

立地及密度对杉木林分生长及材种结构的影响

陈琴^{1,2,3} 董利军⁴ 黄开勇^{1,2,3*} 段爱国⁵ 戴俊^{1,2,3} 胡建军⁴ 余代渊⁴ 林丽⁴

(1. 广西壮族自治区林业科学研究院, 广西 南宁 530002; 2. 中南速生材繁育国家林业和草原局重点实验室, 广西 南宁 530002; 3. 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西 南宁 530002; 4. 融水苗族自治县国营贝江河林场, 广西 融水 5453003; 5. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京, 100091)

摘要:【目的】明确广西融江河流域杉木人工林的立地及密度对林分生长量及材种结构的影响。【方法】以广西融江河流域不同立地条件下的杉木良种林分为研究对象, 造林后分别于第 5 年和第 10 年对林分进行间伐抚育, 第二次间伐后的林分保留密度分别为 1 005、1 380、1 755 和 2 025 株·hm⁻², 于 13 年生时对林分进行生长量调查和统计分析。【结果】立地质量越好, 林分树高、胸径、蓄积量、中径材出材率以及规格材(原条)、薪材和废材出材量越高, 且当立地指数级越高时, 立地指数提升一级所带来的树高和中径材出材率增幅越大; 在该林龄阶段, 较高立地指数(20 和 22)的林分开始出现大径材, 说明立地质量越好, 大径材形成的时间越早。随林分密度的减小, 14 径阶林木株数占比减少, 18 和 ≥20 径阶的林木株数占比增加, 小径材出材率减少, 中径材出材率增加, 林分密度降低有利于中、高径阶林木的产出; 林分密度的减小极显著降低了林分蓄积量, 但规格材(原条)出材量却呈递增趋势。【结论】立地质量越好, 大径材形成的时间越早, 高规格材的产出越高, 林分密度降低促进规格材产出, 提高林分单位面积经济效益。

关键词: 人工林; 杉木; 出材量; 立地指数; 密度

Effects of Site Quality and Stand Density on Growth and Timber Grade Structure of Chinese fir forest

Abstract: 【Objective】The aim of this study was to investigate the effect of site and density of Chinese fir plantation on stand growth and species structure in Rongjiang River basin of Guangxi. 【Method】The Chinese fir plantations under different site conditions in the Rongjiang River valley of Guangxi were thinned twice at 5 years of age and 10 years of age, and the stand densities after the second thinning were 1 005, 1380, 1755 and 2 025 trees·hm⁻², respectively. The growth of stands were investigated and statistically analyzed at 13 years of age. 【Result】The results showed that the stands with better site quality obtained higher stand height, DBH, stand volume, medium-diameter timber yield, as well as dimension timber (original trunk), fuelwood and waste timber yield. When the site index level is higher, the increase of tree height and medium diameter timber yield will be greater. In this age stage, the stands with higher site index (20 and 22) began to show large diameter wood, indicating that the better the site quality, the earlier the formation of large diameter wood. With the decrease of stand density,

基金项目: “十四五”国家重点研发计划子课题“广西杉木人工林生长优化控制技术研究”(项目编号 2021YFD2201301-3)

作者简介: 陈琴(1986-), 女, 硕士, 高级工程师。从事林木育种与森林培育研究。Email: jingqin_168@163.com

*通讯作者: 黄开勇(1973-), 男, 博士, 研究员。从事林木育种与森林培育研究。Email: huangkay73@163.com

the proportion of 14 diameter trees decreased, the proportion of 18 and ≥ 20 diameter trees increased, the output rate of small-diameter timber decreased, the output rate of medium -diameter timber increased, and the decrease of stand density was beneficial to the yield of middle and high diameter trees. The decrease of stand density significantly reduced the stand volume, but the output of dimension timber (original trunk) showed an increasing trend. 【Conclusion】 The better the quality of the site, the earlier the formation time of large-diameter material, the higher the output of high-specification material. The decrease of stand density was beneficial to dimension timber (original trunk) output and increased the economic benefit per unit area.

Key words: artificial forest; Chinese fir; output; site index; stand density

立地质量和林分密度是影响特定树种和林型木材生产潜力的重要因素,通过立地选择和密度调控来获得更高更稳定的林分生长量和高规格材出材量是森林经营的一项关键技术(张建国等,2007;邵方丽等,2012;郭光智等,2019;郭云伟等,2022)。杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国重要的商品林造林树种,在我国南方广发种植(陈琴等,2017)。目前,许多学者已在我国不同杉木适生区开展了针对杉木人工林立地及密度效应的研究,重点集中在林分生长量、材种结构、物种多样性、土壤肥力等的立地和密度效应研究(张鹏,2015;许冠军等,2019;郑鸣鸣等,2020;段爱国等,2004;叶功富,2005;涂育合等,2005;赵铭臻等,2023;王有良等,2022;赵铭臻等,2022;刘玉宝等,2005;徐雪蕾等,2019;汪星星等,2023)。相聪伟等(2015)对30年生杉木人工林进行连续观测研究发现,立地质量对林分各材种及各材种出材率出现的时间有显著影响,相同密度下,立地越好,二者出现的时间越早;当立地指数相同时,随初植密度增加小径材出材率的峰值及峰度均减小;当蓄积量相近但初植密度不同时,初植密度越小大径材出材率越高,小径材出材率越低。王有良等(2022)研究发现林木单株材积随林分密度的增加而减小,蓄积量随林分密度增加先增加后减小;大径材出材量随立地指数增加而增加,随林分密度增大先增加后减小,大径材出材率随立地指数增加而增加,随林分密度增大而减小。赵铭臻等(2023)研究了施肥和林分密度对杉木林分生长及材种结构的影响,结果表明相对于施肥处理,密度控制对杉木中龄林生长量和材种结构影响更显著。刘玉宝(2005)对不同密度的杉木人工林林下植被多样性进行研究,发现密度对乔木和灌木层生物多样性有显著影响。汪星星等(2023)对3种不同密度的林分土壤氮、磷、钾质量分数及其生态化学计量特征进行研究,发现林分密度对土壤含水量和全磷质量分数的影响大于其他指标。

