 0.6744$ ) > 幂函数 ( $R^2 = 0.6506$ ) > 一次线性函数 ( $R^2 = 0.6389$ ) > 指数函数 ( $R^2 = 0.6146$ )。然而，二次函数在拟合结果中随胸径的增加呈先增加后递减的规律，不符合树高生长的规律。因此，选择拟合优度略低的幂函数作为树高回归计算的最优函数模型。

表3 杉木胸径-树高回归模型

Tab. 3 DBH-height regression model of *Cunninghamia lanceolata*

回归模型 Types of regression models	模型方程 Equations of the models	决定系数 $R^2$
二次函数	$y = -0.0188x^2 + 1.0767x + 1.7418$	0.6744
一次线性函数	$y = 0.3679x + 8.1572$	0.6389
指数函数	$y = 9.3128e^{0.0254x}$	0.6146
幂函数	$y = 3.7838x^{0.4727}$	0.6506



注：T1~9 分别表示正交设计的处理，密度为 1 500、1 200、900 株·hm<sup>-2</sup>，尿素为每株 0、100、200 g，过磷酸钙 0、300、600 g，T10 为对照，不间伐不施肥；\* 和 \*\* 分别表示在单位面积蓄积上达显著 ( $P < 0.05$ )、极显著水平 ( $P < 0.01$ )。

Note: T1~9 represented the treatments of orthogonal design, the density was 1 500, 1 200, 900 plants per hm<sup>-2</sup>, Urea was 0, 100, 200 g per plant, calcium superphosphate was 0, 300, 600 g per plant, T10 was the control, no thinning and no fertilization; \* and \*\* represent significant level ( $P < 0.05$ ) and extremely significant level ( $P < 0.01$ ) accumulation per unit area, respectively.

图1 杉木各间伐施肥处理本底和处理后生长数据对比

Figure 1 Comparison of growth data of *Cunninghamia lanceolata* under different thinning fertilization treatment and after treatment

### 2.2 不同间伐追肥处理对林分生长的早期影响

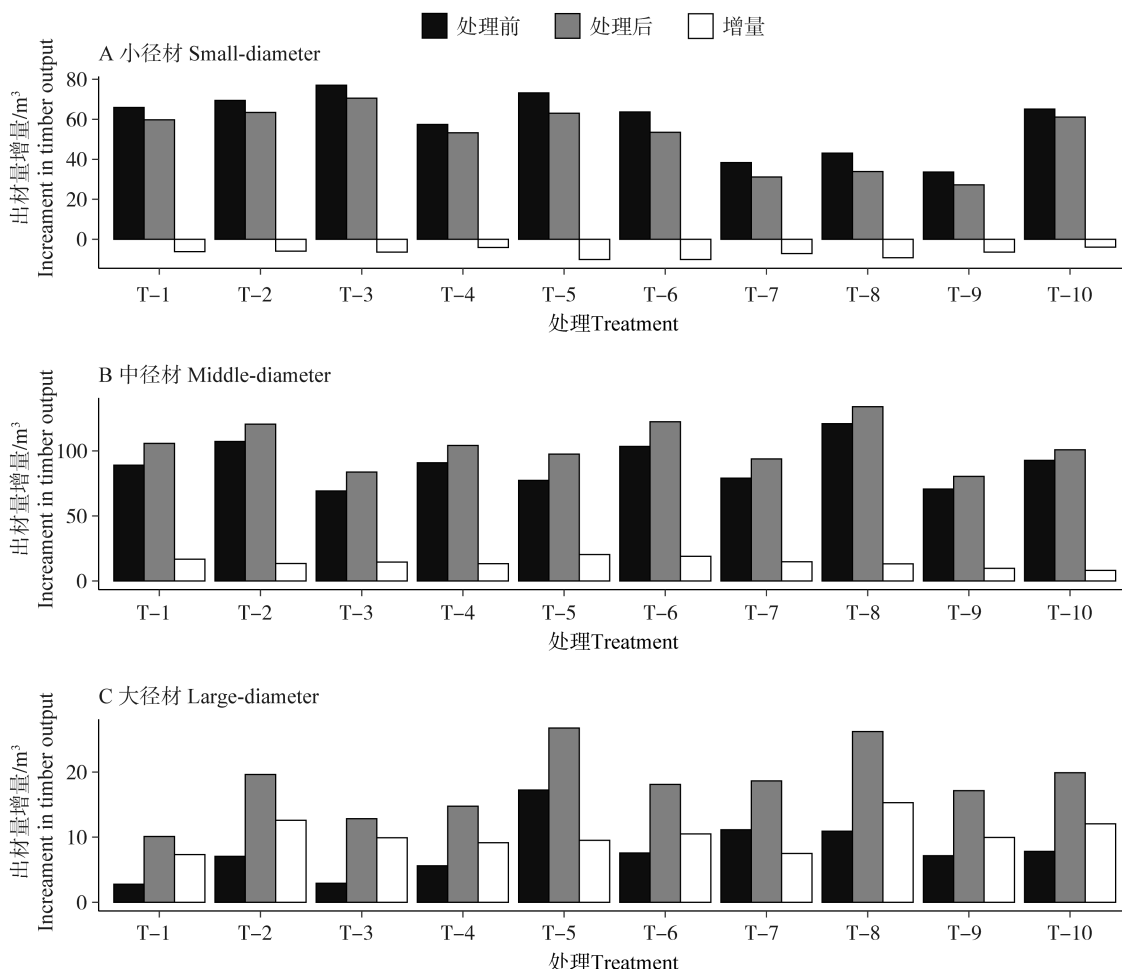
间伐、施肥前 16 a 生杉木树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积的均值分别为 14.41~15.11 m、17.03~18.82 cm、0.18~0.25 m<sup>3</sup> 和 145.07~236.38 m<sup>3</sup> (图 1); 间伐、施肥后样方树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积的均值分别为 14.68~15.41 m、17.77~19.61 cm、0.20~0.25 m<sup>3</sup> 和 161.85~261.72 m<sup>3</sup> (图 1)。处理前后的标准差均处于较小水平，说明不同试验处理间的差异较小。

