

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230349

杉木大径材成材机理研究

李晓燕¹, 段爱国^{1,2*}, 张建国^{1,2}

(1. 林木资源高效生产全国重点实验室 国家林业和草原局林木培育重点实验室 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 阐明立地、初植密度、林龄、林分密度、竞争指标等因子与大径材成材的关系, 解析杉木大径材形成机理, 为杉木大径材定向培育提供理论和技术支撑。[方法] 利用福建省邵武市卫闽国有林场 40 余年杉木长期定位观测试验林数据材料, 解析立地、初植密度、林龄、林分密度、竞争指标等因子对杉木大径材形成的影响。[结果] 大径材出材量和出材率随立地指数级增大而增大, 且增幅效应随林龄而增强。立地对大径材成材的影响程度明显受到初植密度的作用, 低密度更有利于立地作用的发挥。12~16 指数级立地, 初植密度对大径材出材量和出材率影响较小, 且大径材出现林龄较晚; 20~22 指数级立地, 初植密度作用明显加强, 大径材出材量和出材率随初植密度减小而增大, 初植密度越小, 大径材形成时间及大径材快速增长启动林龄愈早, 且主伐林龄越小。林龄、立地、初植密度两两之间存在显著的交互作用。在相对低立地指数级范围 (12~16 指数级) 或高立地指数级范围 (20~22 指数级) 内, 大径材出材量或出材率不受立地指数级的显著影响, 而当立地指数级达到或超过 20 指数级后, 其与相对低的指数级 (12~16 指数级) 立地相比, 则会显著提高大径材出材量。在中、高初植密度范围 ($3\ 333\sim6\ 667$ 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 或 $5\ 000\sim10\ 000$ 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$) 内, 杉木林分大径材出材量或出材率不受初植密度的显著影响, 但其与低初植密度 ($1\ 667$ 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$) 林分相比, 大径材出材量或出材率则会受到初植密度的显著制约。林龄、林分保留密度、林分密度指数、立地指数为大径材成材的关键因子, 其对大径材形成的加成贡献率达 92%。[结论] 14 指数级的现实林分中, 有部分林分可形成相当数量的大径材。16 指数及以上立地是培育杉木大径材的理想立地条件, 且造林密度宜控制在 $1\ 667$ 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 内, 16 指数在 40 年生左右, 20 和 22 指数在 28 年生左右, 可形成大径材林分, 出材率达 50% 以上, 出材量至少达 $400\ \text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 左右。

关键词: 杉木; 大径材; 出材量; 立地; 初植密度

中图分类号: S750

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)06-0001-11

近年来, 随着国内木材市场的变化, 对大径级用材的需求持续增长, 在今后相当长的一段时期内, 国内对优质大径材的需求, 依然需要国际市场供给。针对日益凸显的国内木材供需矛盾问题及国家储备林建设高质量发展要求, 加大大径材林培育和保护的力度十分必要, 这有利于增加大径材产出, 增强国内木材供给能力。深入了解大径材林生长发育规律及其成材机制是解决这一问题的重要途径之

一。为此, 国内外开展了大量不同树种人工林大径材定向培育关键技术的研究。主要从遗传控制^[1-2]、立地控制^[3-5]和密度控制^[6-14]三大控制角度对大径材成材影响进行分析, 也有部分研究涉及植被控制和地力控制^[15-18], 总结出了多地区、多树种大径材培育机理及关键技术^[19-24]。但相关研究同时存在试验周期短、考虑因子较为单一、立地级未区分或数量少且多采用临时样地调查数据等缺陷, 致

收稿日期: 2023-09-07 修回日期: 2023-10-02

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“杉木用材林定向培育技术研究 (2021YFD2201301)”

* 通讯作者: 段爱国, 研究员, 主要研究方向: 人工林定向培育。E-mail: duanag@caf.ac.cn

使大径材成材机理一直未能得到可靠解释。

杉木（ *Cunninghamia lanceolate* (Lamb.) Hook.）是我国南方重要的乡土针叶用材树种，也是国储林项目建设的主要目标树种之一。中国林科院林业研究所杉木研究团队在“九五”至“十三五”连续多个国家科技支撑计划项目研究期间，以林分材种结构研究为切入点，从遗传控制、立地控制、密度控制等方面对杉木材种结构进行了大量的探索，提出了杉木大径材培育的遗传控制、立地控制、密度控制等关键技术，提出了杉木大径材定向培育技术体系，推动了杉木大径材培育进程^[25]。而由于大径材培育周期长的特点，已有研究成果具有阶段性，亟需基于更长周期定位观测获得更详实准确的杉木大径材高效培育技术途径。而国内相关研究往往仅采用短周期试验调查数据或临时样地调查数据，无法了解大径材出材量随年龄增长的动态效应，且存在调查样地没有出现大径材或虽已出现但其所占比例很少等问题，因此难以从立地、初植密度、林龄等关键控制因子角度对杉木大径材形成机理给出系统回答。本研究以杉木中心产区福建卫闽 41 年生杉木固定样地连续调查材料为依据，试图阐明立地、初植密度、林龄、林分密度、竞争指标等因子与大径材成材的关系，为杉木大径材定向高效培育及速丰林基地与国储林基地建设提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设置在福建省邵武市卫闽国有林场

（27°05′ N，117°43′ E），位于杉木分布的中亚热带东区。研究区地形以低山丘陵为主，地形复杂，海拔 300 m，坡度 25°~35°，年均气温 17.7 ℃，年降水量 1 768 mm，年蒸发量 1 283 mm，年相对湿度 82% 左右。母岩为花岗岩，土壤类型为山地红壤，土层深厚，腐殖质含量丰富。

1.2 试验设计

试验地于 1982 年春采用 1 年生实生裸根苗造林，共设置 5 种初植密度，分别为 A（1 667 株·hm⁻²，2.0 m × 3.0 m），B（3 333 株·hm⁻²，2.0 m × 1.5 m），C（5 000 株·hm⁻²，2.0 m × 1.0 m），D（6 667 株·hm⁻²，1.0 m × 1.5 m），E（10 000 株·hm⁻²，1.0 m × 1.0 m）。5 种初植密度组成一个区组，区组内各样地随机排列，每种密度重复 3 次，共 15 块样地，每个样地面积均为 600 m²（20 m × 30 m）。样地内进行每木编号，每个样地四周各设有 2 行同样密度的杉木保护带。

