

间伐施肥对杉木中龄林生长和材种结构的影响

赵铭臻¹, 刘静¹, 邹显花², 郑宏³, 范福金³, 林开敏^{1,2}, 马祥庆^{1,2}, 李明^{1,2*}

(1.福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2.国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;
3.福建省洋口国有林场, 福建 顺昌 353205)

摘要:【目的】探讨不同间伐保留密度和施用不同比例 N、P 肥对杉木中龄林生长和材种结构的影响。【方法】在福建省洋口国有林场 9 年生立地指数 22 的杉木人工林中设置 9 块标准地, 采用正交试验设计进行间伐和施肥的配套试验, 间伐保留密度为 1 200、1 500 和 2 250 株/hm², N 肥施用量为 0、100、200 g/株, P 肥施用量为 0、250、500 g/株, 连续观测 4 a。【结果】不同间伐密度和 N、P 肥施用量对杉木树高生长影响不显著, 不同间伐保留密度对杉木林平均胸径增长有较大影响, 最小密度与最大密度处理间存在显著差异。N 肥施用量和 P 肥施用量对杉木林平均胸径增长影响较小, 不同 N、P 肥施用量间差异不显著。不同间伐保留密度间平均单株材积增量存在显著差异, N、P 肥施用量对平均单株材积增量影响较小。不同密度林分间蓄积量增量并不显著, 但较高水平 N、P 肥施用量能促进林分蓄积量增量显著提高。低间伐保留密度显著影响杉木大径材出材量, 而 1 200 株/hm² 保留密度下大径材出材量最高, 1 500 和 2 250 株/hm² 保留密度下能够获得较高的中径材出材量。高水平的 N 肥施用量能促进杉木中龄林大径材出材量的增加, 高水平的 P 肥施用量能促进中径材出材量的增加, 但其结果未达到显著水平。【结论】相对于 N、P 肥的施用效果, 密度调控对杉木中龄林生长和材种结构的影响更为显著。较低的林分密度是培育杉木大径材的关键技术, 而 N、P 肥施用效应需要长期观测。

关键词: 杉木; 间伐; 施肥; 中龄林; 材种结构

中图分类号: S753.5

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号: 1000-2006(2023)02-0070-09



Effects of thinning and fertilization on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir forest

ZHAO Mingzhen¹, LIU Jing¹, ZOU Xianhua², ZHENG Hong³, FAN Fujing³,
LIN Kaimin^{1,2}, MA Xiangqing^{1,2}, LI Ming^{1,2*}

(1.Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.National Forestry and Grassland Administration Engineering Research Center of Chinese Fir, Fuzhou 350002, China;
3.Fujian Yangkou National Forest Farm, Shunchang 353205, China)

Abstract: 【Objective】The effects of different thinning retention densities and different ratios of N and P fertilizers on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) forests were analyzed. 【Method】Nine standard plots were set up in a 9-year-old Chinese fir plantation with 23 site indices at the Yangkou National Forest Farm in Fujian Province. An orthogonal experimental design was used to carry out matching experiments of thinning and fertilization. The thinning retention density was 1 200, 1 500 or 2 250 trees/hm²; the N fertilizer application rate was 0, 100 or 200 g per tree; and the P fertilizer application rate was 0, 250 or 500 g per tree, this experiment lasted for four years. 【Result】The results show that different thinning densities and N and P application rates had no significant effect on tree height growth. Different thinning retention densities had a greater impact on the average DBH growth of Chinese fir forests, and revealed a significant difference between the minimum density and the maximum density. The application rate of N fertilizer and P fertilizer had little effect on the average DBH growth of Chinese fir forest,

收稿日期 Received: 2021-06-03

修回日期 Accepted: 2022-05-10

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFD2201302, 2016YFD0600301)。

第一作者: 赵铭臻(1979582649@qq.com)。* 通信作者: 李明(limingly@126.com), 副教授。

引文格式: 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. ZHAO M Z, LIU J, ZOU X H, et al. Effects of thinning and fertilization on the growth and timber assortment structure of middle-aged Chinese fir forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2023, 47(2): 70-78. DOI: 10.12302/j.issn.1000-2006.202106007.

and there was no significant difference between different N and P application rates. There was a significant difference in the average volume increase per plant among different thinning retention densities, and the application of N and P fertilizers had little effect on the average per tree volume increase. The increase in stand volume among stands of different densities was not significant, but higher levels of N and P application rates could promote a significant increase in stock volume increase. The low thinning retention density significantly affected the large-diameter wood yield, and it was highest under the retention density of 1 200 trees/hm². Higher yields of medium diameter timber were obtained at retention densities of 1 500 and 2 250 trees/hm². A high level of N fertilizer application promoted an increased large-diameter wood output, while a high level of P fertilizer application promoted an increased medium-diameter wood output, but the result was not significant.【Conclusion】In general, compared with the application of N and P fertilizers, the effect of density regulation on the growth and timber structure of Chinese fir middle-aged forests is more significant. The lower forest density is key for cultivating large-diameter fir timber, and the effects of N and P fertilizer application require long-term observation.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata* (Chinese fir); thinning; fertilization; middle-aged forest; wood species structure

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方重要的速生针叶用材树种,其栽培面积和蓄积量分别约占中国人工乔木林主要优势树种的 1/5 和 1/4,在我国人工林木材资源中占有重要地位^[1-2]。由于杉木生长速度快、成材时间短,长期以来杉木人工林经营主要依靠营造大面积、高密度的速生丰产林来满足木材市场需求^[3]。近年来市场对传统杉木材种的需求发生极大变化,上述经营模式下培育的中小径材居多,而市场急需的大径材和装饰材少,材种供给结构失衡问题日趋突出。同时,市场对杉木木材的需求也从单纯追求木材数量向数量与质量并重转变,定向培育优质杉木大径材成为杉木人工林经营的重要方向^[4]。