对处理前和处理后的数据进行 T 检验分析，结果显示，处理 T-3、T-6 与 T-10 对比，在单位面积蓄积上分别达显著 ( $P < 0.05$ )、极显著 ( $P < 0.01$ ) 水平 (图 1)，表明间伐处理后，施用较高的尿素和过磷酸钙肥能够有效促进杉木中龄林分蓄积量的增加。对各性状增量开展多重比较分析，结果列于图 1 柱状图上方，胸径、树高、单株材积和单位面积蓄积增量的不同处理均处于 a 分类组。胸径相对增益介于 16.88%~38.34%，树高相对增益介于 18.31%~38.37%，单株材积相对增益介于 13.52%~44.72%；单位面积蓄积相对增益介于 0.76%~15.81%。

### 2.3 不同间伐追肥处理对林分材种结构的早期影响

处理前和处理后各材种变化总体呈现出小径材逐步减少, 中径材、大径材逐步增加的趋势 (图 2~3)。小径材出材量和出材率增量均为负值, 说明小径材在减少 (图 2A、图 3A); 中径材和大径材的出材量均为正值, 说明中径材和大径材均在增加, 而大径材的增量大于中径材的增量, 表明改培林分材积增量主要为大径材的材积增加所贡献的 (图 2B、图 2C)。图 3B 和图 3C 显示出同样的结论, 即处理后的林分大径材占比在逐步增大。从出材量上看, 大径材在处理前、处理后均最少, 但增量较大, T8 最大 (图 2C); 中径材在处理前、处理后均最大, 增加量也较大, T5 最大

