

不同遗传控制和经营措施对杉木人工林早期生长的效应分析^{*}

王润辉¹ 郑会全¹ 韦如萍¹ 晏 姝¹
胡德活¹ 黄小平² 张庆华² 陈建军²

(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. 韶关市国有河口林场, 广东 韶关 512532)

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, 对杉木新造林大径材高效培育试验在 3 年生时林分生长情况作分析。结果表明: 杉木树高、胸径和单株材积在不同品系间存在较显著或极显著差异, 在南岭山区培育杉木大径材应选择无性系 T-c07、2.5 代种子园种; 不同种植密度间林分生长总体上不存在显著差异, 随着株行距增大树高和单位面积蓄积总体上逐渐减少, 胸径和单株材积逐渐增大, 南岭山区杉木大径材培育宜采用株行距 2 m×2 m、2 m×3 m、4 m×3 m; 施肥对林分生长有明显促进作用, 不同施肥处理间树高、胸径、单株材积存在不同程度差异, 氮磷双因素效应和氮、磷单因素两类拟合与最优用量分析结果表明, 大径材培育新造林试验地对氮肥需要处于中等偏下水平, 而对于磷肥的需求处于中等偏上的水平。采用优良品种配以合理施肥等培育措施对幼林生长具有显著的促进效果。

关键词 杉木; 大径材培育; 遗传控制; 密度控制; 精准施肥控制

中图分类号: S791.27 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2022) 03-0001-09

Genetic and Management Effects on the Early Growth of Chinese Fir Plantation

WANG Runhui¹ ZHENG Huiquan¹ WEI Ruping¹ YAN Shu¹
HU Dehuo¹ HUANG Xiaoping² ZHANG Qinghua² CHEN Jianjun²

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization/Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. Hekou State-owned Forest Farm, Shaoguan, Guangdong 512532, China)

Abstract In order to construct the high-efficient cultivation technology system of large-diameter timber of *Cunninghamia lanceolata* in Nanling mountain area and improve the yield and quality of large-diameter timber of *C. lanceolata* in Nanling mountain area, the high-efficient cultivation test of large-diameter timber of new afforestation of *C. lanceolata* at the age of 3 years was analyzed. The results showed that there were significant or extremely significant differences in tree height, DBH and volume per plant among different lines in genetic control test. Clonal T-c07 and 2.5-generation seed orchard seeds should be selected to cultivate large-diameter wood of Chinese fir in Nanling mountain area. The density control test showed that there was no significant difference in the overall stand growth among different planting densities. With the increase of plant row spacing,

^{*} 基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600301)。

第一作者: 王润辉 (1974—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事林木遗传改良研究, E-mail: wrh@sinogaf.cn。

通信作者: 胡德活 (1962—), 男, 研究员, 主要从事林木遗传改良与森林培育研究, E-mail: hudehuo@163.com。

tree height and unit area volume gradually decreased, while DBH and single plant volume gradually increased. For large-diameter Chinese fir in Nanling mountain, plant row spacing should be $2\text{ m} \times 2\text{ m}$, $2\text{ m} \times 3\text{ m}$, $4\text{ m} \times 3\text{ m}$. "3414" control precision fertilization experiment, fertilizer has obvious promoting effect to the stand growth, different fertilizer treatments tree height, DBH, individual volume exists between different degree of difference, nitrogen and phosphorus two-factor single factor two types of nitrogen and phosphorus effect and fitting and analysis results show that the optimum amount, the afforestation of big diameter wood to foster new testbed for nitrogen need to be at below average level, the demand for phosphate fertilizer is above the average level. The results showed that the adoption of good variety with reasonable fertilization and other cultivation measures had significant promoting effect on the growth of young forest.

Key words *Cunninghamia lanceolata*; cultivation of large diameter wood; genetic control; density control; precision fertilization control

随着人们对木材需求的不断增加,培育人工林日益受到重视,定向培育高产、优质、稳定的人工林已成为世界人工用材林发展的总趋势^[1]。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国特色乡土针叶常绿树种,也是中国亚热带地区最为重要的商品用材与生态造林树种之一,据第8次全国森林资源清查结果^[2]显示,我国杉木人工林面积已达到 $895 \times 10^5 \text{ hm}^2$,蓄积量达 $6.25 \times 10^9 \text{ m}^3$,分别占到全国人工乔木林主要优势树种的19.01%和25.18%,已成为我国最重要的人工用材树种。在我国所有造林树种营造的人工林中,其栽培面积和蓄积量均居首位。杉木人工林经营质量的高低,关系到木材的安全,还关系到生态的安全,并影响到中国生态文明建设进程^[3]。传统杉木培育研究主要集中在丰产栽培、生理生态、良种选育以及材性等方面,近年来杉木优化栽培模式的研究及其涉及内容得到广泛深入开展,这为杉木材种的定向培育研究奠定了良好的基础^[4-5]。

大径材是林木材种定向培育的重要方向,但由于杉木大径材培育过程中存在培育目标不明确、经营效益不高、定向培育技术不配套等问题^[6]。在定向培育技术配套方面,如何协同遗传控制、种植密度及施肥因子以实现大径材的高效培育成为当前研究的热点。为此,本研究以“十三五”国家重点研发计划“杉木高效培育技术研究”项目为契机,重点针对南岭山区杉木径材培育过程中有关遗传控制、种植密度和精准施肥等因子的耦合效应的早期结果进行系统分析,以杉木新造林试验地早期生长性状为目标,从丰产性来衡量