人工林大径材的定向培育是贯穿林木种子筛选到成林各个阶段的培育体系,其重点内容聚焦在立地条件选择、树种遗传控制、林分密度控制、施肥管理、轮伐期调控等方面。其中,密度调控和施肥管理是培育大径材的关键环节,对郁闭后的人工林分进行间伐能够调节林分密度、改善林内资源竞争,从而促进杉木的生长发育^[5]。施肥是改善林木品质、提高林木自身竞争力的重要手段。特别是处于中龄林阶段的间伐后杉木林分,其个体对养分需求量更加旺盛,而杉木本身自肥能力较差,适宜的施肥时期和施肥量能够有效缩短杉木生长周期,提高杉木质量^[6]。目前的研究大多探讨间伐保留密度对杉木林分的影响或施肥对林分的影响,然而生产中往往需要密度调控和施肥措施的组装配套,以有效提高杉木大径材材种结构和生产力。研究杉木中龄林大径材材种形成与间伐保留密度和 N、P 肥施用量的关系,对于揭示杉木大径材材种形成机制、构建杉木中龄林大径材定向培育技术具有重要意义,有助于筛选适合中心产区应用的杉木大径材高效培育技术体系。为此,本研究分析了不同间

伐保留密度和不同比例 N、P 肥施用量对杉木中龄林生长、材种结构、大径材出材量和出材率的影响,以期对杉木中龄林大径材高效培育提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验林设于福建省洋口国有林场(117°31′~118°14′E,26°39′~27°12′N),属武夷山支脉的低山丘陵地带,海拔 300~700 m;位于中亚热带海洋性季风气候区,年均气温为 18.6 ℃,年均降水量 1 300~2 100 mm,无霜期可达 305 d,气候温暖,雨量充沛;土壤以山地红壤为主,是适合杉木大径材培育的中心产区。试验林内土壤理化性质及 N、P 元素含量见表 1。

表 1 试验地土壤理化性质
Table 1 Physical properties of soil in the experimental site

理化性质 physical and chemical property	土层/cm soil layer		
	0~10	≥10~20	≥20~40
最大持水量/mm max holding water	52.61±1.92	52.19±2.34	105.50±4.59
毛管持水量/mm hairy tube holding water	45.66±3.12	43.21±3.21	88.78±6.21
最小持水量/mm min retentive capacity	31.93±3.37	28.93±3.35	61.19±4.64
非毛管孔隙度/% non-capillary porosity	6.85±3.60	8.45±4.70	8.29±2.79
毛管孔隙度/% capillary porosity	45.57±3.12	43.08±3.21	44.39±3.11
总孔隙度/% total porosity	52.41±1.92	51.53±2.34	52.69±2.29
土壤密度/(g·cm ⁻³) soil density	2.66±0.15	2.68±0.10	2.87±0.14
N 含量/(g·kg ⁻¹) N content	1.57±0.34	1.42±0.32	1.02±0.21
P 含量/(g·kg ⁻¹) P content	0.26±0.04	0.25±0.05	0.26±0.05

1.2 试验设计及样地调查

用第 3 代杉木良种培育的 9 年生实生苗造林,供试杉木林面积为 4.93 hm²,林分立地指数为 22。实验采用正交试验设计,设 3 因素 3 水平不同处理组合的 9 块样地。3 个影响因素分别为间伐保留密度和 N 肥、P 肥施用量。其中间伐保留密度有 1 200、1 500、2 250 株/hm² 3 个水平,N 肥量设 0、100、200 g/株 3 个水平,P 肥量为 0、250、500 g/株 3 个水平;间伐施肥后 1 年取样地土壤测其养分变化,其中化学计量比以 C:N、C:P、N:P 表示。

试验采用罗盘仪定向,皮尺量距,在坡度大于 5°时把斜距改算成水平距。样地为 20 m×20 m,即 400 m²的标准地,在标准样地的 4 个角点埋设木桩作为标志,然后对各个样地的杉木进行标记号牌管理。于 2017—2020 年的每年 4 月对各样地杉木每木检尺,以围径尺测定胸径、激光测高仪测量树高,以 5 m 标杆测量南北冠幅和东西冠幅,并以 2017 年的数据作为间伐和施肥处理前的生长情况。

1.3 参数计算

1)杉木平均胸径。为方便统计和计算,对杉木胸径进行径阶划分,以 2 cm 为 1 个径阶[如 18 径阶包括[17,19)范围]统计各径阶株数,并分别计算各径阶杉木的平均胸径(D_i),计算公式如下:

$$D_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum d_i^2}.$$

式中: N 表示第 i 径阶总株数, d_i 表示第 i 径阶胸径。

2)杉木拟合树高。为提高树高测量值的精准度,通过建立试验样地内所有林木的胸径-树高生长模型,利用实测的平均胸径代入生长模型计算出拟合树高进行后续分析(表 2)。对胸径-树高生长

模型的拟合优度进行分析,按照各拟合模型的精准度排序确定幂函数 $H = 1.969\ 2\ D^{0.720\ 5}$,为树高回归计算的最优函数模型。

表 2 树高、胸径回归拟合结果

Table 2 Regression fitting results of tree height and DBH

回归模型类型 regression model type	模型方程 model equation	R^2
二次函数 quadratic function	$H = -0.010\ 8\ D^2 + 1.022\ 1\ D + 1.093\ 5$	0.720\ 5
一次线性函数 linear function	$H = 0.620\ 8\ D + 4.635\ 2$	0.713\ 1
指数函数 exponential function	$H = 7.397\ 5\ e^{0.041\ D}$	0.699\ 4
幂函数 power function	$H = 1.969\ 2\ D^{0.720\ 5}$	0.731\ 6