过去的研究证实立地和密度是影响杉木人工林生长及材种结构的重要因子,但对于不同分布区域及不同林龄阶段的影响程度不同。广西是杉木的中心产区,杉木在广西北部地区分布较广,尤其是融江河流域,其环境和气候非常适宜杉木生长,在该区域种植有大面积杉木人工林。融江河流域是广西典型的小气候区域,对该小气候区域的杉木人工林栽培技术进行深入研究,有利于合理利用该区域的优越气候条件,培育高质量杉木人工林。鉴于此,本研究基于广西柳州市融水县贝江河林场13年生杉木大径材培育试验林的观测数据,探讨立地质量和林分密度对林分生长量及材种结构的影响,为建立融江流域杉木人工林高效栽培技术体系提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于融水苗族自治县国营贝江河林场,位于柳州市融水县境内(108°35'00"~109°28'47" E, 24°49'02"~25°44'00" N),属中亚热带季风气候;全年气候温和,年均气温19.3℃,山区18.4℃,极端最低温-3℃,极端最高温38.6℃;雨量充沛,年均降雨量1824.8mm,年均蒸发量1561.2mm,降雨多集中在4~8月,约占72.7%;年平均日照1379.7h,无霜期320d以上;海拔150~630m,以低山地貌为主,成土母岩砂岩、砂页岩为主,土壤以红壤、山地黄壤为主,土层厚度为60~80cm,土层深厚,疏松,自然肥力较高。

1.2 样地设置及数据调查

试验林于 2008 年春季造林, 苗木为 1 a 生杉木良种裸根苗, 平均苗高 35.26 cm, 平均地径 0.58 cm。初植密度为 3 210 株·hm⁻², 造林后连续除草及施肥抚育 3 年, 每年施肥 1 次, 每次施用复合肥(N:P:K=15:15:15) 100 g/株。2012 年进行第一次间伐, 间伐强度为 10%; 2017 年进行第二次间伐, 间伐后保留密度为 1 005(SD1)、1 380 (SD2)、1 755 (SD3)和 2 025 (SD4) 株·hm⁻²。2020 年 10 月, 在不同保留密度的林分中, 按上、中、下不同破位以及不同坡向设置调查样地, 样地面积为 20×20 m, 共设置样地 53 块, 对样地进行每木检测, 测定林木树高和胸径。根据样地中 5 株优势木平均树高和地位指数表推算样地地位指数(SI), 样地基本信息见表 1。

表 1 杉木林分样地基本信息

Table 1 Basis information of Chinese fir plantation for sample plots

样地	立地指数	树高	胸径	样地	立地指数	树高	胸径
Plots	Site index	Tree height /m	DBH /cm	Plots	Site index	Tree height /m	DBH /cm
SD1-1	16	11.67	16.30	SD2-13	22	15.26	17.77
SD1-2	16	11.76	16.48	SD3-1	16	11.72	15.23
SD1-3	18	12.22	16.53	SD3-2	16	11.63	15.38
SD1-4	18	12.49	16.65	SD3-3	18	11.83	16.02
SD1-5	20	13.26	18.30	SD3-4	18	12.32	15.78
SD1-6	20	13.95	17.55	SD3-5	18	12.55	16.49
SD1-7	20	13.39	17.35	SD3-6	20	13.60	16.55
SD1-8	20	13.15	16.54	SD3-7	20	13.87	17.08
SD1-9	20	13.57	18.18	SD3-8	20	13.82	16.80
SD1-10	20	14.23	17.74	SD3-9	20	13.09	17.07
SD1-11	20	13.69	17.59	SD3-10	20	13.07	15.90
SD1-12	20	13.01	16.47	SD3-11	20	13.80	17.31
SD1-13	20	13.45	17.54	SD3-12	20	14.43	17.39
SD1-14	22	15.36	18.18	SD3-13	20	13.16	15.34
SD1-15	22	15.45	18.44	SD4-1	16	11.42	15.07
SD2-1	16	11.38	15.41	SD4-2	16	11.48	15.27
SD2-2	16	11.04	15.34	SD4-3	20	13.49	17.18
SD2-3	18	12.49	16.14	SD4-4	20	13.90	16.01
SD2-4	18	12.88	17.21	SD4-5	20	13.75	16.49
SD2-5	20	13.60	15.99	SD4-6	20	13.43	17.67