杉木大径材培育效果,选取树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积量等指标,对比不同试验措施在大径材培育的效果,以期为南岭山区杉木大径材培育技术体系的构建提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于广东省韶关市始兴县河口林场($113^{\circ}08'E$, $24^{\circ}55'N$),海拔200 m,土层厚度1 m以上,年均气温19~22℃,年平均降水量约1 600~2 000 mm,相对湿度80%,年日照时数约1 544.9 h。试验地立地指数18、坡度 5° ~ 15° ,土壤pH 4.48,有机质含量 $16.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量 $0.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量 $0.16 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量 $16.70 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $69.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量 $0.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $53.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验方法

开展了3个类型的试验,分别为遗传控制试验、密度控制试验及施肥(追肥)试验。试验地采用“不炼山+带垦+杂枝护”整地模式^[8],植穴 $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ (长×宽×深),每穴施250 g钙镁磷肥(即田师傅土壤调理剂,含 P_2O_5 10%)作基肥,施基肥后回填表土。2017年3月中旬造林,不同试验间及小区间植1行木荷 *Schima superba* 或红锥 *Castanopsis hystrix* 间隔。

1.2.1 遗传控制试验 参试品系5个,包括杉木优良无性系(T-c04号、T-c07号)、广东杉木第二代改良种子园混合种(2.5代)、优良家系(GX10004)及当地普通杉木造林种苗(即江西赣

州信丰杉木 1.5 代种子园种为对照, CK)。每个品系 1 小区, 每小区面积 400 m^2 ($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$), 采用随机区组设计, 3 个区组, 试验共有 15 块试验小区。

1.2.2 密度控制试验 选用 2.5 代种所育 1 年生苗木造林。设计了 5 个种植密度, 分别为 $1.4 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ 、 $2 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 、 $4 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ (此密度间种了珍贵树种闽楠 *Phoebe bournei*)。试验采用随机区组设计, 每种密度 1 小区, 每小区面积 ($15.5 \sim 23$) $\text{m} \times (20 \sim 24) \text{ m}$, 3 个区组, 试验共有 15 块试验小区。

1.2.3 施肥 (追肥) 试验 选用 2.5 代种所育 1 年生苗木造林。追肥组合处理采用“3414”不完全设计联用随机区组设计方案^[9-10], 在造林翌年及第三年的 7 月雨季进行追肥试验处理, 在每株树冠边缘下的坡上方开挖弧形沟, 施肥后覆土。氮肥 (含 N 46.0%) 设置 60、120、180 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 3 个水平; 过磷酸钙 (含 P_2O_5 12.0%) 设置 100、350、600 $\text{g} \cdot \text{株}^{-1}$ 3 个水平; 鉴于南方红壤含钾丰富, 因此外施钾肥不设置水平, 每株保留木均施 60 g 氯化钾 (含 K_2O 60.0%)。施肥试验有 10 个处理组合, 每种处理 1 小区, 每小区面积 400 m^2 ($20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$), 按随机区组设计排列, 3 个区组, 试验共有 30 块试验小区。

1.3 数据分析

2019 年 12 月中旬对各试验林 (约 3 年生) 进行每木树高、胸径测量。单株材积公式 $V=0.058\ 777\ 042 \times D^{1.969\ 983\ 1} \times H^{0.896\ 461\ 57}$, D 为胸径, H 为树高, 闽楠单株材积计算参照文献 [11]。统计分析在 Excel、SAS 和 SPSS 等软件上进行。方差分析使用混合模型 (Mixed model)^[12-13], 品系或处理为固定效应, 重复为随机效应。多重比较采用 Duncan 方法进行。“3414”施肥试验分析按文献 [9-10] 介绍方法, 在 R 语言进行回归分析, 在获得回归方程后, 开展后续最优施肥量推导与计算。

2 结果与分析

2.1 遗传效应分析

对 3 年生林分的保存率及生长量进行测定分析发现, 参试品系保存率均在 90% 以上 (90.49%~97.72%), 但树高、胸径、单株材积及单位面积蓄积方面存在较大的差异。其中, 平

均树高、胸径分别为 3.82~4.67 m、4.53~6.33 cm, 树高生长表现为 T-c07 > 2.5 代 > CK > T-c04 > GX10004; 胸径生长表现为 T-c07 > 2.5 代 > GX10004 > CK > T-c04。值得注意的是, 各系号在平均单株材积和单位面积蓄积指标方面差异更大, 最大值与最小值差异倍数分别达到了 2.07、2.55 倍。就平均单株材积而言, 表现为 T-c07 > 2.5 代 > GX10004 > CK > T-c04, 依据单位面积蓄积表现为 T-c07 > 2.5 代 > CK > GX10004 > T-c04。

树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积 4 个生长性状进行方差和多重比较分析 (表 1), F 值分别为 2.98、10.16、7.75 和 2.81, 达到显著或极显著水平, 表明在幼林期参试品系间生长存在不同程度遗传差异。多重比较结果显示, 树高 T-c07、2.5 代均显著高于 CK, 与 CK 比较分别提高 18.71% 和 4.51%; 胸径 T-c07、2.5 代、GX10004 均显著高于 CK, 与 CK 比较分别提高 32.44%、14.08% 和 6.55%; 单株材积 T-c07、2.5 代、GX10004 均显著高于 CK, 与 CK 比较分别提高 101.32%、31.38% 和 9.83%; 单位面积蓄积 T-c07 显著高于 CK, 与 CK 比较提高 77.81%, 表明在幼林期 T-c07 无性系生长表现最优, 2.5 代种子园种苗居次 (蓄积增益 28.89%)。