3)平均单株材积和林分蓄积量。分别计算样地内各径阶平均单株材积(V_i),乘以所对应的径阶株数(N_i),即得相对应径阶材积($V_{i总}$)。对样地内各径阶材积累加求和,得到样地林分的总材积,并换算为每公顷样地所有林分的蓄积量($V_{总}$),m³/hm²。

$$V_i = 0.000\ 058\ 777\ 042 \times 1.969\ 983\ 1\ D_i \times 0.896\ 461\ 57\ H_i;$$

$$V_{i总} = V_i \times N_i。$$

式中: D_i 为第 i 径阶平均胸径,cm; H_i 为第 i 径阶拟合树高,m; $V_{i总}$ 为径阶材积,m³; N_i 为径阶株数。

4)材种出材量。各材种以径阶大小为区分标准,分别计算各径阶立木出材量,并按照各径级林木材种株数占比(表 3)对林分立木各径阶中各材种所占株数进行归并。

表 3 各径级林木株数材种占比

Table 3 Proportions of timber type in different diameter classes

材种 timber type	各径级占比/% diameter class ratio											
	<6 cm	6 cm	8 cm	10 cm	12 cm	14 cm	16 cm	18 cm	20 cm	22 cm	24 cm	≥26 cm
薪材 fuelwood	100	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
小条木 small wood	0	70	100	60	10	0	0	0	0	0	0	0
小径材 small diameter timber	0	0	0	40	90	100	100	40	0	0	0	0
中径材 medium diameter timber	0	0	0	0	0	0	0	60	100	100	65	0
大径材 large diameter timber	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	100

杉木人工林材种结构的计算参考文献[7—8]的方法,划分不同径阶各材种株数后,分别按规格材(原条)和非规格材(小条木)计算各材种出材量

及林分总出材量。

$$V_{\text{非规格(小条木)}} = -0.027\ 555\ 240\ 9 + 3.686\ 494\ 63 \times 10^{-3} D + 1.672\ 443\ 05 \times 10^{-3} H;$$

$$V_{\text{规格(原条)}} = 3.602\ 437\ 58 \times 10^{-5} D^{1.947\ 520\ 76} H^{1.007\ 937\ 69};$$
$$V_{\text{规格(总)}} = V_{\text{规格(小径材)}} + V_{\text{规格(中径材)}} + V_{\text{规格(大径材)}} \circ$$
式中: D 为径阶平均胸径, cm; H 为径阶平均树高, m。出材量与林分蓄积量的比值为各自的出材率, %。

1.4 数据处理

数据统计和差异显著性分析使用 SPSS 23.0, 方差分析使用混合模型 (mixed model), 重复为随机效应, 正交设计处理为固定效应。多重比较采用 Duncan 方法进行, 使用 Origin 2019 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤养分变化对间伐及施肥处理的响应

间伐及施肥 1 年后, 各样地养分状况及其生态化学计量见表 4。各样地内土壤有机碳、全氮和全磷含量对间伐、施肥的响应较小, 且这些处理对土壤生态化学计量的影响也较小 ($P>0.05$)。究其原因, 可能是在短期内间伐并不能改善林地土壤状况, 间伐引起的改变可能更多的是一种长期效应。而仅 1 次施肥并不能有效改善土壤质量, 在植物吸收和雨水冲刷下, 林地土壤养分也趋于一致。

表 4 各样地间伐施肥处理、养分状况及其生态化学计量

Table 4 Various thinning and fertilization treatments, nutrient status and eco-stoichiometry of each sample plot									
样地号 sample No.	保留密度/ (株·hm ⁻²) retention density	施肥量/(g·株 ⁻¹) fertilizer amount		养分含量/(g·kg ⁻¹) nutrient content			化学计量比 eco-stoichiometry		
		N	P	有机碳 SOC	全氮 TN	全磷 TP	C:N	C:P	N:P
1	1 200	0	250	16.12±3.55	1.24±0.33	0.23±0.08	13.30±1.62	75.74±23.18	5.58±1.18
2	1 500	200	0	13.06±2.51	0.93±0.08	0.24±0.03	14.36±4.08	57.43±19.70	3.94±0.29
3	1 200	200	500	17.05±2.53	1.37±0.19	0.25±0.02	12.44±0.17	69.35±13.82	5.56±1.04
4	2 250	0	0	22.08±2.92	1.73±0.23	0.30±0.02	12.82±1.14	73.59±5.90	5.77±0.56
5	1 500	0	500	18.39±7.28	1.30±0.57	0.28±0.02	14.70±1.64	66.23±24.35	4.71±1.97
6	1 200	100	0	15.25±3.11	1.13±0.36	0.32±0.01	14.18±2.22	47.12±10.24	3.50±1.14
7	2 250	100	500	15.64±3.86	1.13±0.36	0.25±0.01	14.36±1.53	61.58±13.14	4.42±1.26
8	1 500	100	250	16.37±2.89	1.19±0.30	0.24±0.02	14.30±2.96	67.20±9.71	4.93±1.30
9	2 250	200	250	25.47±1.32	1.78±0.30	0.21±0.07	14.74±2.86	129.37±33.58	9.51±3.80

2.2 间伐和施肥对杉木中龄林生长量和蓄积量的影响

对 3 年间各样地内杉木胸径、树高、单株材积和蓄积量的年平均增长量进行计算, 结果(表 5)表明, 胸径年均增长量为 2.32~3.80 cm, 树高年均增长量为 1.48~2.33 m, 单株材积年均增长量为 0.064 6~0.138 3 m³, 蓄积量年均增长 135.23~169.54 m³/hm²(表 5)。其中, 间伐保留密度为 1 200 株/hm²、N 肥量为 200 g/株、P 肥量为 500 g/株处理下的 3 号样地树高、胸径、单株材积和蓄积量增量均为最大, 表明低密度处理配合较高的 N、P 肥施用量能够有效促进杉木中龄林个体树高、胸径、单株材积的增长, 从而促进林地蓄积量的增加。间伐保留密度为 2 250 株/hm²、N 肥和 P 肥量均为 0 g/株处理下的 4 号样地树高、胸径、单株材积增量最小, 显示高密度和不施肥处理限制了林木个体生长, 但由于较高的林分密度, 林地蓄积量仍能维持较高水平。各样地内杉木胸径、树高、单