SD2-6	20	13.50	15.41	SD4-7	20	12.86	15.83
SD2-7	20	13.48	16.03	SD4-8	20	14.05	16.95
SD2-8	20	13.32	16.63	SD4-9	20	13.55	16.28
SD2-9	20	13.58	17.86	SD4-10	20	13.03	16.53
SD2-10	20	13.48	15.40	SD4-11	20	12.56	15.84
SD2-11	20	13.20	16.52	SD4-12	20	12.71	15.02
SD2-12	22	15.30	17.76				

1.3 参数计算

1.3.1 单株材积

立木单株材积按照公式(1)计算:

$$v_i = 0.000\ 058\ 7770\ 42 \times D_i^{1.969\ 9831} \times H_i^{0.896\ 46157}$$

(1)

式中: v_i 表示第 i 株杉木单株材积, m^3 ; D_i 表示第 i 株杉木胸径, cm ; H_i 表示第 i 株杉木树高, m 。

1.3.2 各材种出材量计算

规格材各材种出材量按公式(2)~(4)计算 (邵方丽等, 2012):

$$v_{\text{规(原条)}} = 3.602\ 437\ 58 \times 10^{-5} \times D^{1.947\ 520\ 76} \times H^{1.007\ 937\ 69}$$

(2)

式中: $v_{\text{规(原条)}}$ 表示规格材原条出材量, m^3 ; D 表示径阶平均胸径, cm ; H 表示径阶平均树高, m 。

$$v_{\text{规(薪材)}} = 5.356\ 338\ 89 \times 10^{-3} \times D^{-0.567\ 409\ 453} \times H^{0.632\ 966\ 036}$$

(3)

式中: $v_{\text{规(薪材)}}$ 表示规格材薪材出材量, m^3 ; D 表示径阶平均胸径, cm ; H 表示径阶平均树高, m 。

$$v_{\text{规(废材)}} = 2.856\ 798\ 44 \times 10^{-5} \times D^{1.859\ 648\ 98} \times H^{0.686\ 898\ 895}$$

(4)

式中: $v_{\text{规(废材)}}$ 表示规格材废材出材量, m^3 ; D 表示径阶平均胸径, cm ; H 表示径阶平均树高, m 。

1.4 数据处理

数据通过 Microsoft Excel 2010 和 SPSS20.0 进行整理和分析, 采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan 新复极差法比较不同数据组间的差异 ($p < 0.05$), 利用 Origin2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 林分生长量的立地及密度效应

由图 1 可知,立地质量对林分树高、胸径和蓄积量均有极显著影响($P<0.01$)。在立地指数 16、18、20 和 22 的样地内,林分树高分别为 11.51、12.40、13.47 和 15.34 m,树高随立地指数增加而极显著增加,同时立地指数级越高时,立地指数提升一级所带来的树高增幅越大。在立地指数 18、20 和 22 的样地内,林分胸径分别为 16.45、16.70 和 18.04 cm,均极显著高于立地指数 16 的林分胸径(15.56 cm),立地指数 18 和 20 之间无显著差异,当立地指数提升至 22 时,其林分胸径极显著高于立地指数 ≤ 20 的三种处理。立地指数 16 和 18 的林分蓄积量分别为 184.28 和 197.70 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,二者之间无显著差异,但均极显著低于立地指数 20 和 22 的林分蓄积量(246.94 和 248.30 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$),立地指数 20 和 22 之间也无显著差异。

林分密度对胸径和蓄积量有极显著影响($P<0.01$),对树高无显著影响($P>0.05$)。多重比较结果表明(图 1),林分密度在 1 380 (SD1)~2 025 (SD4) 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间变动时,林分胸径未发生显著性变化,当间伐强度增加,林分密度降低至 1 005(SD1) 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 时,林分胸径极显著增加;在 1 005 (SD1)、1 380 (SD2)、1 755 (SD3)和 2 025 (SD4) 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 的样地内,林分蓄积量分别为 168.11、215.40、244.52 和 273.47 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$,林分密度每提升一级,林分蓄积量均极显著增加。