2.2 密度效应分析

由表 2 可知, 保存率为 92.18%~98.89%, 平均树高为 3.91~4.32 m, 平均胸径为 5.01~5.56 cm, 平均单株材积为 $0.005\ 91 \sim 0.007\ 18 \text{ m}^3$, 单位面积蓄积为 $6.63 \sim 14.28 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$, 套种闽楠保存率为 91.92%, 平均树高为 2.78 m, 平均胸径为 2.81 cm, 平均单株材积为 $0.000\ 87 \text{ m}^3$, 单位面积蓄积为 $0.49 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。对目的树种杉木而言, 保存率、树高、胸径、单株材积生长差异明显, 密度效应 F 值显示不同种植密度树高、胸径、单株材积、单位面积蓄积均达显著差异水平, 树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积与种植密度的二次回归分析结果显示, 随着株行距增大树高和单位面积蓄积总体上逐渐减少, 胸径和单株材积逐渐增大, 达到峰值后再逐渐减少 (图 1)。

2.3 施肥 (追肥) 效应分析

2.3.1 施肥处理方差分析与多重比较 由 10 种施肥 (追肥) 处理下的 3 年生杉木林分的保存率及生长量统计分析结果 (表 3) 可知, 保存率为 89.12%~97.24%, 处理 4 未达 90%, 相对较低; 平

表1 杉木不同参试品系3年生长情况
Table 1 Growth of different tested strains of *Cunninghamia lanceolata*

性状 Trait	T-c04	T-c07	GX10004	2.5代	CK
保存率 /% Preserving rate	93.32 ± 4.63	97.72 ± 2.49	90.49 ± 5.28	93.11 ± 7.88	92.25 ± 6.18
树高 /m Height	3.97 ± 0.99 cd	4.67 ± 0.81 a	3.82 ± 0.64 d	4.25 ± 0.68 b	4.03 ± 0.74 c
树高增益 /% Gain in height	-1.43	18.71	-4.47	4.51	—
胸径 /cm DBH	4.53 ± 1.44 e	6.33 ± 1.7 a	5.22 ± 1.57 c	5.71 ± 1.33 b	4.97 ± 1.33 d
胸径增益 /% Gain in DBH	-8.2	32.44	6.55	14.08	—
单株材积 /m ³ Individual volume	0.004 85 ± 0.003 68 d	0.010 06 ± 0.005 92 a	0.005 80 ± 0.003 98 c	0.007 38 ± 0.003 89 b	0.005 45 ± 0.003 17 cd
材积增益 /% Gain in volume	-10.03	101.32	9.83	31.38	—
单位面积蓄积 / (m ³ · hm ⁻²) Per unit area of stock	6.99 ± 4.00 b	17.85 ± 5.15 a	7.43 ± 1.80 b	12.94 ± 1.7 1 ab	10.04 ± 1.99 ab
蓄积增益 /% Gain in volume per hectare	-30.36	77.81	-25.97	28.89	—

注：数值后字母不同，表示在 95% 水平上存在显著差异，树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积的品系效应 F 值分别为 2.98、10.16、7.75 和 2.81，达到显著或显著水平。

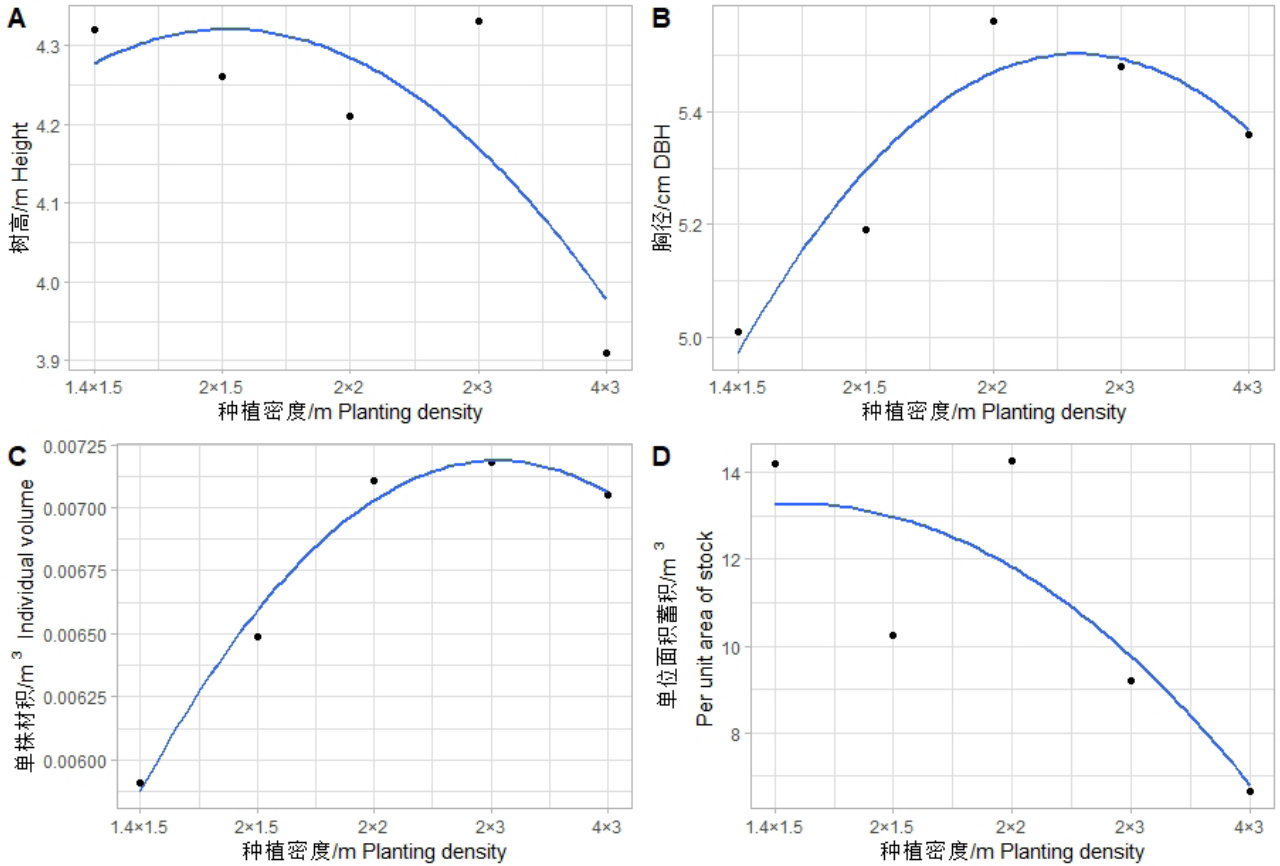
Note: different letters after the value indicate significant differences at the 95% level. The F values of tree height, DBH, volume per plant and volume per unit area were 2.98, 10.16, 7.75 and 2.81, which reached significant or significant level.