株材积和蓄积量年平均增长量未呈现出规律性变化, 年增量达到最大值的时间并不相同, 表明间伐和施肥带来的低密度效应和施肥效应对杉木短期生长产生了影响, 但影响程度和响应时间存在差异。若继续对其进行后续年份的观察, 则随着施肥效应的减弱, 其增量应该都会下降到趋于稳定的状态, 间伐后的保留密度就会成为制约其生长的主要因素。

对不同间伐保留密度和施肥处理下杉木中林龄胸径和树高年平均增量进行多重比较, 结果(表 6)表明, 不同间伐保留密度对杉木胸径增长有较大影响, 1 200 和 2 250 株/hm²处理间存在显著差异 ($P<0.05$)。N 肥和 P 肥施用量对杉木胸径增长影响较小, 高 N 肥施用量能够促进杉木中龄林胸径增产, 但各处理间差异不显著。密度为 1 200、1 500、2 250 株/hm²处理下的平均胸径增量分别为 3.61、3.24、2.67 cm, 表明低保留密度能有效促进杉木胸径生长。不同间伐保留密度及施肥处理对

表 5 各样地平均胸径、平均树高、平均单株材积和蓄积量生长情况
Table 5 Growth of average DBH, average tree height, single mean volume and accumulation

样地号 sample No.	年份 year	D/cm	H/m	$V_{\text{单株}}/\text{m}^3$	$V_{\text{总}}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	样地号 sample No.	年份 year	D/cm	H/m	$V_{\text{单株}}/\text{m}^3$	$V_{\text{总}}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$
1	2017	18.47	16.10	0.221 8	242.16	5	2020	20.53	17.37	0.292 4	443.35
	2018	19.74	16.89	0.263 9	287.39		总增量	3.25	2.03	0.106 1	161.55
	2019	21.02	17.67	0.311 1	339.60	6	2017	18.31	16.00	0.216 8	251.26
	2020	21.88	18.19	0.345 5	377.39		2018	19.44	16.70	0.253 5	294.28
	总增量	3.41	2.09	0.123 7	135.23		2019	20.72	17.49	0.299 7	348.51
2	2017	18.36	16.03	0.218 4	331.81		2020	21.93	18.22	0.347 6	405.15
	2018	19.41	16.68	0.252 4	384.10		总增量	3.62	2.22	0.130 8	153.90
	2019	20.43	17.31	0.288 7	439.61	7	2017	15.11	13.93	0.131 2	301.59
	2020	21.42	17.91	0.326 8	499.12		2018	16.14	14.61	0.156 0	359.71
	总增量	3.06	1.88	0.108 4	167.32		2019	17.06	15.2	0.180 1	416.20
3	2017	18.31	16.00	0.216 8	262.47		2020	17.69	15.61	0.198 2	454.87
	2018	19.49	16.73	0.255 2	309.77		总增量	2.58	1.68	0.067 0	153.28
	2019	20.72	17.49	0.299 7	364.14	8	2017	14.82	13.74	0.124 7	189.22
	2020	22.11	18.33	0.355 1	432.01		2018	16.09	14.58	0.154 6	238.42
	总增量	3.80	2.33	0.138 3	169.54		2019	17.33	15.37	0.187 7	289.60
4	2017	15.98	14.51	0.151 9	360.81		2020	18.22	15.94	0.214 0	330.24
	2018	16.92	15.11	0.176 3	416.92		总增量	3.40	2.20	0.089 3	141.03
	2019	17.72	15.63	0.199 2	472.27	9	2017	13.22	12.65	0.092 5	203.61
	2020	18.30	15.99	0.216 5	514.21		2018	14.48	13.51	0.117 3	258.43
	总增量	2.32	1.48	0.064 6	153.39		2019	15.65	14.29	0.143 8	317.00
5	2017	17.28	15.34	0.186 3	281.80		2020	16.33	14.73	0.160 7	354.41
	2018	18.52	16.13	0.223 4	338.03		总增量	3.11	2.08	0.068 2	150.80
	2019	19.81	16.93	0.266 4	403.49						

表 6 间伐和氮磷肥 3 因素对杉木各生长指标增量的影响
Table 6 Effects of three factors on the increment of each growth index

变量 variable	处理 treatment	$D_{\text{增量}}/\text{cm}$	$H_{\text{增量}}/\text{m}$	$V_{\text{单株增量}}/\text{m}^3$	$V_{\text{总增量}}/(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	出材量增量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$ output increment		出材率增量/% yield increment	
						中径材 medium- diameter timber	大径材 large- diameter timber	中径材 medium- diameter timber	大径材 large- diameter timber
保留密度/ (株 $\cdot \text{hm}^{-2}$) retention density	1 200	3.61±0.16 b	2.21±0.10 a	0.130 9±0.006 0 c	152.89±14.02 a	71.22±6.42 a	104.47±15.52 b	1.23±3.86 a	25.01±3.25 b
	1 500	3.24±0.14 ab	2.04±0.13 a	0.101 3±0.008 5 b	156.63±11.28 a	138.19±43.03 a	49.26±43.00 ab	23.26±9.67 a	10.05±8.06 a
	2 250	2.67±0.33 a	1.75±0.25 a	0.066 6±0.001 5 a	152.49±1.19 a	134.86±22.73 a	24.41±16.71 a	24.92±6.87 a	5.06±3.16 a
N 肥量/ (g $\cdot \text{株}^{-1}$) N fertilizer amount	0	2.99±0.48 a	1.87±0.27 a	0.098 1±0.024 8 a	150.06±11.00 a	121.69±47.41 a	54.44±22.71 a	13.8±7.14 a	12.17±6.12 a
	100	3.20±0.45 a	2.03±0.25 a	0.095 7±0.026 4 a	149.40±5.93 a	127.39±35.94 a	45.29±41.94 a	22.56±4.67 a	11.06±4.36 a
	200	3.33±0.34 a	2.10±0.18 a	0.105 0±0.028 7 a	162.55±8.36 b	95.18±33.59 a	78.41±53.55 a	10.59±2.95 a	16.88±5.71 a
P 肥量 (g $\cdot \text{株}^{-1}$) P fertilizer amount	0	3.00±0.54 a	1.87±0.30 a	0.101 2±0.027 5 a	158.20±6.45 b	87.8±11.87 a	85.23±29.15 a	3.21±4.26 a	18.39±7.18 a
	250	3.31±0.14 a	2.12±0.06 a	0.093 7±0.022 9 a	142.35±6.43 a	120.58±32.80 a	31.87±38.26 a	26.87±8.71 a	7.88±9.13 a
	500	3.21±0.50 a	2.01±0.27 a	0.103 8±0.029 2 a	161.46±6.64 b	135.88±53.24 a	61.04±44.57 a	16.87±3.65 a	13.84±9.51 a