1.3 数据采集与分析

1.3.1 数据采集 在固定样地内，于每年年底林木停止生长后或次年春林木开始生长前进行调查。采用测高杆、胸径尺等进行林分调查，测树因子为树高、胸径等林分生长指标。在造林后前 10 a 逐年调查，10 a 后隔年调查，截至 2022 年春，连续定位观测至林龄 41 a，期间未进行间伐。在林分 20 年生时，在每个小区内选取 6 株最高木作为优势木，求算其树高的平均值作为立地指数，用于评价小区的立地质量。试验地立地指数有 12、14、16、20 及 22 m 共 5 种类型。样地基本情况见表 1。

表 1 样地基本情况
Table 1 Summary statistics of Chinese fir plantations

样地编号 Plot number	初植密度/(株·hm ⁻²) Planting density	样地数 No. of plots	林龄/a Stand age	保留密度/(株·hm ⁻²) Stand density	SDI	Gini	立地指数/m Site index
A1~A3	1 667	3	5~41	1 133~1 667	312~2 054	0.08~0.16	16.10~21.58
B1~B3	3 333	3	5~41	833~3 333	492~2 678	0.10~0.17	13.98~20.77
C1~C3	5 000	3	5~41	950~5 000	693~3 013	0.12~0.18	15.48~21.28
D1~D3	6 667	3	5~41	1 400~6 667	827~3 352	0.12~0.18	14.30~21.10
E1~E3	10 000	3	5~41	967~10 000	1 149~3 612	0.13~0.21	12.25~20.75

注：括号内数字为最小值和最大值
Note: The numbers in brackets are the minimum and maximum values

1.3.2 大径材出材量和出材率计算 基于胸径大小及材种的划分标准，根据表 2 计算不同径级的材

种株数。根据公式 1~3 计算活立木规格材（大、中、小径材）各径级各材种的出材量，根据材种类

表 2 各径级材种株数百分比表

Table 2 Percentages of different kinds of lumber trees in each diameter class

径级 Diameter class	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26					
材种别 Timber assortment	薪材	小条木	小条木	小条木	小径材	小条木	小径材	小径材	小径材	小径材	中径材	中径材	中径材	中径材	大径材	大径材
百分比/% Percentage	30	70	100	60	40	10	90	100	100	40	60	100	100	65	35	100
注：本表参考《杉木林经营数表与优化密度控制》一书 ^[26]																
Note: This table refers to the book "Study on management statistics and tables and optimal density control of <i>Cunninghamia lanceolata</i> forest" ^[26]																

型进行合并, 得到样地各材种的出材量。本研究仅使用大径材出材量和出材率数据。

$$V_t = 3.602\,437\,58 \times 10^{-5} \times D^{1.947\,520\,76} \times H^{1.007\,937\,69}$$
 (1)

$$V_l = 5.356\,338\,89 \times 10^{-3} \times D^{-0.567\,409\,453} \times H^{0.632\,966\,036}$$
 (2)

$$V_w = 2.856\,798\,44 \times 10^{-5} \times D^{1.859\,648\,98} \times H^{0.686\,898\,895}$$
 (3)

式中, V_t 活立木规格材用材出材量; V_l 活立木规格材薪材出材量; V_w 为活立木规格材废材出材量; D 径阶平均胸径; H 径阶平均树高。

1.3.3 数据分析 利用三因素方差分析法及多重比较 (LSD) 分析初植密度、立地指数、林龄及其交互作用对杉木林分大径材出材量和出材率的影响; 利用结构方程模型 (Structural Equation Modeling, SEM) 解析大径材出材量和出材率与林龄、初植密度、立地指数、林分密度、基尼系数、林分密度指数之间的关系; 为了解析这 6 个林分因

子对大径材出材量和出材率的相对贡献, 使用层次分区法 (Hierarchical Partitioning Analysis, HP) 分析, 该分析通过 R 中的 hier.part 包实现^[27]。HP 分析可用于解决多因素影响下的变量重要性排名问题, 它是通过对变量的影响因素进行层次分解, 从而确定每个因素对变量的影响程度, 进而实现因素的相对重要性排名。采用 Excel、SPSS、Origin、Amos、R 软件进行数据处理、分析和作图。

2 结果与分析

2.1 立地指数与大径材形成的关系

杉木大径材出材量和出材率受林分立地指数影响规律见图 1。同一林龄, 相同初植密度, 随着立地指数的升高, 杉木林分大径材出材量和出材率有变大的趋势。初植密度越小, 不同立地指数级间大径材出材量和出材率的差异越大。1 667~6 667 株·hm⁻² 的不同初植密度条件下, 大径材出材量均随立地指数的增加而增加, 且增幅效应随林龄而增