表2 杉木不同种植密度3年生长概况
Table 2 Growth profiles of different planting densities

密度 /m Density	树种 Species	保存率 /% Preserving rate	树高 /m Height	胸径 /cm DBH	单株材积 /m ³ Individual volume	单位面积蓄积 (m ³ · hm ⁻²) Per unit area of stock
1.4 m × 1.5 m	杉木	93.1 ± 10.09	4.32 ± 1.16 b	5.01 ± 1.50 c	0.005 91 ± 0.004 00 b	14.23 ± 5.61 a
2 m × 1.5 m	杉木	98.89 ± 1.92	4.26 ± 0.94 b	5.19 ± 1.59 bc	0.006 49 ± 0.004 40 a	10.23 ± 7.86 b
2 m × 2 m	杉木	92.18 ± 5.90	4.21 ± 0.83 b	5.56 ± 1.49 a	0.007 11 ± 0.004 39 a	14.28 ± 7.50 a
2 m × 3 m	杉木	92.39 ± 7.62	4.33 ± 0.84 a	5.48 ± 1.61 ab	0.007 18 ± 0.004 78 a	9.21 ± 1.99 a
4 m × 3 m	杉木	92.32 ± 10.49	3.91 ± 1.04 b	5.36 ± 2.14 ab	0.007 05 ± 0.005 90 a	6.63 ± 4.62 c
4 m × 3 m	闽楠	91.92 ± 4.67	2.78 ± 0.12	2.81 ± 0.55	0.000 87 ± 0.000 51 a	0.49 ± 0.37

注：4 m × 3 m 密度小区为杉木与闽楠行内隔株种植，造林密度实际上为 2 m × 3 m；树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积的品系效应 F 值分别为 0.356、0.342、0.324 和 2.271，树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积均差异显著。

Note: the 4 m × 3 m density plot was planted with *Cunninghamia lanceolata* and *Phoebe bournei* in the row, and the afforestation density was actually 2 m × 3 m. The F values of tree height, DBH, individual volume and per unit area of stock were 0.356, 0.342, 0.324 and 2.271 respectively. There were significant differences in tree height, DBH and individual volume and per unit area of stock.



注：A 为树高，B 为胸径，C 为单株材积，D 为单位面积蓄积。

Note: A is tree height, B is DBH, C is volume per plant, D is volume per hectare.

图 1 杉木不同性状与种植密度的回归分析

Fig.1 Regression analysis of different characters and planting density

均树高为 3.37~4.20 m，处理 6>5>8>3>7>10>2>4>9>1，其他处理比处理 1 高 1.58%~24.76%；平均胸径为 4.35~5.35 cm，处理 6>3>5>8>2>10>7>4>9>1，其他处理均比处理 1 大 4.47%~22.98%；平均单株材积为 0.004 17~0.006 67 m³，处理 6>3>5>8>2>10>7>4>9>1，其他处理比处理 1 高 4.47%~22.98%；单位面积蓄积为 6.38~12.20 m³·hm⁻²，处理 6>2>7>3>8>9>4>10>5>1，其中处理 6 比处理 1 高出 91.22%。

不同处理的树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积 4 个生长性状方差分析的 *F* 值如表 3 所示，分别为 11.124、3.359、4.484 和 0.461，结果表明施肥对幼林期林木生长具有促进作用，不同处理有所不同。对树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积进一步作 Duncan 多重比较，处理 6、5、8、3、7、10、2、4 的 3 个性状生长量均显著高于处理 1，各处理两两组合间也存在显著差异情形，其中处理 6 综合表现最优，其树高、胸径、单株材

积和单位面积蓄积均显著高于其他处理。

2.3.2 氮磷双因素效应拟合与最优用量分析 根据表 4 中“3414”施肥试验各处理的生长测定结果进行统计分析，树高与氮肥、磷肥的二元二次回归拟合方程为： $Y_h=2.149837+0.01672627X_1+0.005819767X_2-0.0000355532X_1^2-0.000004502036X_2^2-0.00002330713X_1X_2$ 。胸径与氮肥、磷肥的二元二次回归拟合方程为： $Y_{dbh}=2.951903+0.02045601X_1+0.007777885X_2-0.00003743109X_1^2-0.000005398994X_2^2-0.00003679580X_1X_2$ 。单株材积与氮肥、磷肥的二元二次回归拟合方程为： $Y_{vol}=0.0007336506+0.00004470508X_1+0.00001944117X_2-0.00000007335070X_1^2-0.00000001709548X_2^2-0.00000007450916X_1X_2$ 。单位面积蓄积与氮肥、磷肥的回归拟合方程为： $Y_{sj}=4.105619+0.05338532X_1+0.02710452X_2-0.0002003797X_1^2-0.00002700698X_2^2$