注:同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same column indicate that the difference among treatments reached the significant level ($P<0.05$).

杉木树高生长量影响不显著,总体上低间伐密度和高 N 肥施用量能够促进树高生长,250 g/株 P 肥处理最有利于树高生长。不同间伐保留密度对杉木林平均单株材积生长影响差异显著($P<0.05$),密

度 1 200、1 500、2 250 株/ hm^2 的处理下平均单株材积增量分别为 0.130 9、0.101 3、0.066 6 m^3 ,表明低间伐保留密度对杉木的平均单株材积生长具有显著促进作用。N、P 肥施用量对杉木林平均单株

材积增长差异不显著,但对林分蓄积量的影响差异显著(表 6)。较高的 N 肥施用量能够促进林分蓄积量增量显著提高($P<0.05$),500 与 250 g/株 P 肥施用量处理间林分蓄积量差异显著($P<0.05$)。虽然低间伐保留密度对杉木的平均单株材积有促进作用,但不同密度林分间蓄积量增量差异并不显著,这可能是由于杉木个体上的增长刚好弥补其数量上的损失。此外,本试验所选样地立地指数均不小于 22,其土壤肥力较好,这也可能是施肥对杉木中龄林胸径、树高和单株材积增长量影响较小的原因。

2.3 间伐和施肥对杉木中龄林材种结构的影响

对各样地 3 年间小条木、小径材、中径材和大径材出材量进行分析,结果表明,各样地小条木和小径材出材量随培育年份逐渐减少,而中径材和大

径材则不断增加(图 1),显示出处于中龄林阶段的杉木林中大量小条木和小径材生长为中径材和大径材。对不同处理下各样地中径材和大径材出材量增量进行分析,发现除低间伐保留密度下大径材出材量增量大于中径材出材量增量,其余条件下中径材出材量增量均大于大径材出材量增量,说明杉木中龄林阶段,林地内材种结构偏向于中径材的形成,而大径材形成较少。采用低间伐保留密度处理会明显加速杉木生长周期,促进林地内大径材的形成。对不同间伐保留密度和施肥处理下杉木中龄林中径材和大径材出材量增量进行多重比较,结果显示,间伐和施肥处理下中径材出材量增量变化并不显著,低间伐保留密度下大径材出材量增量显著高于高间伐保留密度所带来的大径材出材量增加,而施肥对大径材出材量增加影响不大。间伐和施