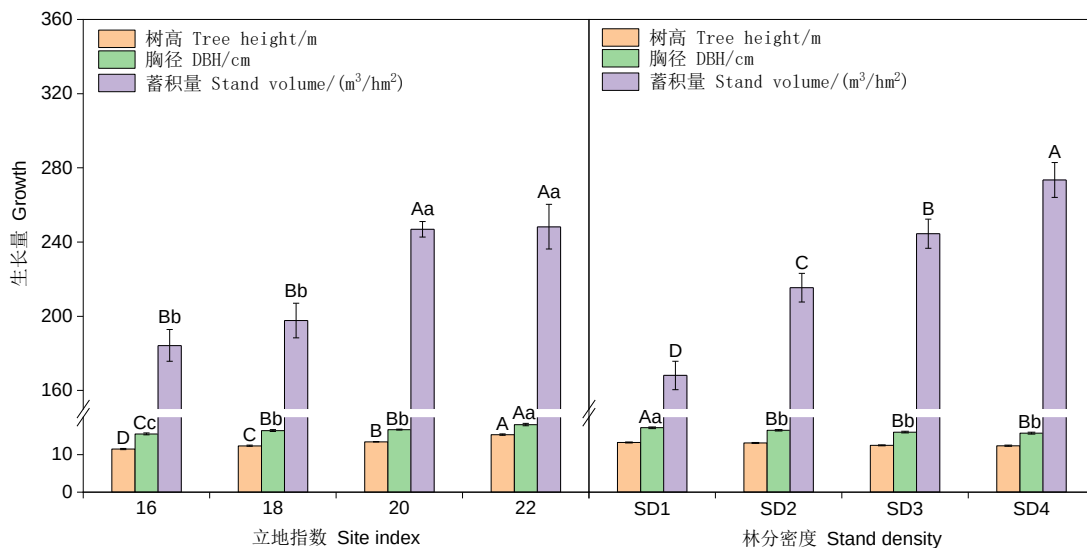


图 1 立地和密度对林分树高、胸径和蓄积量的影响

Fig.1 Effects of site quality and stand density on tree height, DBH and stand volume

2.2 林分径级结构的立地及密度效应

图 2 所示,在不同立地质量及密度的林分中,林木均集中分布于 14、16 和 18 三个径阶内,其次为 12 和 20 径阶,极少数林木分布于 10 和 ≥ 22 径阶。

立地质量对径阶分布有较大影响,在立地指数 16~20 之间,较高径阶林木株数占比随立地指数增加而增加,即分布于 ≥ 16 径阶的林木株数占比为: $\text{SI}=16$ (57.87%) $<\text{SI}=18$ (64.81%) $<\text{SI}=20$ (70.76%); 分布于 ≥ 18 径阶的林木株数占比为: $\text{SI}=16$ (32.01%) $<\text{SI}=18$ (33.94%) $<\text{SI}=20$ (40.13%)。

图 3 显示,随林分密度的增加,14 和 16 径阶林木株数占比呈递增趋势,18 和 ≥ 20 径阶的林木株数占比呈下降趋势。14 径阶林木株数占比-林分密度的回归拟合曲线 R^2 值为 0.999 99,拟合度极高,说明林分密度的变化对该径阶林木株数占比产生规律性的影响;18 径阶林木株数占-林分密度回归拟合曲线 R^2 值为 0.865 95, ≥ 20 径阶林木株数占-林分密度回归拟合曲线 R^2 值为 0.991 23,两种回归曲线拟合效果均较好,说明林分密度的调整显著影响中、高径阶林木的产出,在林分生长过程中,对林分密度进行控制可有效调整林木径级结构,促进中、高径阶林木产出。

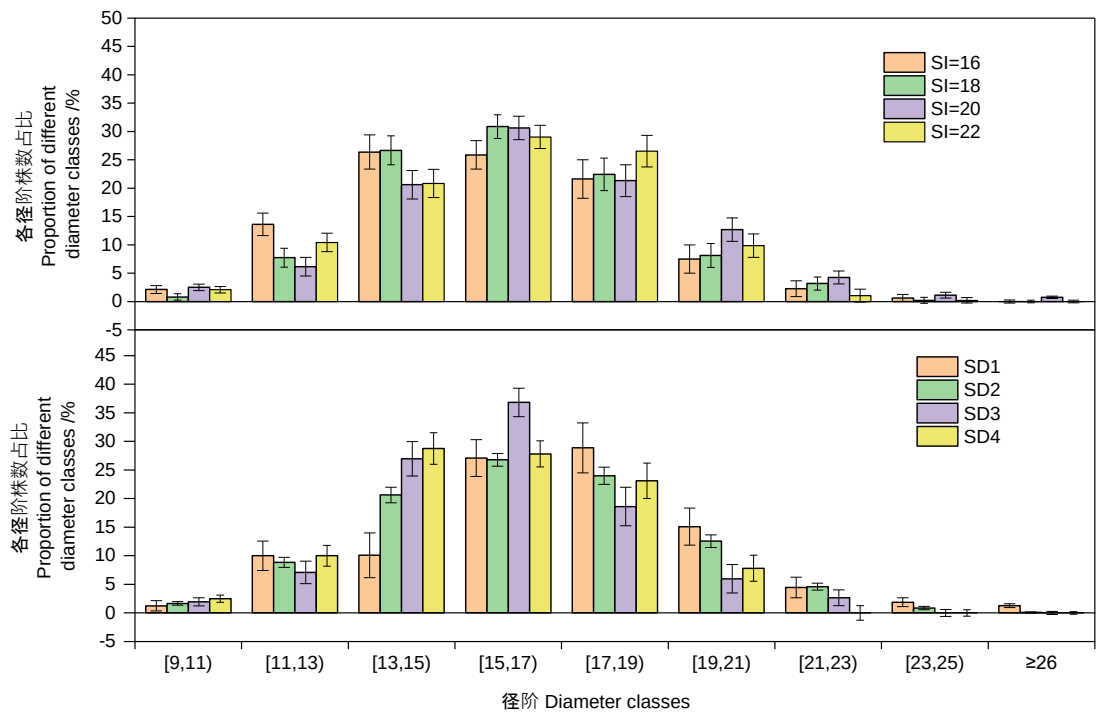


图 2 不同立地和密度的林分各径阶株数占比

Fig.2 The proportion of Chinese fir trees of different diameter classes under different site index es and different stand densities