表 3 3 年生杉木不同施肥（追肥）处理生长比较
Table 3 Different fertilization treatment of growth

处理 Treatment	保存率 / % Preserving rate	平均树高 / m Average height	树高增益 /% Gain in Ht	平均胸径 / cm Average DBH	胸径增益 /% Gain in DBH	平均单株材积 / m ³ Average individual volume	材积增益 /% Gain in volume	单位面积蓄积 /(m ³ · hm ⁻²) Per unit area of stock
1(CK)	91.73 ± 6.19	3.37 ± 0.63 g	—	4.35 ± 1.28 f	—	0.004 17 ± 0.003 04 e	—	6.38 ± 4.00d
2	96.18 ± 5.40	3.68 ± 0.46 ef	9.10	5.03 ± 0.73 bcd	15.49	0.005 48 ± 0.001 84 bc	31.32	10.27 ± 7.55a
3	92.48 ± 8.93	3.90 ± 0.53 bc	15.72	5.29 ± 1.03 ab	21.52	0.006 18 ± 0.002 73 ab	48.10	9.79 ± 6.17b
4	89.12 ± 4.24	3.57 ± 0.50 f	6.01	4.79 ± 1.11 de	10.07	0.004 97 ± 0.002 36 cd	19.13	8.35 ± 4.65c
5	96.38 ± 5.13	4.03 ± 0.33 b	19.46	5.28 ± 0.52 ab	21.26	0.006 04 ± 0.001 90 ab	44.61	8.16 ± 1.88c
6	97.24 ± 4.78	4.20 ± 0.17 a	24.76	5.35 ± 0.56 a	22.98	0.006 67 ± 0.001 42 a	59.80	12.20 ± 0.85a
7	93.47 ± 3.86	3.86 ± 0.15 cd	14.52	4.96 ± 0.53 cd	14.01	0.005 21 ± 0.001 18 cd	24.74	9.88 ± 1.80a
8	93.99 ± 5.50	3.98 ± 0.74 bc	18.27	5.15 ± 1.22 abc	18.30	0.006 38 ± 0.003 17 a	52.87	9.23 ± 4.67b
9	96.31 ± 4.46	3.42 ± 0.75 g	1.58	4.55 ± 1.35 ef	4.47	0.004 48 ± 0.002 98 de	7.27	8.68 ± 4.22bc
10	96.15 ± 5.19	3.75 ± 0.19 de	11.20	4.96 ± 0.46 cd	14.04	0.005 17 ± 0.001 11 cd	23.80	8.31 ± 2.11c

注：处理 1 为对照，为不追肥处理。下同。树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积的品系效应 F 值分别为 11.124、3.359、4.484 和 0.461，前 3 个性状均达到较显著或显著差异水平，单位面积蓄积未达显著差异。
Note: treatment 1 was the control, no topdressing treatment, the same below. The F values of tree height, DBH, individual volume and per unit area of stock were 11.124, 3.359, 4.484 and 0.461 respectively. The first three traits all had significant or significant differences, but the storage per unit area did not have significant differences.

表 4 杉木“3414”施肥试验各处理的生长比较
Table 4 Growth of each treatment in “3414” fertilization test

处理 Treatment	处理 代码 Code	氮肥 (X ₁) / g Nitrogen fertilizer	磷肥 (X ₂) / g Phosphate fertilizer	钾肥 (X ₃) / g Potash fertilizer	树高 / m Height	胸径 / cm DBH	单株材积 / m ³ Individual volume	单位面积蓄积 /(m ³ · hm ⁻²) Per unit area of stock
1(CK)	N ₀ P ₀ K ₀	0	0	0	3.37	4.35	0.004 175	6.38
2	N ₀ P ₂ K ₂	0	350	60	3.68	5.03	0.005 482	10.88
3	N ₁ P ₂ K ₂	60	350	60	3.90	5.29	0.006 183	9.79
4	N ₂ P ₀ K ₂	120	0	60	3.57	4.79	0.004 973	8.35
5	N ₂ P ₁ K ₂	120	100	60	4.03	5.28	0.006 037	8.16
6	N ₂ P ₂ K ₂	120	350	60	4.20	5.35	0.006 671	13.89
7	N ₂ P ₃ K ₂	120	600	60	3.86	4.96	0.005 207	9.87
8	N ₃ P ₂ K ₂	180	350	60	3.98	5.15	0.006 382	9.23
9	N ₁ P ₁ K ₂	60	100	60	3.42	4.55	0.004 478	8.69
10	N _± P _± K _±	120	180	20	3.75	4.96	0.005 168	8.31

$-0.000\ 056\ 847\ 86X_1X_2$ 。

依据以上 4 个二元二次效应方程，按最大边际效应求取偏导函数，分别得到氮、磷两个施肥试验元素的最高施肥量（表 5）。树高对氮肥的需求量高于中等水平，对磷肥需求量低于中等水平；胸径对氮肥的需求量处于中等水平左右，对磷肥需求量低于中等水平；单株材积对氮肥的需求量高于中等水平，对磷肥需求量高于最高试验

水平；单位面积蓄积对氮肥的需求量低于中等水平，对磷肥需求量高于中等水平。总体上看，新造林地杉木大径材对氮肥需要处于中等偏下水平，而对于磷肥的需求处于中等偏上的水平。