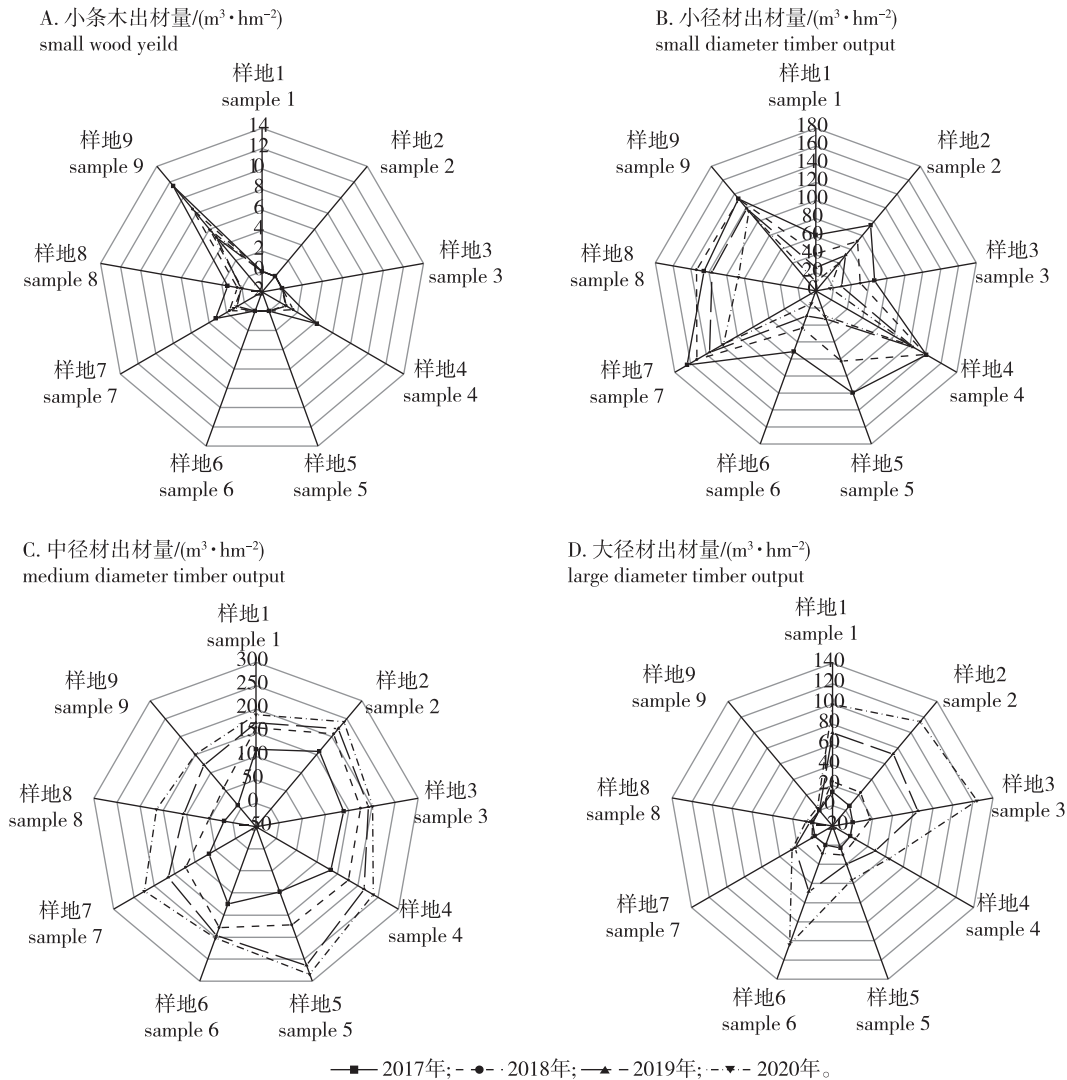


图 1 3 年间杉木中龄林材种结构变化情况

Fig.1 Changes of timber assortment structure wood species structure of middle-aged *Cunninghamia lanceolata* plantation forests in three years

肥处理对中径材出材率影响较小,低间伐保留密度可显著提高杉木大径材出材率(表6)。

3 讨论

密度是影响林木生长的关键因素之一,而人工中幼林林分往往密度较大,易受病虫害爆发的影响,其林下生物多样性、森林稳定性和生态服务功能较低^[9]。合理调控密度是杉木人工林定向培育中的重要环节。间伐是密度调控的关键手段,间伐后林分密度减小,林木与林木之间间隔增大,林木有了足够的生长空间,对阳光、水分和养分的竞争减小,有利于林木的生殖生长和生长发育^[4]。另一方面,林内光照增强,有利于林下植被的生长,增加了生物多样性,使人工林生态系统更加稳定,林木个体发育也更好。所以,低间伐保留密度是有效促进林木胸径增长,从而增加人工林大、中径材比例的重要措施。有研究表明,对15年生油松林进行间伐和打枝的处理,6 a后其平均胸径最大,与未进行间伐打枝的林分差异极显著^[10]。肖兴翠等^[11]发现7年生香椿中龄林的平均胸径生长量与间伐后的保留密度呈反比。郑鸣鸣等^[12]在不同间伐强度对杉木中龄林的影响研究中发现,中度和强度间伐林分的平均胸径显著高于弱度间伐,且平均胸径随着间伐强度的增大而增大,与本研究结果一致。张鹏等^[13]的研究中也发现杉木平均胸径生长量随间伐强度增大而升高。不同间伐保留密度对杉木年平均树高生长量影响不同,但其差异并不显著。王春胜等^[14]在西南桦中幼林林木生长过程与造林密度的关系研究中发现,树高生长与造林密度间没有显著的相关性,不同造林密度处理的树高生长过程基本一致。王毓靖等^[15]发现间伐强度对桉树人工林树高生长影响较小。林木的平均单株材积与胸径、树高息息相关,在杉木中龄林间伐和施肥试验中,与未间伐相比,不同程度的间伐均促进了杉木平均单株材积的增长。童方平等^[16]通过对火炬松的生长调查发现,间伐能显著地促进林木单株材积的生长,有利于大径木材的培育。徐有明等^[17]对湿地松的研究也得到了同样的结果。

施肥能够极大地补充土壤养分的耗损,提高土壤对植物的养分供给能力,满足植物生长发育的需求。因此在生长较为旺盛的中龄林阶段,施肥对林木生长显得尤为重要。研究表明,施肥对促进湿地松中龄林树高、胸径生长效果显著,其中P肥对促进湿地松树高生长效果显著,N肥对促进湿地松胸径生长效果显著^[18]。舒文波等^[19]对马尾松中龄

林林地施肥表明,马尾松对施用肥料非常敏感,施肥可以明显促进马尾松生长,提高马尾松的胸径、树高、单株材积等生长量水平。本试验结果显示,施肥对杉木中龄林胸径、树高、单株材积等的影响并不显著。其原因可能是在正交试验下,密度对林木生长的影响占主导地位,而施肥对其生长的影响起辅助作用,对于高立地指数的林地来说,其土壤中较高的养分含量抵消了部分施肥效应,导致施肥对杉木中龄林个体生长的影响并不显著。

间伐和施肥作用下,胸径和单株材积对杉木中龄林密度的响应较显著,施肥的影响较小。但蓄积量的响应则恰恰相反,施肥能够显著提高杉木中龄林的蓄积量,而密度对蓄积量的影响不显著。彭桂永^[20]研究表明,杉木中龄林间伐和施肥6 a后,间伐和施肥均对蓄积量的增加起到了极显著的作用。由于本试验只观测了间伐和施肥3 a间的短期效应,间伐虽能显著增加杉木的单株材积,但所造成的低密度林分个体数量的减少,在一定时间内还是不足以使其总蓄积量显著增加。王春胜等^[21]在间伐和施肥对桂西地区10年生西南桦生长影响的研究中也发现,试验处理2年半后,间伐强度对蓄积量增加影响不显著。