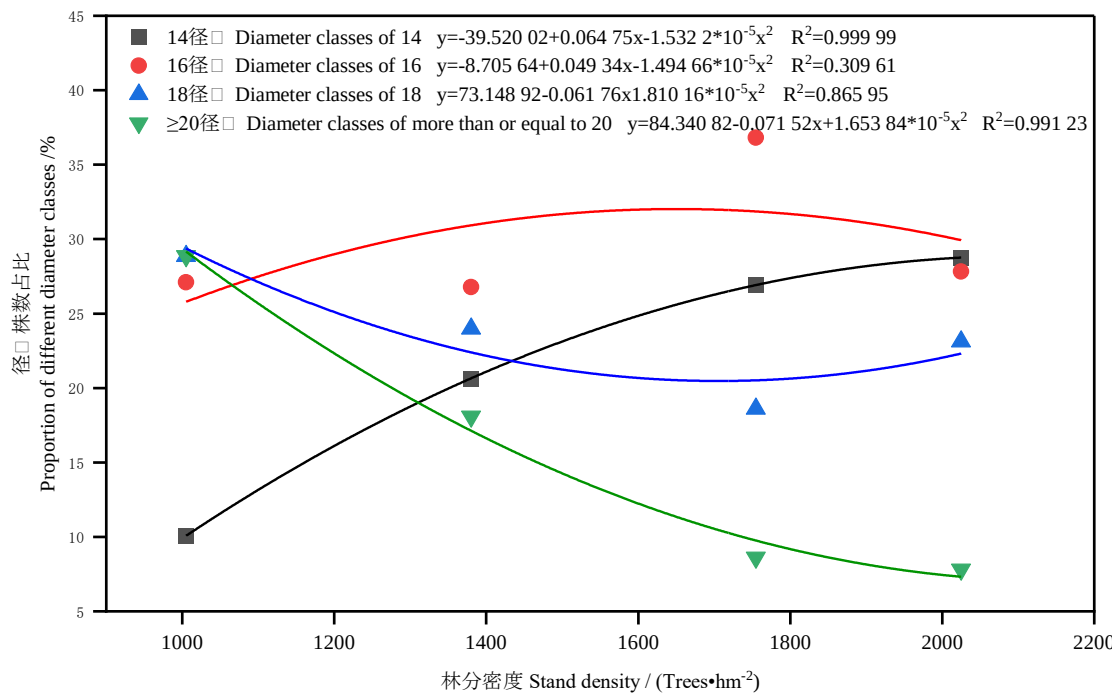


图 3 杉木林分各径阶株数占比随林分密度的变化

Fig. 3 The changes of the proportion of different diameter classes of Chinese fir with stand density

2.3 林分材种结构的立地及密度效应

由图 4 所示，立地指数对小径材、中径材和大径材出材率均有极显著影响($P < 0.01$)。在立地指数 16、18、20 和 22 的样地内，小径材出材率分别为 50.74%、46.69%、39.50%和 25.51%，随立地指数的增加而

较小；中径材出材率分别为 13.30%、17.39%、25.74%和 41.40%，随立地指数的增加而增加，且当立地指数级越高时，立地指数提升一级所带来的中径材出材率增幅越大；大径材出材率分别为 0.00%、0.00%、0.61%和 1.67%，随着立地指数增加，较高立地指数的林分在该林龄阶段开始出现大径材。

林分密度对小径材出材率有极显著影响($P<0.01$)，多重比较结果表明，林分密度为 2 025 株·hm⁻² 的小径材出材率极显著高于其他三种处理；林分密度对中径材和大径材出材率的影响不显著($P>0.05$)。图 5 表明，在 1 005 (SD1)、1 380 (SD2)、1 755 (SD3) 和 2 025 (SD4) 株·hm⁻² 的样地内，小径材出材率分别为 35.31%、42.14%、48.02%和 49.11%，小径材出材率-林分密度回归拟合曲线的 R² 值为 0.994 95；中径材出材率分别为 27.88%、23.94%、17.44%和 15.76%，中径材出材率-林分密度回归拟合曲线的 R² 值为 0.979 54，说明小径材出材率和中径材出材率均随林分密度的变化而发生规律性变化。