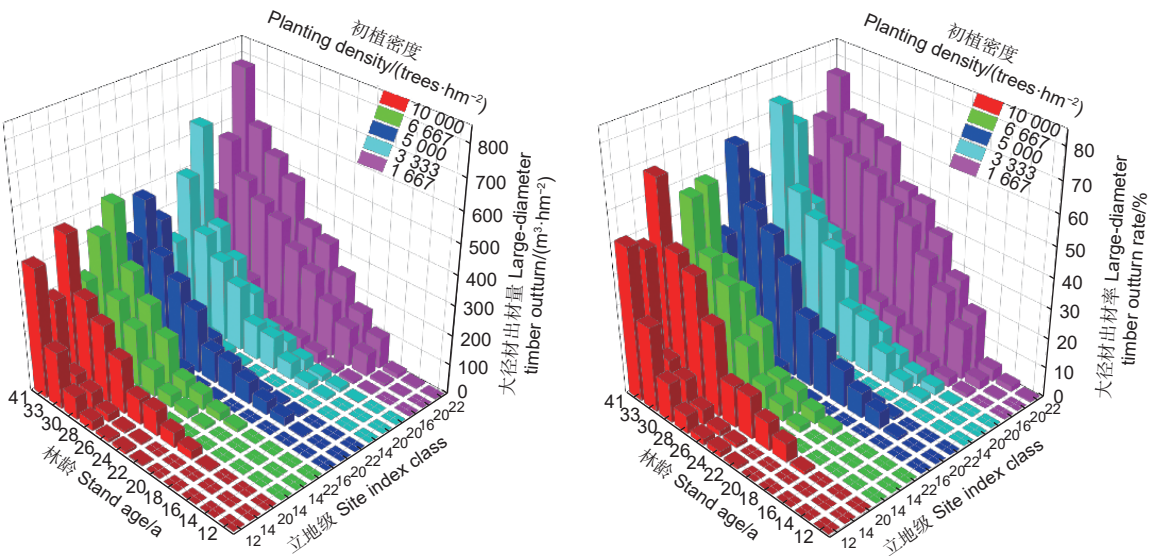


图 1 大径材出材量和出材率随林龄和立地指数级的变化

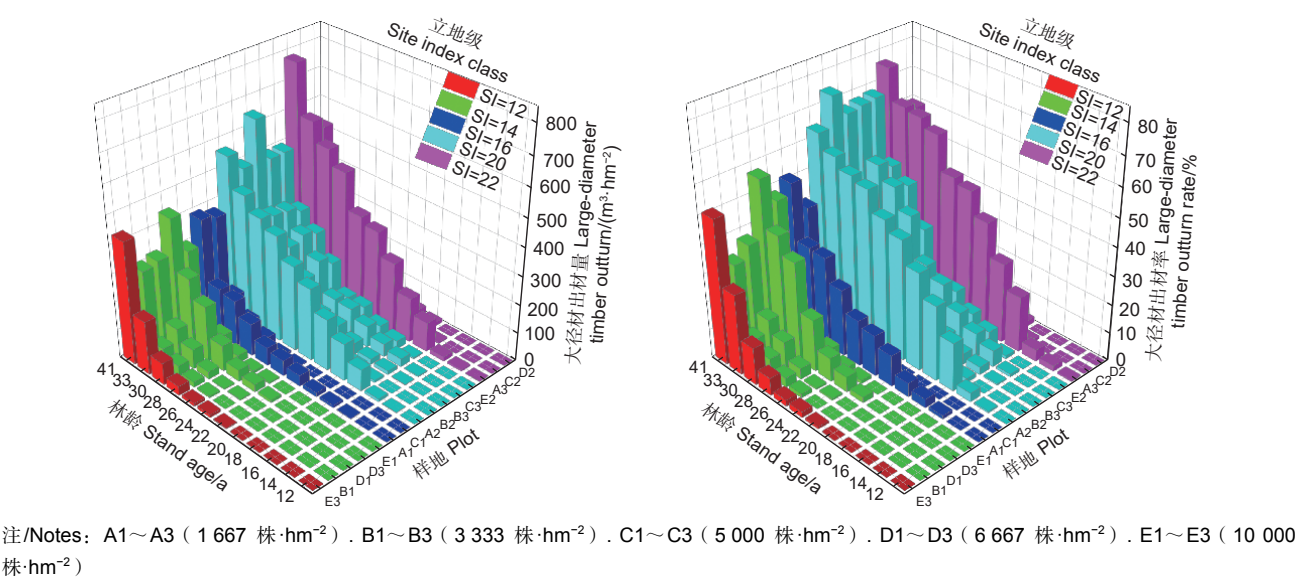
Fig. 1 Dynamic change of large-diameter timber outturn and outturn rate with stand age and site index class

强。立地对大径材成材的影响程度明显受到初植密度的作用，低密度更有利于立地作用的发挥。

2.2 初植密度与大径材形成的关系

杉木大径材密度调控过程效应如图 2 所示。14 指数级及以下样地，只有 3 种初植密度，不同密度间大径材出材量和出材率变化规律不明显，随林龄增大，6 667 株·hm⁻² 样地的大径材出材量和出材率逐渐超过其他密度样地。16 指数级及以上立地，初植密度越小，大径材出材量和出材率越大。可以发现，在 12、14、16 这 3 种相对低的立地指数级样地，初植密度对大径材出材量影响较小。相比 12、14、16 指数级，在较高的 20 和

22 指数级立地，初植密度作用变得非常显著，初植密度越小，大径材快速增长启动林龄愈小，大径材出材量越大；且立地质量越好，低密度对大径材生长的促进作用越强，高密度对大径材出材量产生严重制约作用。1 667 株·hm⁻² 样地与其他初植密度间大径材出材量和出材率差异越大，且越早进入大径材林分（大径材出材率达到 50% 以上）。由此来看，16 指数级以上立地，1 667 株·hm⁻² 更适宜培育杉木大径材，一方面，大径材出现时间早；另一方面，随林龄的增幅效应更大，更早形成大径材林分，可用同等的投入实现大径材出材量的最大化。



注/Notes: A1~A3 (1 667 株·hm⁻²) . B1~B3 (3 333 株·hm⁻²) . C1~C3 (5 000 株·hm⁻²) . D1~D3 (6 667 株·hm⁻²) . E1~E3 (10 000 株·hm⁻²)

图 2 大径材出材量和出材率随林龄和初植密度的变化

Fig. 2 Dynamic change of large-diameter timber outturn and outturn rate with stand age and initial planting density

2.3 年龄与大径材形成的关系

随林龄增大，活立木规格材大径材出材量和出材率不断增大。12 和 14 指数级立地，大径材出现林龄较晚，均于 22 年生才开始出现大径材，在这两种相对低立地时，初植密度对大径材开始出现时间影响较小。值得注意的是，14 指数，大径材出材量在 33 a 后出现迅速增加的现象，在 41 a 时，大径材出材量增加 1 倍左右，可达 400 m³·hm⁻² 左右。16 指数级及以上立地，初植密度越小，大径材形成时间越早。1 667 株·hm⁻² 林分在 16、20 和 22 指数级立地，分别于 16、14 和 12 a 开始出现大径材，成材时间缩短 6~10 a。从图 2 中可以看出，14 指数级（除 D3 样地），在最后一次

观测时，大径材出材率仍尚未达到 50%。16 指数级及以上立地，初植密度越小，主伐林龄越小。相同密度，立地指数级越大，达到大径材出材率 50% 所需的时间越短，即主伐林龄越小。