间伐和施肥对立地指数22 m的杉木中龄林材种结构的影响,趋向于小条木和小径材出材量不断减少,中径材和大径材出材量不断增加。除低间伐保留密度下大径材出材量增量大于中径材出材量增量外,其余条件下中径材出材量增量均大于大径材出材量增量,说明杉木中龄林阶段大多形成中径材,低密度下会加速其生长周期,促进杉木大径材的形成。郭光智等^[22]在南亚热带杉木人工林材种结构长期立地与密度效应的研究中指出,立地指数18 m的林分中径材比例随年龄增长表现出先增加后减少的趋势,与本研究结果一致,其大径材比例在成熟年龄之后也不断增加。以往对杉木中龄林的研究表明,合理的施肥配方能够有效增加中大径材比例^[23]。在材种的形成过程中,立地条件是其主要限制因子,在立地指数低的林地中,无论何种间伐保留密度,都难以形成大径材^[24]。此次正交实验的方差分析表明,在杉木中龄林阶段,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/hm²、N肥量100 g/株、P肥量0 g/株。因此,在高立地指数(22 m)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。该结论可能与林地的地位指数较高有关,对于立地指数 18~22 m 的杉木大径材林地,还有待继续研究。

土壤养分是植物生长的根本,在森林生态系统中,土壤内部的碳、氮、磷等元素至关重要,并且其迁移转化以及平衡特征等均可通过土壤元素生态化学计量特征来揭示^[25]。有研究表明,间伐能够显著提高大叶相思林土壤中有有机质、全氮、全磷含量,施用氮磷肥可以显著提高土壤中全磷和有效磷含量^[26];董威等^[27]在不同密度油松林的土壤养分研究中发现,中等密度的油松林土壤中有有机碳、全氮、全磷含量较高。本研究中并未发现土壤养分变化与间伐施肥的显著相关性,一方面可能是由于间伐年限太短,间伐 1 年后由密度引起的林地养分变化还未显现;另一方面,为了避免林缘效应,样地一般选择位于中坡位和上坡位的林分,再加上沿海多雨,雨水冲刷较强,导致一部分肥料流失,剩余部分经林木吸收利用之后,用于改善林地土壤养分状况的肥料少之又少,各林地养分变化并不显著。因此,有待进一步增加间伐后观测年限以及施肥次数的研究。另外,表征“植物-凋落物-土壤”养分循环的生态化学计量的研究以及大径材培育中地力衰退问题研究也非常重要^[28-29]。

参考文献 (reference):

- [1] 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(3):1-12. XU X L, SUN Y J, ZHOU H, et al. Effects of thinning intensity on understory growth and soil properties in Chinese fir plantation[J]. Sci Silvae Sin, 2019, 55(3):1-12.
- [2] 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. DOI: 10.3390/f11010111.
- [3] 国家林业局.第八次全国森林资源清查结果[EB/OL]. [2016-01-15] [2021-06-03]. <http://www.forestry.gov.cn/>.
- [4] 欧启信.杉木速生丰产林营林技术与管理要点分析[J].林业科技情报,2019,51(4):39-40. OU Q X. Analysis on the technology and management of fast-growing and high-yield forests in *Cunninghamia lanceolata* [J]. For Sci Technol Inf, 2019, 51(4):39-40, 51.
- [5] CRECENTE-CAMPO F, POMMERENING A, RODRÍGUEZ-SOALLEIRO R. Impacts of thinning on structure, growth and risk of crown fire in a *Pinus sylvestris* L. plantation in northern Spain [J]. For Ecol Manag, 2009, 257(9): 1945-1954. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.02.009.
- [6] 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. REN Y M, CHEN M J, LI H T, et al. Effects of formula fertilization on species structure of large diameter wood in near mature forest of Chinese fir [J]. J For Environ, 2021, 41(1): 18-25. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2021.01.003.
- [7] 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. DENG L X. Studies on stand density effect and timber grade structure of *Cunninghamia lanceolata* plantations [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010.
- [8] 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. XIANG C W. Study on regulation of stand growth and timber assortment structure in *Cunninghamia lanceolata* plantation [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2013.
- [9] 贾炜玮,罗天泽,李凤日.基于抚育间伐效应的红松人工林枝条密度模型[J].北京林业大学学报,2021,43(2):10-21. JIA W W, LUO T Z, LI F R. Branch density model for *Pinus koraiensis* plantation based on thinning effects [J]. J Beijing For Univ, 2021, 43(2):10-21.
- [10] 曹云,杨劼,宋炳煜,等.人工抚育措施对油松林生长及结构特征的影响[J].应用生态学报,2005,16(3):397-402. CAO Y, YANG J, SONG B Y, et al. Effects of artificial tending on *Pinus tabulaeformis* forest growth and its structural characteristics [J]. Chin J Appl Ecol, 2005, 16(3):397-402.
- [11] 肖兴翠,索怀俊,李成勇,等.不同间伐强度对香樟中龄林生长和干形的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(3):10-17. XIAO X C, SUO H J, LI C Y, et al. Effects of thinning intensity on growth and stem form of middle-aged *Toona sinensis* plantation [J]. J Central South Univ For & Technol, 2021, 41(3):10-17. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2021.03.002.
- [12] 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. ZHENG M M, REN Z B, WANG Y L, et al. Effect of thinning intensity on the growth and structure of a middle-aged Chinese fir forest [J]. J For Environ, 2020, 40(4):369-376. DOI: 10.13324/j.cnki.jfcf.2020.04.005.
- [13] 张鹏,王新杰,韩金,等.间伐对杉木人工林生长的短期影响[J].东北林业大学学报,2016,44(2):6-10. ZHANG P, WANG X J, HAN J, et al. Short-term effect of thinning on the growth of Chinese fir plantation [J]. J Northeast For Univ, 2016, 44(2):6-10, 14. DOI: 10.13759/j.cnki.dlxb.20160105.036.
- [14] 王春胜,赵志刚,曾冀,等.广西凭祥西南桦中幼林林木生长过程与造林密度的关系[J].林业科学研究,2013,26(2):257-262. WANG C S, ZHAO Z G, ZENG J, et al. Relationship between planting density and tree growth process of *Betula alnoides* mid-young plantations in Pingxiang, Guangxi [J]. For Res, 2013, 26(2):257-262. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2013.02.020.
- [15] 王毓靖,颜忠鹏,李志辉.不同间伐强度对桉树人工林林分生长的影响[J].桉树科技,2019,36(3):36-41. WANG Y J, YAN Z P, LI Z H. Effects of different thinning intensities on stand growth of *Eucalyptus* plantation [J]. Eucalypt Sci & Technol, 2019, 36(3):36-41. DOI: 10.13987/j.cnki.askj.2019.03.006.
- [16] 童方平,吴际友,龙应忠,余格非.间伐对火炬松木材性质的影响[J].中南林业学院学报,2004,24(2):23-27. TONG F P, WU J Y, LONG Y Z, et al. Effects of thinning on wood properties of loblolly pine [J]. J Central South For Univ, 2004, 24(2):23-27.
- [17] 徐有明,林汉,魏柏松,等.间伐强度对湿地松人工林木材质量的影响效应[J].东北林业大学学报,2002,30(2):38-42. XU Y M, LIN H, WEI B S, et al. Effects of thinning intensities on wood properties of exotic slash pine plantation [J]. J Northeast For Univ, 2002, 30(2):38-42. DOI: 10.3969/j.issn.1000-5382.2002.02.010.
- [18] 陈家法,魏志恒,吴际友,等.湿地松中龄林施肥经济效应与最