表 5 杉木不同性状的氮、磷最高施肥量

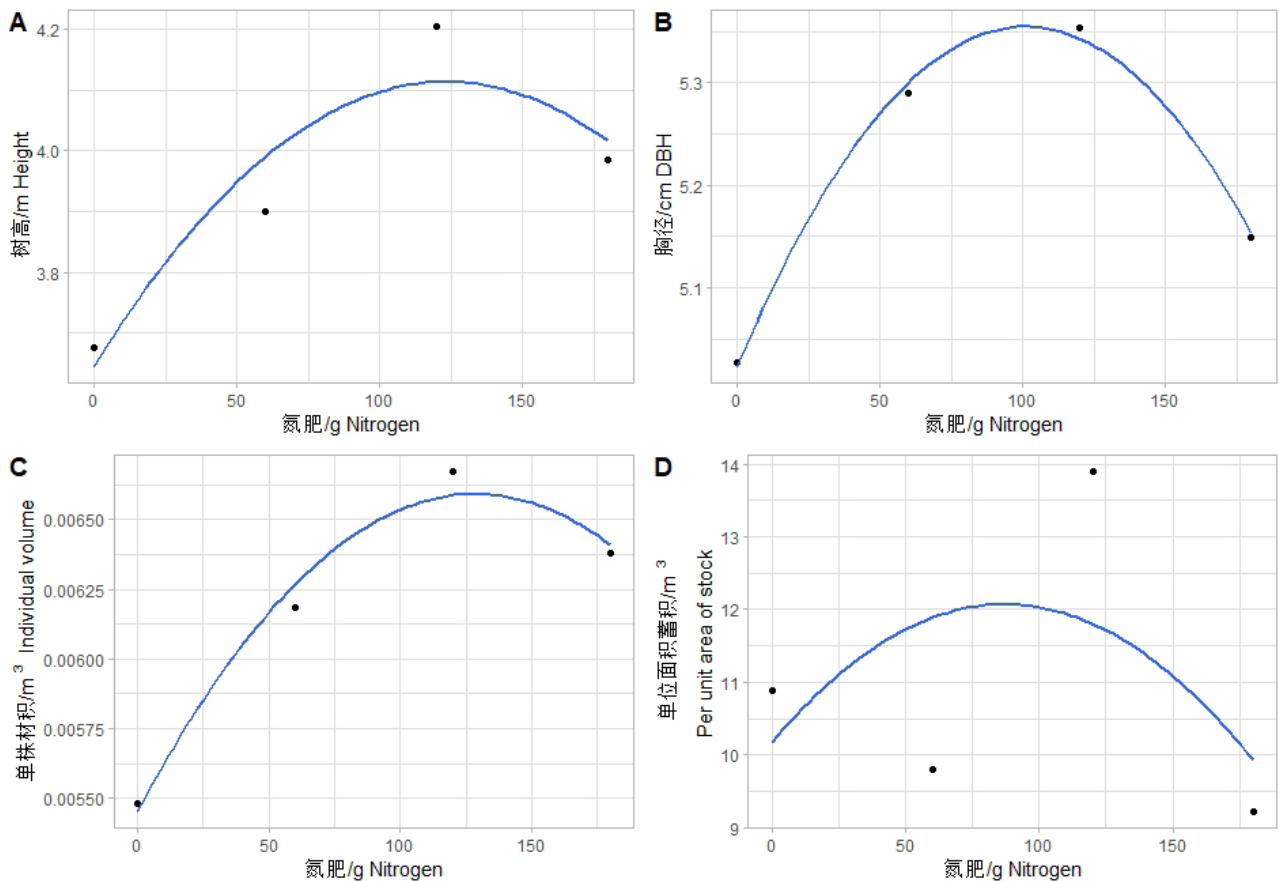
Table 5 The highest amount of N and P fertilizer was applied for different characters

项目 Item	树高 Height	胸径 DBH	单株材积 Individual volume	单位面积 蓄积 Per unit area of stock
氮肥 (X_1) /g	154.21	119.71	148.00	72.91
磷肥 (X_2) /g	247.17	312.38	891.25	425.07

2.3.3 氮、磷单因素效应拟合与最优用量分析
选用处理 2、3、6、8 求在磷钾固定用肥量下的氮肥单因素效应拟合方程（图 2）。树高与氮肥单因素效应方程为： $Y_{ht}=-0.000\ 03X^2+0.007\ 6X+3.645\ 8$ ；胸径与氮肥单因素效应方程为：

$Y_{dbh}=-0.000\ 03X^2+0.006\ 5X+5.023\ 8$ ；单株材积与氮肥单因素效应方程为： $Y_{vol}=-0.000\ 07X^2+0.017\ 7X+5.453\ 9$ ；单位面积蓄积与氮肥单因素效应方程为： $Y_{sj}=-0.000\ 2X^2+0.043\ 4X+10.179$ 。根据一元二次方程最大值解法，当氮肥分别为 126.67、108.33、126.43 和 108.50 时，树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积取最大值。

选用处理 4、5、6、7 求在氮钾固定用肥量下的磷肥单因素效应拟合方程（图 3）。树高与磷肥单因素效应方程为： $Y_{ht}=-0.000\ 006X^2+0.003\ 8X+3.620\ 7$ ；胸径与磷肥单因素效应方程为： $Y_{dbh}=-0.000\ 006X^2+0.003\ 6X+4.859$ ；单株材积与磷肥单因素效应方程为： $Y_{vol}=-0.000\ 02X^2+0.011\ 2X+5.019\ 4$ ；单位面积蓄积与磷肥单因素效应方程为： $Y_{sj}=-0.000\ 04X^2+0.031\ 5X+7.272\ 4$ 。根据一元二次方程最大值解法，当磷肥分别为 316.67、300.00、280.00 和 393.75 时，树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积取最大值。



注：A 为树高，B 为胸径，C 为单株材积，D 为单位面积蓄积。

Note: A is tree height, B is DBH, C is volume per plant, D is volume per hectare.