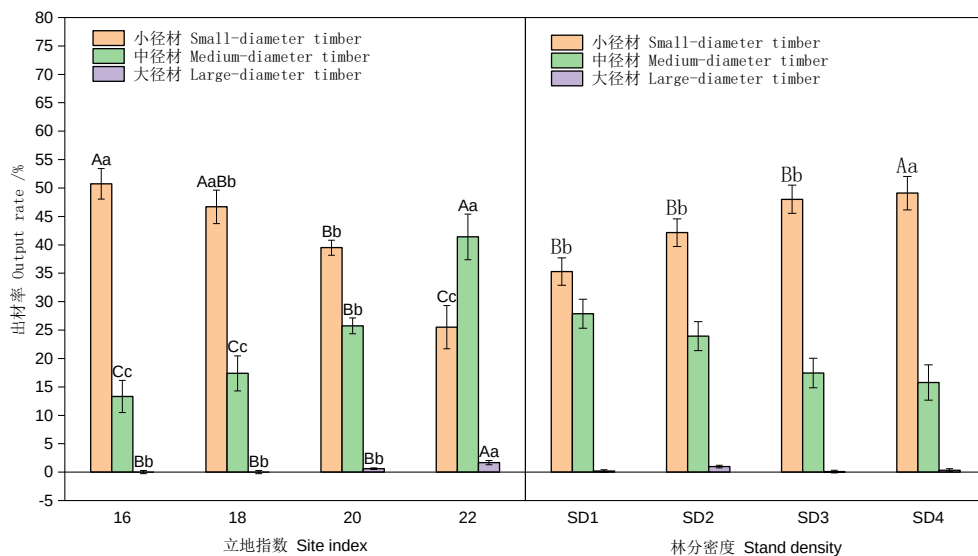


图 4 立地和密度对各材种出材率的影响

Fig.4 Effects of site quality and stand density on the output rates of timber species

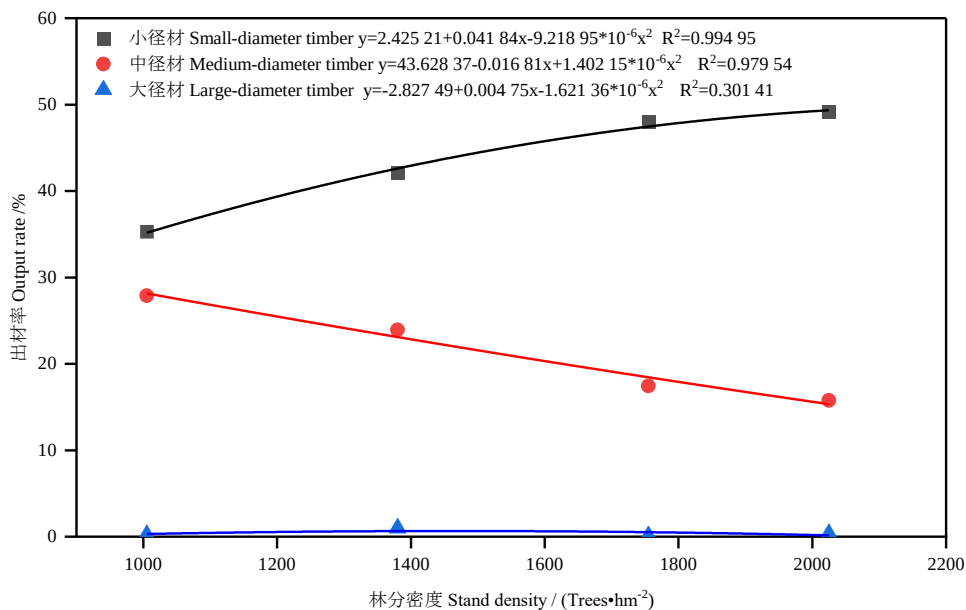


图 5 杉木各材种出材率随林分密度的变化

Fig. 5 The changes of output rate of timber species of Chinese fir with stand density

2.4 林分规格材出材量的立地及密度效应

图 6 显示, 在立地指数 16、18、20 和 22 的样地内, 规格材出材量分别为 60.69、73.00、82.45 和 107.67 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 薪材出材量分别为 3.49、3.61、3.76 和 3.91 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 废材出材量分别为 17.13、20.03、21.94 和 27.41 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 。立地指数对规格材_(原条)、薪材和废材出材量均有极显著影响($P<0.01$), 规格材和废材出材量均随立地指数增加而极显著增加。

林分密度对规格材_(原条)、薪材和废材出材量的影响未达统计上的显著性水平 (图 6), 但从数值上看, 在 1 005 (SD1)、1 380 (SD2)、1 755 (SD3) 和 2 025 (SD4) 株 $\cdot\text{hm}^{-2}$ 的样地内, 林分规格材_(原条)出材量分别为 85.49、79.10、70.58、和 68.40 $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$, 规格材(原条)出材量随密度的增加而减小, 这说明在该林龄阶段, 林分密度对规格材_(原条)出材量的影响已初步显现, 林分密度过大不利于规格材_(原条)产出。