2.4 立地、初植密度和林龄交互作用对大径材成材的影响

三因素方差分析结果（表 3）表明，林龄、初植密度、立地指数级以及两两之间的交互作用对杉木林分大径材出材量和出材率均有极显著影响（ $p<0.01$ 或 $p<0.001$ ）。而三者之间的交互作用对大径材出材量和出材率没有显著影响。进一步进行多重比较（LSD），20 年生以前，不同林龄间差异不显著，20 年生之后，不同林龄间差异显著。

1 667 株·hm⁻² 林分与其他密度林分间差异显著, 3 333 株·hm⁻² 林分与 1 667 株·hm⁻² 和 10 000 株·hm⁻² 林分间差异显著, 而与其他密度间无显著差异。对于立地指数级, 20~22 指数级和 12~16 指数级之间差异显著, 而 20~22 指数级或 12~16 指数级内没有显著差异。在相同初植密度和立地指数级下, 不同林龄间差异显著。5~18 a 间, 相同指数级, 不同初植密度间差异均不显著; 20~41 a 间, 14 和 16 指数级, 不同初植

密度间差异不显著, 而 20 和 22 指数级, 不同初植密度间则存在显著差异。5~18 a 间, 相同初植密度, 不同立地级间差异均不显著; 20~22 a 间, 只有 1 667 株·hm⁻² 林分, 在不同立地级间表现出显著差异; 24~26 a 间, 只有 1 667 株·hm⁻² 和 3 333 株·hm⁻² 林分, 在不同立地级间差异显著; 28~41 a 间, 所有初植密度下, 不同立地级间均存在显著差异。

表 3 林龄、初植密度和立地指数级及三者的交互作用对杉木大径材出材量和出材率的影响

Table 3 Effects of stand age, planting density, site index class and their interaction on large-diameter timber outturn and outturn rate of Chinese fir

影响因素 Affecting factors	林龄 Stand age	初植密度 Planting density	立地指数级 Site index class	林龄 × 初植密度 Age × Density	林龄 × 立地指数级 Age × Site	初植密度 × 立地指数级 Density × Site	林龄 × 初植密度 × 立地指数级 Age × Density × Site
大径材出材量 Large-diameter timber outturn	148.786***	44.646***	49.146***	3.304***	4.698***	17.239***	1.380
大径材出材率 Large-diameter timber outturn rate	88.940***	33.634***	33.819***	2.377**	2.820**	6.602***	0.598

注: 表格中数字为F值。**p<0.01, ***p<0.001
Notes: The numbers presented in the table are F-ratio values. Asterisk denotes statistically significant differences **p<0.01, ***p<0.001

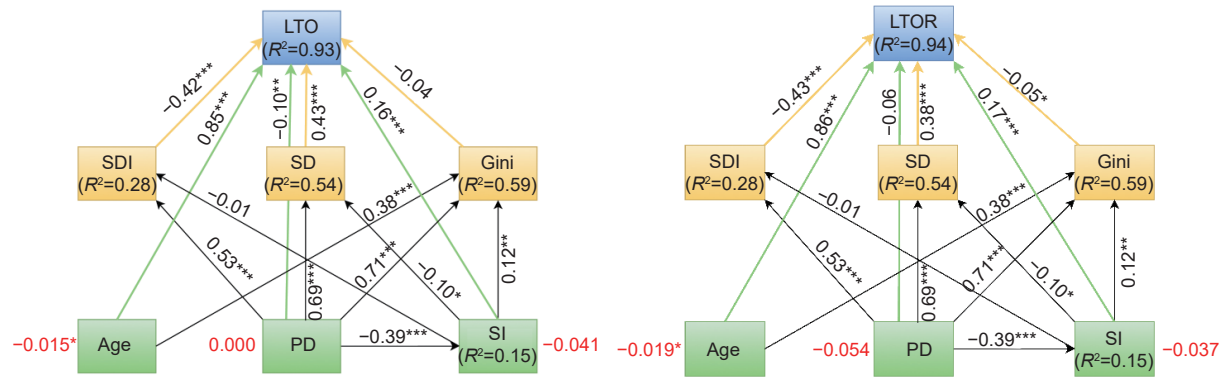
2.5 林分因子对杉木大径材成材的影响及相对贡献

2.5.1 杉木大径材多因子耦合作用分析 林分因子在调控杉木人工林材种结构生长中起着至关重要的作用, 是限制材种生长的关键性因子。杉木林分活立木大径材出材量和出材率与林分因子的结构方程模型如图 3 所示。结果表明, 林分因子通过直接作用或其他因子的间接介导, 共同驱动着杉木林分大径材出材量 (LTO) 和出材率 (LTOR) 的生长。林龄 (Age) 对 LTO 具有强烈的显著正效应, 其标准化直接路径系数为 0.85; 同时, Age 对 Gini 具有显著的正影响, 其标准化路径系数为 0.38, 其通过 Gini 的介导, 间接地影响了 LTO, 标准化间接路径系数为-0.015, 在 0.05 水平上显著。初植密度 (PD) 对 LTO 具有直接且显著的负效应, 其标准化路径系数为-0.10; 同时, PD 对林分密度指数 (SDI)、林分密度 (SD) 和 Gini 具有显著的正影响, 其标准化路径系数分别为 0.53、0.69、0.71; 此外 PD 对立地指数 (SI) 具有显著的负效应, 其标准化路径系数为-0.39; PD 通过这些中介变量对 LTO 的总间接影响为 0.000。SI 能够直接且显著地提高 LTO, 其标准化路径系数为 0.16; 此外, SI 对 SDI、SD、Gini 分别具有负效应、负效应、正效应, 且 SI 通过这

3 个变量对 LTO 的总间接影响为 -0.041, 在 0.05 水平上不显著。3 个反映林分竞争激烈程度或个体大小分化程度的指标 (SDI、SD、Gini) 均在不同程度上影响着 LTO, 其中, SDI 和 SD 对 LTO 分别具有显著的负向和正向影响, 标准化直接路径系数分别为 -0.42 和 0.43, 而 Gini 对 LTO 的直接影响在 0.05 水平上不显著。结构方程模型结果显示, 影响 LTO 变化因素的 93% 来自 Age、PD、SI、SDI、SD 和 Gini。