(图 2B)。出材率和出材量相似, T2~10 处理的大径材出材率增量大于中径材 (图 3B、图 3C)。处理前大径材单位面积出材量为 2.78~17.24 m<sup>3</sup>, 对照为 7.83 m<sup>3</sup>, 大径材出材率为 1.36%~7.97%, 对照为 2.20%; 处理后大径材单位面积出材量为 10.12~26.75 m<sup>3</sup>, 对照为 19.89 m<sup>3</sup>, 大径材出材率为 4.46%~10.11%, 对照为 8.47%; 大径材出材量增量范围在 7.34~15.31 m<sup>3</sup>, 对照为 12.06 m<sup>3</sup>, 出材率增量范围在 3.10%~5.70%, 对照为 4.82%。大径材最大增量是处理 8 (间伐后密度 900 株·hm<sup>-2</sup>, 每株施尿素 100 g), 大径材出材量从 10.91 m<sup>3</sup> 增加至 26.22 m<sup>3</sup>, 大径材出材率达 10.52%, 表明最低间伐密度且施用适量的尿素能够促进大径材的增加。

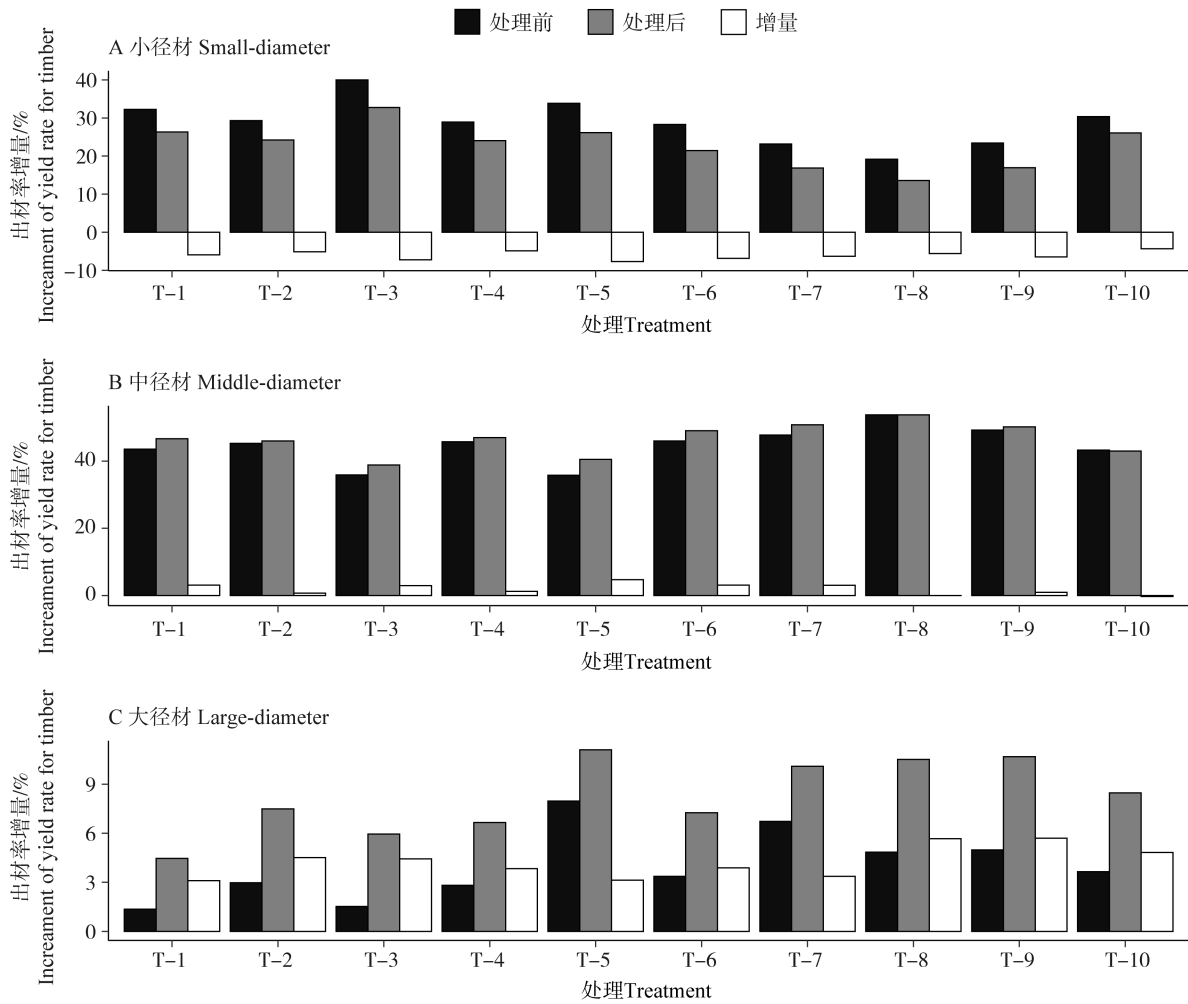


注: T1~9 分别表示正交设计的处理, 密度为 1 500、1 200、900 株·hm<sup>-2</sup>, 每株尿素为 0、100、200 g, 过磷酸钙 0、300、600 g, T10 为对照, 不间伐不施肥。

Note: T1~9 represented the treatments of orthogonal design, the density was 1 500, 1 200, 900 plants per hm<sup>-2</sup>, Urea was 0, 100, 200 g per plant, Calcium superphosphate was 0, 300, 600 g per plant, T10 was the control, no thinning and no fertilization.

图 2 杉木各材种处理前后及增量出材量对比

Figure 2 Comparison of timber yield before and after treatment and incremental output of *Cunninghamia lanceolata*



注：T1~9 分别表示正交设计的处理，密度为 1 500、1 200、900 株· $\text{hm}^{-2}$ ，每株尿素为 0、100、200 g，过磷酸钙 0、300、600 g，T10 为对照，不间伐不施肥。