图 2 氮肥单因素效应拟合方程

Fig.2 Fitting equation of single factor effect of nitrogen fertilizer

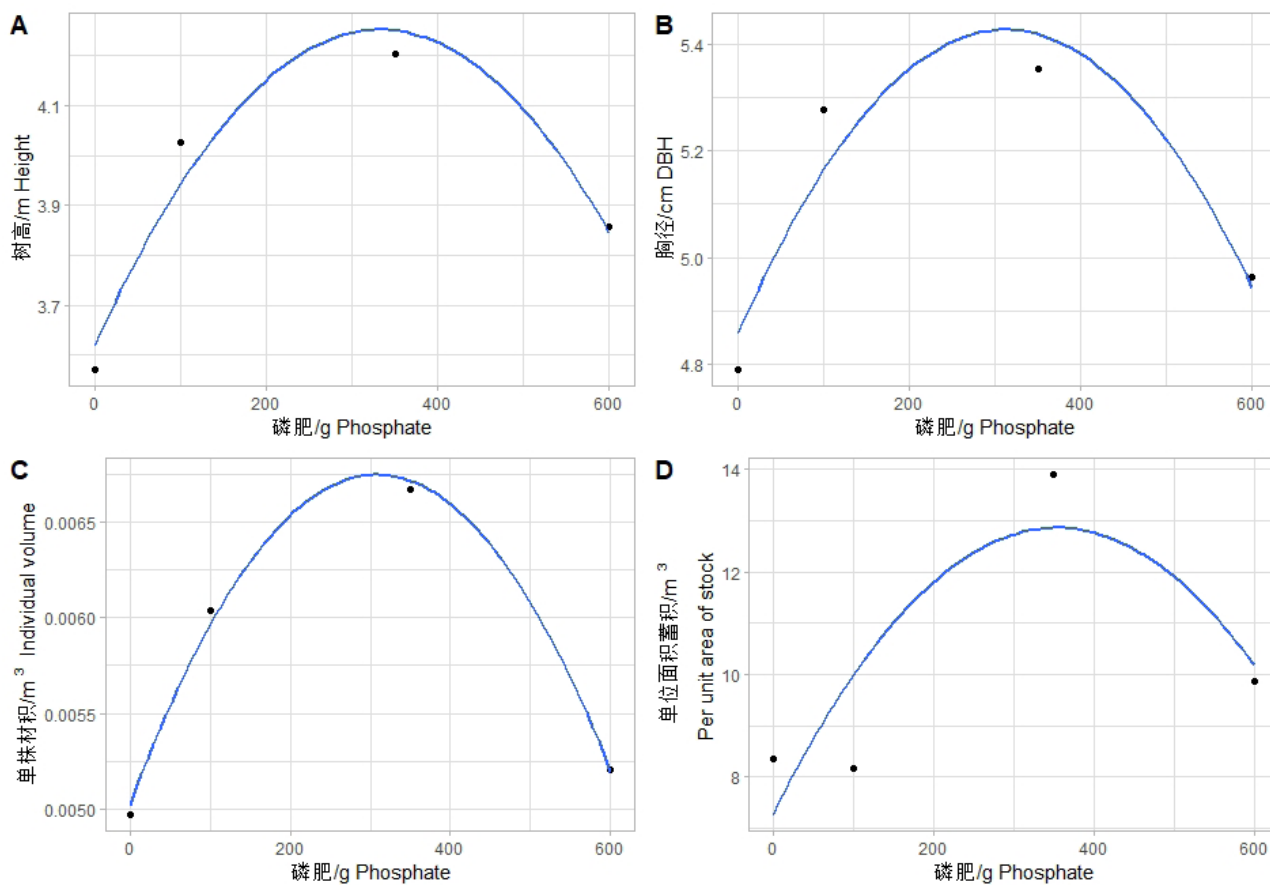


图3 磷肥单因素效应拟合方程

Fig.3 Fitting equation of single factor effect of phosphate fertilizer

3 结论与讨论

涉及到杉木大径材培育在遗传控制方面的研究,在以往已有大量的报导,主要从种源和家系等多个水平上开展了众多的研究工作^[15]。有研究表明使用优良种源培育大径材比普通种源材积生长提高30%左右,而从优良种源中选育出的优良无性系培育的大径材,在优良种源的基础上又提高20%以上,且林分大径材比例明显增加^[14]。在优良家系影响杉木大径材培育方面,有研究表明选用优良家系可以缩短杉木大径材培育年限。上述研究均表明杉木大径材的定向培育亟需适宜的种源、家系或无性系^[16]。本研究中,4个参试品系和江西信丰1.5代种子园种(对照)生长表现良好,但树高、胸径和单株材积在不同品系间存在较显著或极显著差异。据幼林试验结果可知在南岭山区培育杉木大径材应选择T-c07无性系、广东2.5代种子园种苗。