除 PD 外, 其他 5 个林分因子均对 LTOR 具有显著的直接效应, 其中 Age、SD 和 SI 对 LTOR 具有显著的正向、直接效应, 其标准化路径系数分别为 0.86、0.38 和 0.17; SDI 和 Gini 对 LTOR 具有显著的负向、直接效应, 其标准化路径系数分别为 -0.43 和 -0.05。Age、PD 和 SI 对 3 个中介变量的直接影响与大径材出材量的结果是一致的, Age 通过这些中间变量的介导, 显著、间接影响了 LTOR, 而 PD 和 SI 对 LTOR 的间接效应在 0.05 水平上不显著。结构方程模型结果显示, Age、PD、SI、SDI、SD 和 Gini 对 LTOR 有 94% 的解释能力。

2.5.2 林分因子对杉木林分大径材出材量和出材率的相对贡献率 根据 HP 分析, Age 对杉木大径



注：直线表示外生变量对内生变量的影响，线上数字为标准化直接路径系数。红色数字为因子对大径材出材量或大径材出材率的标准化间接路径系数。LTO：大径材出材量；LTOR：大径材出材率；SDI：林分密度指数；SD：林分密度；Gini：基尼系数；Age：林龄；PD：初植密度；SI：立地指数。 $^*p<0.05$, $^{**}p<0.01$, $^{***}p<0.001$

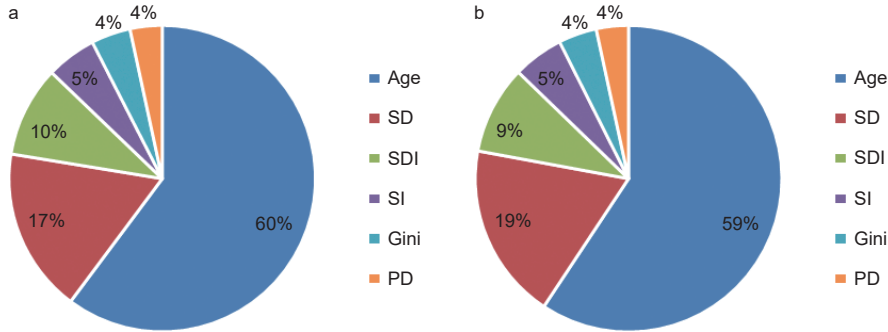
Notes: The line represents the effect of exogenous variables on endogenous variables, and the numbers on the line are standardized direct path coefficients. The numbers in red are the standardized indirect path coefficients of the factors influencing the large-diameter timber outturn and outturn rate. LTO: large-diameter timber outturn; LTOR: large-diameter timber outturn rate; SDI: stand density index; SD: stand density; Gini: Gini coefficient; Age: stand age; PD: planting density; SI: site index. $^*p<0.05$, $^{**}p<0.01$, $^{***}p<0.001$

图 3 杉木大径材出材量和大径材出材率与林分因子的路径关系模型图

Fig. 3 Path models of influences of stand factors on large-diameter timber outturn and outturn rate of Chinese fir

材出材量和出材率的相对贡献率最大，其次是 SD、SDI、SI、Gini 和 PD。Age 对杉木大径材出材量和出材率的相对贡献率分别为 60% 和 59%，

SD 的相对贡献率分别为 17% 和 19%，SDI 的相对贡献率分别为 10% 和 9%，SI 的相对贡献率为 5%，Gini 和 PD 的相对贡献率均为 4%（图 4）。



注：a：大径材出材量；b：大径材出材率。Age：林龄；SD：林分密度；SDI：林分密度指数；SI：立地指数；Gini：基尼系数；PD：初植密度

Notes: a: large-diameter timber outturn; b: large-diameter timber outturn rate. Age: stand age; SD: stand density; SDI: stand density index; SI: site index; Gini: Gini coefficient; PD: planting density

图 4 林分因子对杉木大径材出材量和大径材出材率的相对贡献率

Fig. 4 Relative contributions of stand factors to large-diameter timber outturn and outturn rate of Chinese fir

3 讨论

3.1 立地指数、初植密度、林龄对杉木大径材成材的影响

3.1.1 立地效应 加快大径材林分培育，是缓解我国木材资源结构性短缺问题的重要途径。对杉木大径材形成机制的研究认为，林分密度和立地因子是大径材成材的关键制约因素^[5,28]。惠刚盈等^[19]研究指出，立地是材种形成的主要限制因子，无论何

种保留密度，若立地指数过低，则在目的材种的培育期限内，无法产生该材种。大多数研究表明，培育杉木大径材应选择立地指数 16^[19,22] 或 18^[24] 以上的立地。本研究结果发现，立地指数对杉木大径材是否形成、形成时间及大径材出材量多少具有决定作用。低的立地指数，如 14 指数级，也可形成杉木大径材，但至少要达到 22 年生才可出现大径材，且达到大径材林分（大径材出材率大于

50%)至少要达38年生。而杨桂娟等^[9]采用江西大岗山27年生杉木人工林定位监测数据的研究结果表明14指数级及其以下立地不能培育大径材,可能与调查林分尚未达到大径材的培育年限有关。本研究中,16指数级立地,造林密度控制在1667株·hm⁻²以内,在41年生时,大径材出材率可达50%,形成大径材林分。而超出这个造林密度范围,则轮伐期需延长。20指数级及以上立地,是培育杉木大径材的最理想立地条件,且造林密度宜控制在1667株·hm⁻²,在30年生左右可进入大径材林分,出材率达50%以上,出材量至少达400 m³·hm⁻²。而超过这个造林密度范围,则培育杉木大径材轮伐期至少在35年生,且初植密度越大,轮伐期适当延长,最终也可收获350~450 m³·hm⁻²左右的大径材出材量。