Note: T1-9 represented the treatments of orthogonal design, the density was 1 500, 1 200, 900 plants per  $\text{hm}^{-2}$ , Urea was 0, 100, 200 g per plant, Calcium superphosphate was 0, 300, 600 g per plant, T10 was the control, no thinning and no fertilization.

图 3 杉木各材种处理前后及增量出材率对比

Figure 3 Comparison of timber yield rate before and after treatment and incremental yield of *Cunninghamia lanceolata*

#### 2.4 用于中龄林质量提升的适宜间伐追肥方案的选择

按正交试验设计统计方法，分别对各处理的材种出材量和出材率变化进行统计分析，结果如表 4~5。加大径材出材率的主次因素依次为密度>尿素>过磷酸钙（表 5），最佳因素组合为  $A_3B_3C_2$ ，即密度为 900 株· $\text{hm}^{-2}$ ，尿素为 200 g，过磷酸钙为 300 g，密度为最低间伐密度，尿素为最大用量，过磷酸钙为中等水平用量。对于增加大径材出材量，主次因素依次为尿素>过磷酸钙>密度，最佳因素组合为  $A_3B_3C_1$ ，即密度为 900 株· $\text{hm}^{-2}$ ，尿素为 200 g，过磷酸钙为 0 g，密度为最低间伐密

度，尿素为最大用量，过磷酸钙为最低水平。减少中径材出材率主次因素依次为过磷酸钙>密度>尿素，最佳因素组合为  $A_2B_3C_3$ ，即密度为 1 200 株· $\text{hm}^{-2}$ ，尿素为 0 g，过磷酸钙为 600 g。减少小径材出材率主次因素依次为过磷酸钙>尿素>密度，最佳因素组合为  $A_2B_1C_3$ ，密度为 1 200 株· $\text{hm}^{-2}$ ，尿素为 200 g，过磷酸钙为 600 g。

### 3 讨论与结论

本研究开展杉木胸径-树高生长模型拟合，目的是精确估算径阶和树高。陶长铸等<sup>[14]</sup>开展筛选适用于定向培育大、中径材的杉木优良无性系研

表 4 杉木各材种出材变化正交试验统计

Tab. 4 Orthogonal test statistical table of changes for all timber types of *Cunninghamia lanceolata*