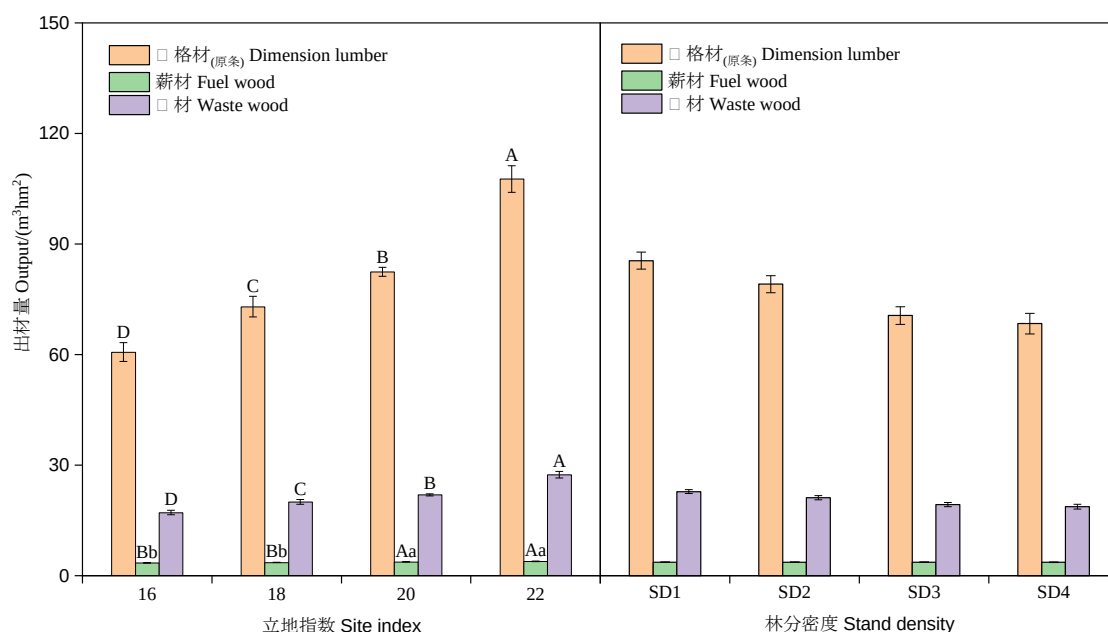


图 6 立地和密度对规格材、薪材和废材出材的影响

Fig.6 Effects of site quality and stand density on the output of dimension lumber, fuelwood and waste wood of Chinese fir under different site indexes and different stand densities

3 讨论

大多数研究表明, 立地质量对林分生长量和树种结构有显著的影响, 在不同的林龄阶段所表现出的影响效果不同 (相聪伟等, 2015; 王有良等, 2022; 徐金良等, 2014)。从本研究的杉木中龄林来看, 立地质量对林分生长量和树种结构均有显著的影响, 树高、胸径和蓄积量均随立地指数增加而增加, 小径材出材率均随立地指数增加而减小, 中径材和大径材出材率随立地指数增加而增加, 其中小径材出材率随立地指数的变化趋势与王有良 (2022) 的研究结果一致, 但中径材出材率变化趋势与其相反, 这与参试林分的林龄有关, 对于本研究的 13 年生中龄林而言, 小径材和中径材是林分树种结构的主体, 随着立地指数的增加, 小径材的减小促进了中径材的增加, 而对于王有良 (2022) 所研究的 29 年生的成熟林而言, 中径材和大径材是林分树种结构的主体, 大径材的增加必然导致中径材的减少。

本研究中, 较高立地指数的林分在该林龄阶段 (13 年生) 开始出现大径材, 说明立地质量影响林分大径材形成的时间, 立地质量越好, 大径材出现的时间越早, 这与相聪伟等 (2015) 的部分研究内容一致。

密度控制是调整林分结构, 提升林地生产力的重要途径之一。间伐在短期内会造成蓄积量和规格材出材量的损失, 但随着培育时间的延长, 林分蓄积量和规格材出材量的损失可通过树种结构的提升进行弥补。本研究中, 林分蓄积量随林分密度的减小而大幅度降低, 但规格材_(原条)出材量随密度的减小而增加,

说明间伐后虽然林分蓄积量在短时间内未能得到弥补,但规格材^(原条)出材量已经得到有效弥补,甚至有所提高,从经济效益而言,单位面积的产值并未降低。张水松等(2006)对10年生杉木人工林进行间伐抚育试验,并研究了间伐后20年间的平均产值变化,结果表明林分产值从经济上而言经历了4个时期,即上升期、高峰期、高峰延续期和下降期,而本研究的试验林应处于第一个时期,即经济效益的上升期。

4 结论

本研究所调查的试验林的最终培育目标为大径材,经过现阶段的数据分析可知立地质量对林分生长量和材种结构的影响在中龄林时期已十分明显,总体而言立地指数16及以上立地均适宜培育杉木大径材;林分密度对林木径级结构和材种出材率产生规律性影响,在营林过程中及时调整林分密度,有利于提早形成中、大径材,提升林分的规格材出材量,缩短育林时间,提高单位面积经济效益。