3.1.2 密度效应 在立地条件一定的条件下,密度是限制大径材形成的关键因子。过高的初植密度虽能提早进入郁闭期,但也使林木之间的营养竞争提前,导致林木质量不佳;初植密度过低,林地空间不能得到充分利用,造成地力浪费,也降低了林地生产力^[22]。本研究结果发现,相比12、14、16指数级,在较高的20和22指数级立地,初植密度作用变得非常显著,初植密度越小,大径材快速增长启动林龄愈小,大径材出材量越大;且立地质量越好,低密度对大径材生长的促进作用越强,高密度对大径材出材量产生严重制约作用。因为林分密度越大,胸径生长受到抑制,中、小径材向大径材转化的速度变慢。这与王有良等^[13]的研究结果一致。熊光康等^[29]报道称19~25 a近成熟龄期,林分大径木比例和大径材出材量均随初植密度降低而增加,但其考虑的密度范围较小,属于低密度造林,未考虑中、高密度造林时的大径材生长发育规律。密度不能过大,否则小径材将占绝对优势;密度亦不能过小,否则导致单位面积的材种出材量太低,从而造成地力浪费^[3]。研究表明,降低初植密度有利于生产较大规格的原木,但最小轮伐期会限制该条件的有效性,所以要确定合理的最小轮伐期^[30]。Dobrowolska等^[31]建议宽间距(低密度)造林,同时进行有规则的间伐,以便在相对较短的轮伐期内获得最大直径,同时减少黑心的风险和频率,而黑心的发生大大降低了木材价值。因为其发现,高密度有利于前几年的白蜡树高增长;然而低密度导致更快的直径增长。造林时的初植密度

必须根据当地的立地条件及与预期的造林实践有关的成本做出选择。

密度调控是杉木大径材培育的关键环节,初植密度确定以后,林分密度的动态控制成为影响杉木大径材生长的关键因素。林分密度是通过影响林分直径结构进而影响林分材种结构的^[32],林分密度与胸径之间存在强相关性^[33],保持合理的林分密度对杉木大径材培育至关重要。研究表明,森林间伐管理是一种培育大径级树木的有效策略^[34]。间伐降低了林分密度,增加了剩余树木的资源可用性,从而促进保留木的生长^[33]。培育杉木大径材,应合理采取抚育间伐措施,控制林分密度,促进大径木生长。研究表明,较低的林分密度是培育杉木大径材的关键技术^[35]。关于如何调控林分密度以获得较高的大径材出材量和出材率,很多学者对此展开了广泛研究。叶功富等^[6]对福建卫闽和来舟两个林场的试验研究中指出,培育杉木大径材应在10 a前后调整林分密度,保留密度以1200株·hm⁻²左右较为适宜,可获得较高的大径材出材量,提高单位面积的木材产量。刘静等^[12]对福建埔上林场试验研究表明,低间伐保留密度900株·hm⁻²有利于杉木的生长和大径材的培育。宋重升等^[36]研究表明,间伐能够促使小、中径材更早进入下一径阶,在立地指数级≥22及0≤间伐强度≤35%的条件下,间伐强度越大,越适宜大径材培育。而徐金良等^[6]研究发现,间伐强度不能有效增加林分出材量,间伐次数对林分出材量有重要影响,试验区杉木大径材培育以2次间伐、总间伐强度50%左右为宜。这种差异可能与不同试验地点的立地指数、林龄等因素不同有关。有研究表明,初植密度和间伐对林木的抗风害能力有一定影响,进而影响木材产量。低初植密度林分比高初植密度林分抵御风害的能力要强,从而能够提高林分的生产力^[37]。然而,实际林分包含不同大小的树木,需要更详细的研究来更准确地评估不同初植密度或立地条件下林木对生态环境和自然灾害的响应,以便综合评估林分生产力和大径材出材量。

综上所述,立地对大径材成材的影响程度明显受到初植密度的作用,低密度更有利于立地作用的发挥,因为初植密度越低的林分对资源的利用效率越高^[38],低初植密度下的树木可以获得更多的光、水、养分等资源,从而增加树木胸径、树高和材积^[39]。20 a以后,立地指数级≥20,初植密度作用变得非常显著,高、低密度间存在显著差异。初

植密度越小,大径材形成时间及大径材快速增长启动时间越早,且主伐林龄越小。

3.2 杉木大径材成材的多因子耦合作用及相对贡献

林分因子在大径材成材过程中起着至关重要的作用,是限制当前杉木大径材生长的关键性因子。本研究结果表明,林龄(Age)、初植密度(PD)和立地指数(SI)均直接影响了杉木大径材出材量和出材率,同时通过林分密度指数(SDI)、林分密度(SD)和基尼系数(Gini)的介导,间接地影响了大径材出材量和出材率。研究结果发现,林龄对大径材出材量及其出材率的影响最大,具有显著的正向、直接效应,随林龄增长,不仅可以直接增大大径材的出材量和出材率,还可以通过调控林木个体大小分化程度来间接影响大径材的生长,且具有显著的负向、间接效应。基尼系数可用于衡量林分内树木大小不平等差异。基尼系数越接近于0,林分中活立木大小差异越小,林分结构的异质性越低;基尼系数越接近于1,林分中活立木的大小差异越大,林分结构的异质性越高^[40]。研究表明,随林龄增长,林分中活立木大小差异增大,即增加了林木的大小分化程度,从而增加了林分结构的异质性^[41]。当高密度林分中树木之间存在较大差异时,林分结构异质性增加,森林生产力降低,即森林生产力与林分结构异质性呈负相关^[42]。然而,在商业性间伐后林分结构异质性与森林生产力呈正相关。这是因为商业性间伐基本上消除了与生境资源可用性减少有关的剩余优势木生长的限制,林分保留密度与森林生产力呈显著正相关^[40]。随林木大小差异(Gini)的增大,大径材出材量和出材率均下降,主要原因是较大的林分直径结构异质性,导致林木之间的不对称竞争增大,从而树木生长受到资源可用性的限制增大。有研究指出树木的存活率随基尼系数的增加而下降,在树木大小异质性较大的样地,树木死亡率更高。较大的基尼系数表明林分竞争条件的不对称,这加速了小树的死亡^[43]。另外,林龄对大径材生长的影响主要来源于其直接影响;且HP分析结果表明,林龄对大径材出材量和出材率的相对贡献率最大,对大径材的相对重要性约占60%。而惠刚盈等^[19]认为,相同立地条件下,保留密度对材种形成的影响比林分年龄对材种形成的影响更大。本研究中,初植密度对大径材出材量和出材率具有负向、直接效应。研究表明,高初植密度,导致树木生长较慢,大直径树比例较