处理号 Treatments NO.	密度 (A) Density	尿素 (B) Urea	过磷酸 钙 (C) Calcium superphosphate	小径材减少出材率 Reduce the yield of small diameter timber	中径材减少出材率 Reduce the yield of middle diameter timber	大径材增加出材率 Increase the yield of large diameter timber	大径材增加出材量 Increase the output of large diameter timber
T-1	1	1	1	5.90	3.09	3.10	7.34
T-2	1	2	2	5.12	0.72	4.51	12.59
T-3	1	3	3	7.24	2.92	4.43	9.90
T-4	2	1	2	4.88	1.24	3.84	9.15
T-5	2	2	3	7.68	4.73	3.13	9.52
T-6	2	3	1	6.85	3.07	3.88	10.51
T-7	3	1	3	6.30	3.06	3.37	7.51
T-8	3	2	1	5.58	0.01	5.67	15.31
T-9	3	3	2	6.47	0.94	5.70	9.97
T-10				4.31	1.73	6.27	12.06

表 5 杉木各材种出材极差分析

Tab. 5 Range analysis table for yield of all timber types of *Cunninghamia lanceolata*

指标 Index	小径材减少出材率 Reduce the yield of small diameter timber			中径材减少出材率 Reduce the yield of middle diameter timber			大径材增加出材率 Increase the yield of large diameter timber			大径材增加出材量 Increase the output of large diameter timber		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C
K1	6.086	5.693	6.109	2.245	2.466	2.058	4.016	3.436	4.218	9.943	8.000	11.053
K2	6.469	6.128	5.490	3.014	1.821	0.966	3.617	4.438	4.682	9.727	12.473	10.570
K3	6.119	6.852	7.075	1.338	2.310	3.573	4.911	4.670	3.645	10.930	10.127	8.977
R	0.383	1.159	1.585	1.676	0.645	2.607	1.294	1.234	1.037	1.203	4.473	2.076
因素主次	C>B>A			C>A>B			A>B>C			B>C>A		
最优组合	A <sub>2</sub> B <sub>3</sub> C <sub>3</sub>			A <sub>2</sub> B <sub>1</sub> C <sub>3</sub>			A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>2</sub>			A <sub>3</sub> B <sub>3</sub> C <sub>1</sub>		

注: K1 为因素第一水平的平均值, K2 为因素第二水平的平均值, K3 为因素第三水平的平均值, R 为因素不同水平的极差。

Note: K1 was the average of the first level, K2 was the average of the second level, K3 was the average of the third level, and R was the range of different levels.

究, 拟合出不同无性系杉木胸径、树高生长的最优模型为幂函数模型。本研究参考该方法, 采用了 4 种建模方法拟合胸径-树高生长模型, 得到较好的拟合效果, 拟合优度依次是二次函数 ( $R^2 = 0.6744$ ) > 幂函数 ( $R^2 = 0.6506$ ) > 一次线性函数 ( $R^2 = 0.6389$ ) > 指数函数 ( $R^2 = 0.6146$ )。根据杉木生长特性和模型拟合效果, 选择拟合优度略低的幂函数作为树高回归计算的最优函数模型, 进行生长性状及材种性状分析。

关于杉木材种形成与栽培措施的关系, 林业研究人员已获得众多的研究结果。如郭光智等<sup>[15]</sup>研究表明, 南亚热带杉木中大径材材种形成与密度效应关系密切, 中、大径材株数和材积比率随林龄增长而增加, 初植密度越小、立地指数级越

高, 增速越快; 初植密度是大径材林分培育, 的关键限制因子。郑鸣鸣等<sup>[16]</sup>研究发现, 中度和强度间伐的杉木中龄林, 林分平均胸径显著高于弱度间伐, 且平均胸径随间伐强度增大而增大。赵铭臻<sup>[17]</sup>等研究发现, 杉木中龄林低间伐保留密度对大径材出材量和出材率的增加均具有显著的影响, 而施肥对两者影响较小, 其最佳间伐密度和施肥配比为间伐保留密度 1 200 株·hm<sup>-2</sup>、每株 N 肥量 100 g、P 肥量 0 g; 在立地指数 (22) 杉木中龄林大径材培育过程中, 保留较低的间伐密度可有效促进大径材出材量和出材率的增加, 施肥效果并不显著。