关于杉木大径材培育的密度控制试验研究,

童书振等^[17]经过18年的跟踪研究,得出的几个试验结论如下,杉木可通过多种经营模式进行大径材培育,当市场上大径材经济效益好,宜采用低密度管理模式,对维护地力大有益处;当市场上中小径材销路好,宜采取高密度经营;当市场上需要大径材,又需要中小径材,宜采取高密度造林,低密度管理的模式,可获得高生产力和较好的经济效益,同时能够维护地力。在密度控制方面,幼年阶段树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积与种植密度的回归分析结果可知,随着株行距增大树高和单位面积蓄积总体上逐渐减少,胸径和单株材积逐渐增大,但不同种植密度之间林分生长总体上不存在显著差异。南岭山区杉木大径材培育宜采用株行距为2 m×2 m、2 m×3 m、4 m×3 m。

在精准施肥试验研究方面,比较各施肥处理对杉木幼林生长的影响,不同生长性状呈现较为相似的规律。处理6对树高、胸径、单株材积、单位面积蓄积等所有生长性状都是最好的;对照在所有生长性状中都是最差的,反映出施肥对林

分生长有促进作用。本研究施肥试验采用“3414”设计, 该试验方法在农作物施肥试验中大量使用, 如吴寿华等^[8]采用“3414”肥料效应田间试验方案, 探索福安市水稻施肥指标体系, 对“3414”肥料效应试验进行分析, 成功拟合了NPK三元二次方程, 得最佳产量及对应的施肥量。鉴于南方红壤含钾丰富, 本次试验施钾肥不设置水平, 分析氮磷双因素和氮、磷单因素两种类型的试验数据, 得出不同性状最优的氮磷最大施肥量有所不同, 但本研究的大径材培育新造林试验地总体呈现出对氮肥需要处于中等偏下水平, 而对于磷肥的需求处于中等偏上的水平。蔡维就等^[8]的研究结果显示, 新造林大径材培育试验地的土壤理化测定结果中, 全氮和碱解氮、全磷和有效磷均处于较低水平, 处于四级到六级的水平。这与本次研究结论与土壤理化测定结论一致, 施肥对于杉木大径材培育是必须的, 但施肥量要处于合理的水平, 才能达到应有的效果。龚益广等^[19]利用杉木混交造林技术, 开展营造杉木阔叶混交林探讨林地土壤碳、氮、磷等养分保持的杉木阔叶混交林模式, 这将为杉木大径材培育和经营提供有益的参考。

杉木大径材培育除了通常考虑的树高、胸径、单株材积和单位面积蓄积等生长量指标以外, 还有很多其他指标如干型、冠型、分枝角、节疤大小、不同品系、密度、施肥处理下个体间的分化程度、郁闭度, 等等, 都与培育杉木大径材密切相关。这些指标在幼林期的表现如何影响大径材培育的效果, 和下一步进行大径材培育需要采取的疏伐、修枝等营林措施等等因素, 限于试验条件的影响, 在本研究中均没涉及, 有待下一步深入开展。

参考文献

[1] 盛炜彤. 国外工业用材林培育的目标及技术途径[J]. 世界林业研究, 1992, 5(9): 75-83.
[2] 国家林业局森林资源管理司. 第八次全国森林资源清查主要结果(2009—2013年)[EB/OL]. [2014-02-25]. <http://www.forestry.gov.cn/main/65/content-659670.html>.

html.
[3] 施恭明, 江希钿, 洪端芳, 等. 福建省杉木人工林立木相容性生物量模型的研究[J]. 林业勘察设计, 2014(1): 1-4; 24.
[4] 郭光智, 段爱国, 张建国, 等. 南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.
[5] 盛炜彤. 杉木建筑材优化栽培模式研究[J]. 世界林业研究, 1996, 9(专集): 1-96.
[6] 相聪伟, 张建国, 段爱国, 等. 杉木人工林材种结构的立地及密度效应研究[J]. 林业科学研究, 2015, 28(5): 654-659.
[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] 蔡维就, 杨秀淦, 植毓永, 等. 陡坡山地杉木速生丰产林培育技术[J]. 现代农业科技, 2017(15): 152-154.
[9] 彭少兵, 成艳霞, 董文浩, 等. 核桃“3414”肥料效应试验及推荐施肥量的回归分析[J]. 经济林研究, 2018, 36(4): 27-32.
[10] 罗婷, 杨文忠, 张珊珊, 等. 施肥对云南蓝果树幼苗抗旱生理指标的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(2): 55-62.
[11] 江香梅, 肖复明, 叶金山, 等. 闽楠天然林与人工林生长特性研究[J]. 江西农业大学学报, 2009, 31(2): 1049-1054.
[12] 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(2): 45-50.
[13] 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.
[14] 邓厚银, 胡德活, 林军, 等. 杉木半同胞子代胸径变异和大径材家系选择[J]. 热带亚热带植物学报, 2020, 28(5): 513-519.
[15] 曾志光, 黄小春, 罗坤水, 等. 杉木大径材定向培育良种效应研究[J]. 江西林业科技, 2007(5): 4-6; 38.
[16] 叶功富, 涂育合, 林武星, 等. 杉木不同产地家系定向培育大径材的研究[J]. 福建林学院学报, 2005, 25(2): 132-137.
[17] 童书振, 张建国, 罗红艳, 等. 杉木林密度间伐试验[J]. 林业科学, 2000, 36(1): 86-89.
[18] 吴寿华, 范晓晖, 吴国灿, 等. 福建省福安市水稻“3414”肥料效应试验[J]. 湖南农业科学, 2019(8): 42-45.
[19] 龚益广, 徐明锋, 谢正生, 等. 杉木混交林的土壤生态化学计量及其林分结构影响因子研究[J]. 林业与环境科学, 2022, 38(2): 18-27.