小。在林分郁闭后,限制了直径和树高生长,由于竞争激烈,密度较大的人工林死亡率较高。而较低的初植密度降低了初始成本,即使不间伐,大径材比例也可能会更大,从而增加盈利^[44]。Halbritter等^[45]也发现,最佳间伐计划和最终收获在很大程度上取决于初植密度。立地指数则能够显著直接增大大径材的出材量和出材率,这与大多数研究结果一致^[5,13],符合立地指数越大,大径材出材量越大的一般规律。林分内竞争程度(SDI)的增大显著直接降低了大径材的出材量和出材率。竞争是通过有限的资源和生长空间制约森林生长的主要因素,会影响树木的死亡率。林分内竞争越激烈,树木死亡率越高,可能会引起大、小径级树木不同程度的死亡^[43]。本研究结果发现,林分保留密度(SD)对大径材出材量和出材率具有较强、直接且显著的正效应,其标准化路径系数分别为0.43和0.38,是除林龄以外,对大径材相对贡献率最大的林分因子。这一结果表明,当前林分密度范围内,林分内较多的活立木保留株数可以直接地增大大径材出材量和出材率,这可能与现有林分中活立木保留株数较少有关,因为随林龄增长,现有林分的保留密度已相对较低,而林分密度太低,会因单位面积保留株数减少使大径材产量下降^[13]。

4 结论

本研究基于杉木中心产区40余年的长期调查数据资料,探究初植密度、立地指数、林龄等林分因子对杉木大径材形成的影响规律及机理,以解析大径材的形成机制,为杉木大径材培育提供理论与技术指导。研究发现,(1)林龄对大径材出材量及其出材率的影响最大,具有显著的正向、直接效应,随林龄增长,不仅可以直接增大大径材的出材量和出材率,还可以通过调控树木大小异质性来间接影响大径材的生长。相同初植密度,立地级越大,杉木大径材越早形成。相比较12、14指数级,16、20和22指数级的大径材成材时间至少可缩短6~10 a。(2)杉木林分大径材出材量和出材率随立地质量的提高而增大,且增幅效应随林龄的增长而增强。立地对大径材成材的影响程度明显受到初植密度的作用,低密度更有利于立地作用的发挥。(3)12、14、16指数级立地,大径材出现林龄较晚。在这3种相对低立地指数时,初植密度对大径材出材量和出材率影响相对较小。而在较

高的 20、22 指数级立地, 初植密度作用变得非常显著, 初植密度越小, 大径材快速增长启动林龄愈小, 大径材出材量和出材率越大; 且立地质量越好, 低密度对大径材生长的促进作用越强, 高密度对大径材出材量则产生严重制约作用。(4) 林龄、林分保留密度、林分密度指数、立地指数为大径材成材的关键因子, 它们对大径材的加成贡献率达 92%。从杉木分布区立地指数情况论, 16 指数及以上立地是培育杉木大径材的理想立地条件, 且造林密度宜控制在 1 667 株·hm⁻² 内, 16 指数在 40 年生左右, 20 和 22 指数在 28 年生左右, 可形成大径材林分, 出材率达 50% 以上, 出材量至少达 400 m³·hm⁻²。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 王素萍, 江希钿, 杨锦昌. 杉木人工林林分材种出材率变化规律的分析 [J]. 福建林学院学报, 2002, 22(2):146-149.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 叶功富, 涂育合, 林瑞荣, 等. 杉木人工林不同密度管理定向培育大径材 [J]. 北华大学学报 (自然科学版), 2005, 6(6):544-549.

[7] 涂育合, 叶功富, 林武星, 等. 杉木大径材定向培育的适宜经营密度 [J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(5):530-534.

[8] 徐金良, 毛玉明, 郑成忠, 等. 抚育间伐对杉木人工林生长及出材量的影响 [J]. 林业科学研究, 2014, 27(1):99-107.

[9] 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.

[10] 许冠军, 郑宏, 林开敏, 等. 间伐密度管理模式对杉木大径材生长的影响 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2019, 48(6):753-759.

[11] 吴东山, 贾婕, 聂海泉, 等. 马尾松中幼林的密度效应 [J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(10):19-24.

[12] 刘静, 赵铭臻, 王利艳, 等. 间伐保留密度和套种对杉木中龄林材种结构的影响 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(6):593-600.

[13] 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.

[14] 宋重升, 王有良, 张利荣, 等. 基于大径材培育下杉木人工林间伐初始期的确定 [J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(3):45-54.

[15] 费裕翀, 吴庆锥, 张筱, 等. 不同林下植被管理措施对杉木大径材培育林土壤特性与出材量的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3):626-634.

[16] 任衍敏, 陈敏健, 李惠通, 等. 配方施肥对杉木近熟林大径材材种结构的影响 [J]. 森林与环境学报, 2021, 41(1):18-25.

[17] 黄磊, 王港, 杨冰, 等. 杉木大径材成材与地形、土壤养分的关系 [J]. 福建农林大学学报 (自然科学版), 2021, 50(5):619-623.

[18] 赵铭臻, 王利艳, 刘静, 等. 间伐和施肥对杉木成熟林生长和材种结构的影响 [J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(2):338-346.

[19] 惠刚盈, 胡艳波, 罗云伍, 等. 杉木中大径材成材机理的研究 [J]. 林业科学研究, 2000, 13(2):177-181.

[20] 陈友根, 易孟生, 李荷云, 等. 杉木大径材定向培育技术中试初报 [J]. 江西林业科技, 2001(1):5-11.

[21] 姜岳忠, 秦光华, 王卫东, 等. 杨树大径级工业用材林定向培育技术 [J]. 山东林业科技, 2005(2):30-32.

[22] 黄小春, 罗坤水, 曾志光. 江西杉木大径材培育关键技术 [J]. 江西林业科技, 2008(5):16-17.

[23] 徐清乾, 黄帆, 张颢, 等. 雪峰山区杉木大径材培育立地及密度控制研究 [J]. 湖南林业科技, 2020, 47(3):32-38.