与上述研究相同, 本研究从林分经营管理的角度分析杉木中龄林的材种变化规律, 将密度效

应设计为正交试验的因子, 分析不同密度在林分经营管理中对杉木材种形成的效应。本研究对比本底和处理后的材种变化数据, 得出试验样地的材种变化规律, 总体呈现出小径材逐步减少, 而中径材、大径材逐步增加的趋势。增量数据进一步确认上述变化趋势, 小径材呈现负增长, 出材量范围在 $-10.15 \sim -4.15 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 出材率范围在 $-4.88\% \sim -7.68\%$ ; 中径材、大径材呈现正增长趋势, 中径材出材量增量范围在 $9.75 \sim 20.23 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 出材率范围在 $0.01\% \sim 4.73\%$ ; 大径材出材量增量范围在 $7.34 \sim 15.31 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 出材率范围在 $3.10\% \sim 5.70\%$ 。分析结论表明, 密度控制和施肥控制对杉木中龄林材种结构变化有影响。本研究正交分析结论指出, 增加大径材出材率的主次因素依次为密度>尿素>过磷酸钙, 最佳因素组合为 $A_3B_3C_2$ , 即密度为 $900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 尿素为 $200 \text{ g}$ , 过磷酸钙 $300 \text{ g}$ ; 增加大径材出材量的主次因素依次为尿素>过磷酸钙>密度, 最佳因素组合为 $A_3B_3C_1$ , 密度为 $900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 尿素为 $200 \text{ g}$ , 过磷酸钙为 $0 \text{ g}$ 。本研究表明处理后杉木大中小径材材种比例明显改变, 大径材最大增量是处理 T8, 即: 间伐后保留密度 $900 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、每株施尿素 $100 \text{ g}$ , 大径材出材量从 $10.91 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 增加至 $26.22 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ , 大径材出材率达 $10.52\%$ 。本试验所获得的结果对于南岭山区杉木中龄林分改培大径材具有参考意义。

### 参考文献

- [1] 杨加志, 张红爱, 严玉莲, 等. 基于森林资源连续清查的广东省人工林资源动态分析[J]. 林业与环境科学, 2019, 35(2): 95-99.
- [2] 刘跃钧, 马海泉, 陈天华, 等. 不同抚育措施对杉木大径材培育效果的影响[J]. 浙江林业科技, 2015, 35(1): 72-75.
- [3] 晏姝, 王润辉, 邓厚银. 南岭山区杉木大径材成材影响因素研究[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 80-89.
- [4] 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.
- [5] 蒋华, 梁乃鹏, 吴宏扬. 间伐强度和施肥对杉木中龄林生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(2): 87-90.
- [6] 崔子佳. 中国杉木施肥研究文献计量分析[J]. 湖北林业科技, 2022, 51(4): 56-59.
- [7] 张伟红, 王润辉, 郑会全, 等. 南岭山区杉木大径材高效培育土壤调查分析[J]. 林业与环境科学, 2018, 35(4): 48-53.
- [8] 涂慧萍, 陈世清, 陈义刚, 等. 商品林经营管理规范: DB44/T1143-2013[S]. 广东: 广东省质量技术监督局, 2013.
- [9] 相聪伟. 杉木人工林生长及材种结构规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [10] 邓伦秀. 杉木人工林林分密度效应及材种结构规律研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [11] 杨桂娟, 段爱国, 邓伦秀, 等. 不同立地条件下杉木人工林材种结构间伐效应的长期定位研究[J]. 安徽农业大学学报, 2018, 45(3): 444-449.
- [12] 王润辉, 胡德活. SAS Proc Mixed 在林木育种试验统计中应用简介[J]. 广东林业科技, 2011, 27(3): 50-54.
- [13] 王润辉, 胡德活, 郑会全, 等. 杉木无性系生长和材性变异及多性状指数选择[J]. 林业科学, 2012, 48(3): 45-50.
- [14] 陶长铸, 李明, 林开敏, 等. 不同杉木无性系材种结构的差异分析[J]. 森林与环境学报, 2021, 41(2): 204-211.
- [15] 郭光智, 段爱国, 张建国, 等. 亚热带杉木人工林材种结构长期立地与密度效应[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 35-43.
- [16] 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.
- [17] 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.