- 优施肥量研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(10):28-34. CHEN J F, WEI Z H, WU J Y, et al. Study on the economic effect of fertilization and the optimal amount of fertilization in the middle age *Pinus elliottii* plantation[J]. J Central South Univ For & Technol, 2020, 40(10): 28-34. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2020.10.003.
- [19] 舒文波,杨章旗,兰富.施肥对马尾松中龄林生长量和产脂的影响[J].福建林学院学报,2009,29(2):160-165. SHU W B, YANG Z Q, LAN F. Effects of fertilization on the growth and resin yield of middle-aged forest of *Pinus massoniana*[J]. J Fujian Coll For, 2009, 29(2): 160-165. DOI: 10.3969/j.issn.1001-389X.2009.02.013.
- [20] 彭桂永.杉木中龄林间伐后不同保留密度和施肥试验研究[J].安徽农学通报,2016,22(12):94-95,117. PENG G Y. Experimental study on different retention density and fertilization of middle-aged Chinese fir forest after thinning[J]. Anhui Agric Sci Bull, 2016, 22(12): 94-95, 117. DOI: 10.16377/j.cnki.issn1007-7731.2016.12.044.
- [21] 王春胜,唐诚,赵志刚,等.桂西地区西南桦中龄林生长对间伐和施肥的响应[J].中南林业科技大学学报,2018,38(5):28-32. WANG C S, TANG C, ZHAO Z G, et al. Growth response of mid-aged *Betula alnoides* plantations to thinning and fertilization in western Guangxi[J]. J Central South Univ For & Technol, 2018, 38(5): 28-32. DOI: 10.14067/j.cnki.1673-923x.2018.05.005.
- [22] 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. GUO G Z, DUAN A G, ZHANG J G, et al. Long-term effects of site and density on timber assortment structure of Chinese fir plantations in south subtropical area, China[J]. For Res, 2020, 33(1): 35-43. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.01.005.
- [23] 吴立潮,胡曰利,吴晓芙,等.杉木中龄林施肥效应与效益研究[J].中南林学院学报,1997,17(3):1-7. WU L C, HU Y L, WU X F, et al. Effect of fertilization on growth of middle-aged China-fir[J]. J Central South For Univ, 1997, 17(3): 1-7.
- [24] 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. HUI G Y, HU Y B, LUO Y W, et al. Study on the mechanism of producing high quality wood of Chinese fir[J]. For Res, 2000, 13(2): 177-181. DOI: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2000.02.011.
- [25] ACHAT D L, BAKKER M R, AUGUSTO L, et al. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia; effects of microbiological and physicochemical properties[J]. Biogeosciences, 2013, 10(2): 733-752. DOI: 10.5194/bg-10-733-2013.
- [26] 冯慧芳,刘落鱼,薛立.氮磷添加及林分密度对大叶相思林土壤化学性质的影响[J].植物生态学报,2019,43(11):1010-1020. FENG H F, LIU L Y, XUE L. Effects of nitrogen and phosphorus additions and stand density on soil chemical property in *Acacia auriculiformis* stands[J]. Chin J Plant Ecol, 2019, 43(11): 1010-1020.
- [27] 董威,刘泰瑞,覃志杰,等.不同林分密度油松天然林土壤理化性质及微生物量碳氮特征研究[J].生态环境学报,2019,28(1):65-72. DONG W, LIU T R, QIN Z J, et al. Research on the characteristics of soil physicochemical properties and microbial biomass carbon and nitrogen in natural *Pinus tabulaeformis* forests with different stand densities[J]. Ecol Environ Sci, 2019, 28(1): 65-72. DOI: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.01.008.
- [28] 杨佳萍,寥蓉,杨万勤,等.高山峡谷区暗针叶林凋落物产量及动态[J].应用与环境生物学报,2017,23(4):745-752. YANG J P, LIAO R, YANG W Q, et al. Litter production and its dynamic pattern in a dark coniferous forest in the alpine gorge region[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2017, 23(4): 745-752. DOI: 10.3724/SP.J.1145.2017.03020.
- [29] 郭传阳,林开敏,郑鸣鸣,等.间伐对杉木人工林土壤微生物量碳氮的短期影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2020,44(5):125-131. GUO C Y, LIN K M, ZHENG M M, et al. Short-term effects of thinning on soil microbial biomass carbon and nitrogen in a *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. J Nanjing For Univ (Nat Sci Ed), 2020, 44(5): 125-131. DOI: 10.3969/j.issn.1000-2006.201906007.

(责任编辑 郑琰琰)