[24] 晏姝, 王润辉, 邓厚银, 等. 南岭山区杉木大径材成材影响因子研究 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2):80-89.

[25] 张建国, 段爱国. 杉木大径材定向培育技术体系 [J]. 科技成果管理与研究, 2017(11):63.

[26] 童书振, 刘景芳. 杉木林经营数表与优化密度控制 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.

[27] MAC NALLY R, WALSH C J. Hierarchical partitioning public-domain software [J]. Biodiversity and Conservation, 2004, 13: 659-660.

[28] LI X Y, DUAN A G, ZHANG J G. Long-term effects of planting density and site quality on timber assortment structure based on a 41-year plantation trial of Chinese fir [J]. Trees, Forests and People, 2023, 12: 100396.

[29] 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.

[30] DAI J, WELHAM C, CAO L, et al. Sustainable production in subtropical hybrid poplar plantations [J]. Journal of Tropical Forest Science, 2016, 28(2): 190-204.

[31] DOBROWOLSKA D, HEIN S, OOSTERBAAN A, et al. A review of European ash (*Fraxinus excelsior* L.): implications for silviculture [J]. Forestry, 2011, 84(2): 133-148.

[32] WANG M L, RENNOLLS K. Tree diameter distribution modelling: introducing the logit-logistic distribution [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(6): 1305-1313.

[33] WEGIEL A, BEMBENEK M, ŁACKA A, et al. Relationship between stand density and value of timber assortments: a case study for Scots pine stands in north-western Poland [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 2018, 48(1): 361.

[34] WU C P, JIANG B, YUAN W G, et al. On the Management of

Large-Diameter Trees in China's Forests[J]. Forests, 2020, 11(1): 111.

[35] 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.

[36] 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.

[37] TORITA H, MASAKA K. Influence of planting density and thinning on timber productivity and resistance to wind damage in Japanese larch (*Larix kaempferi*) forests[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 268: 110298.

[38] LIU L, SUN K, LIU Q, *et al.* Optimum rotation age of Chinese fir (*Cunninghamia Lanceolate*) plantations under faustmann and maximum sustainable yield criteria[J]. Journal of Tropical Forest Science, 2022, 34(3): 305-315.

[39] SANG Y R, GAO P, KANG X Y, *et al.* Effect of initial planting density on growth traits and wood properties of triploid Chinese white poplar (*Populus tometosa*) plantation[J]. Forests, 2021, 12(12): 1676.

[40] SUN K, SUN H G, LU G B, *et al.* Study on the effects of stand density management of Chinese fir plantation in Northern China[J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1130299.

[41] 杨桂娟, 胡海帆, 孙洪刚, 等. 林分年龄、造林密度和林分自然稀疏对杉木人工林个体大小分化和生产力关系的影响 [J]. 林业科学, 2019, 55(11):126-136.

[42] DUDUMAN G. A forest management planning tool to create highly diverse uneven-aged stands[J]. Forestry: An International Journal of Forest Research, 2011, 84(3): 301-314.

[43] ZHANG X Q, WANG Z, CHHIN S, *et al.* Relative contributions of competition, stand structure, age, and climate factors to tree mortality of Chinese fir plantations: Long-term spacing trials in southern China[J]. Forest Ecology and Management, 2020, 465: 118103.

[44] LI Z C, XIAO J, LU G, *et al.* Productivity and profitability of *Larix principis-rupprechtii* and *Pinus tabulaeformis* plantation forests in Northeast China[J]. Forest Policy and Economics, 2020, 121: 102314.

[45] HALBRITTER A, DEEGEN P. A combined economic analysis of optimal planting density, thinning and rotation for an even-aged forest stand[J]. Forest Policy and Economics, 2015, 51: 38-46.

Formation Mechanism of Large-diameter Timber of Chinese Fir

LI Xiao-yan¹, DUAN Ai-guo^{1,2}, ZHANG Jian-guo^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Efficient Production of Forest Resources, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of National Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. The Southern National Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] This study clarify the relationships between factors including site, initial planting density, stand age, stand density, competition index and large-diameter timber and analyze the formation mechanism of large-diameter timber of Chinese fir in order to provide a theoretical and technical support for the oriented cultivation of large-diameter timber in Chinese fir. [Method] Using the data from the long-term experiment of Weimin state-owned forest farm in Shaowu, Fujian province over 40 years, the effects of site, initial planting density, stand age, stand density, and competition index on the formation of large-diameter timber of Chinese fir were examined. [Result] The outturn and outturn rate of large-diameter timber increased with the increase in the site class. The initial planting density clearly affected the effects of the site on the outturn of large-diameter timber, and low planting density were more favorable to the site effect. The initial planting density had a minimal impact on the outturn and outturn rate of large-diameter timber at site classes of 12 to 16, and the formation age of large-diameter timber was late. The large-diameter timber in the stands of 20~22 site classes was much more affected by initial planting density, and the outturn and outturn rate of large-diameter timber increased with the decrease in initial planting density. Low planting densities led to earlier time of producing large-diameter timber. There was a significant interaction among the stand age, site index and initial planting density. The outturn and outturn rate of large-diameter timber was not significantly affected by site class in the relatively low site index (12~16) or high site index (20~22), but when site index reached or exceeded the 20 site class, the large-diameter timber outturn would be significantly increased compared with low site classes (12~16). Large-diameter timber was not significantly affected by initial planting density in the ranges (3 333~6 667 trees·hm⁻² or 5 000~10 000 trees·hm⁻²). However, initial planting density significantly reduced the outturn and outturn rate of large-diameter timber when compared with the low initial planting density (1 667 trees·hm⁻²). The key factors affecting large-diameter timber were stand age, stand density, stand density index, and site index, and their combined addition contribution rate was 92%. [Conclusion] Some stands in the site class of 14 maybe produce large-diameter timber. The ideal site condition for producing large-diameter timber was more than the site index 16. Planting density should be smaller than 1 667 trees·hm⁻², and the large-diameter timber stand can be formed in about 40 years for site class of 16 and 28 years for site classes of 20~22, with an outturn rate of more than 50% and timber outturn of at least 400 m³·hm⁻².

Keywords: Chinese fir; large-diameter timber; timber outturn; site; initial planting density

(责任编辑：崔 贝)