参 考 文 献

- 陈琴,陈代喜,黄开勇等.杉木与固氮树种混交对其叶片N及NR和GS活性的影响[J].西部林业科学,2017,46(01):85-90.
(CHEN Q, CHEN D X, HUANG K Y, et al. 2017. Effect of Cunninghamia lanceolata Mixed with Nitrogen Fixing Trees on Its Leaf N and the Activity of NR and GS. Journal of West China Forestry Science, 46(01):85-90. [in Chinese])
- 段爱国,张建国,童书振,等.杉木人工林林分直径结构动态变化及其密度效应的研究[J].林业科学研究,2004,17(02):178-184.
(DUAN A G, ZHANG J G, TONG S Z, et al. 2004. Studies on Dynamics of Diameter Structure of Chinese Fir Plantations and Affection of Density on It. Forest Research, 17(02):178-184. [in Chinese])
- 郭光智,段爱国,张建国.南亚热带杉木林分蓄积量生长立地与密度效应[J].林业科学研,2019,32(04):19-25.
(GUO G Z, DUAN A G, ZHANG J G. 2019. The Site and Planting Density Effects on the Wood Volume Growth of Chinese Fir Plantations in South Subtropical Area. Forest Research, 32(04):19-25. [in Chinese])
- 郭云伟,李建华,张以棚.不同地形因子对云南松天然林林木生长的影响[J].乡村科技,2022,13(24):118-121
(GUO Y W, LI J H, ZHANG Y P. 2022. Effects of different topographic factors on the growth of natural forest of Yunnan pine. Rural Science and Technology, 13(24):118-121 [in Chinese])
- 刘玉宝.29年生杉木林下植物多样性与密度的关系[J].福建林学院学报,2005,25(01):27-30.
(LIU Y B. 2005. Relationship between Undergrowth Species Diversity and Stand Density of 29-year-old Chinese fir Plantations. Journal of Fujian College of Forestry, 25(01):27-30. [in Chinese])
- 邵方丽,余新晓,郑江坤,等.北京山区防护林优势树种分布与环境的关系[J].生态学报,2012,32(19):6092-6099
(SHAO F L, YU X X, ZHENG J K, et al. 2012. Relationships between dominant arbor species distribution and environmental factors of shelter forests in the Beijing mountain area. Acta Ecologica Sinica, 32(19):6092-6099. [in Chinese])
- 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(05):530-534.
(TU Y H, YE G F, LIN W X, et al. 2005. Big-diameter-oriented cultivation techniques of Cunninghamia lanceolata with suitable management density. Journal of Zhejiang Forestry College, 22(05):530-534. [in Chinese])
- 汪星星,廖文海,左晓东等.密度调控对杉木人工林土壤理化性质的影响[J].东北林业大学学报,2023,51(01):82-87.
(WANG X X, LIAO W H, ZUO X D, et al. 2023. Effect of Soil Physicochemical Properties of Fir Plantation under Density Regulation. Journal of Northeast Forestry University, 51(01):82-87. [in Chinese])
- 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(02):246-252.
(WANG Y L, SONG C S, HE Z M, et al. 2022. Effect of Retention Density and Site Quality on Species Structure and Large-diameter Growth Retention in Chinese Fir Plantation. Journal of Beihua University(Natural Science, 23(02):246-252. [in Chinese])
- 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(05):654-659.

- (XIANG C W, ZHANG J G, DUAN A G, et al. 2015. Effects of Site Quality and Planting Density on Wood Assortment Rate in Chinese Fir Plantation . Forest Research, 28(05):654-659. [in Chinese])
- 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(01):99-107
- (XU J L, MAO Y M, ZHENG C Z, et al. 2014. Effect of Thinning on Growth and Timber Outturn in Cunninghamia lanceolata Plantation. Forest Research,27(01):99-107. [in Chinese])
- 徐雪蕾,孙玉军,周华,等.间伐强度对杉木人工林林下植被和土壤性质的影响[J].林业科学,2019,55(03):1-12.
- (XU X L, SUN Y J, ZHOU H, et al. 2019. Effects of Thinning Intensity on Understory Growth and Soil Properties in Chinese fir Plantation . Scientia Silvae Sinicae, 55(03):1-12. [in Chinese])
- 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(06):753-759.
- (XU G J, ZHENG G, LIN K M, et al. 2019. Effects of thinning management mode on the growth of large diameter timber of Chinese fir. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University(Natural Science Edition),48(06):753-759. [in Chinese])
- 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(06):544-549.
- (YE G F, TU Y H, LIN R R, et al. 2005. On Big-diameter-oriented Cultivation Techniques of Cunninghamia lanceolata of Different Density Measures. Journal of Beihua University(Natural Science), 6(06):544-549. [in Chinese])
- 张建国,李吉跃,彭祚登.人工造林技术概论[M].北京:科学出版社,2007
- (ZHANG J G, LI J Y, PENG Z D. 2007. Introduction to afforestation technology. Beijing: science press. [in Chinese]))
- 张鹏.不同间伐强度杉木人工林林分结构及生长分析[D].北京:北京林业大学,2015.
- (ZHANG P. 2015. A study of chinese fir plantation forest structure on different density control. Beijing forestry University. [in Chinese])
- 张水松,陈长发,吴克选,等.杉木林间伐强度材种出材量和经济效果的研究[J].林业科学,2006,(07):37-46.
- (ZHANG S S, CHEN C F, WU K X, et al. 2006. Studies on the Timber Assortment Outturn and Economic Benefit of the Intermediate Cutting Intensity for Cunninghamia lanceolata Stands. Scientia Silvae Sinicae, (07):37-46. [in Chinese])
- 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(02):70-78.
- (ZHAO M Z, LIU J, ZHOU X H, et al. 2023. Effects of thinning and fertilization on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir forest. 47(02):70-78. [in Chinese])
- 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(02):338-346.
- (ZHAO M Z, WANG L Y, LIU J, et al. 2022. Effects of thinning and fertilization on growth and timber structure of mature Chinese fir forest. Journal of Zhejiang Agriculture and Forestry University,39(02):338-346. [in Chinese])
- 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(04):369-376.
- (ZHENG M M, REN Z B, WANG Y L, et al. 2020. Effect of thinning intensity on the growth and structure of a middle-aged Chinese fir forest. Journal of Forest and Environment, 40(04):369-376. [in Chinese])