

不同密度杉木人工林林分生长和林分结构差异研究

卢德浩,陈世清,谢惠燕,邓宁枕,冯铭淳,林娜*

(华南农业大学 林学与风景园林学院,广东 广州 510642)

摘要:探究不同密度杉木人工林林分结构与生长的差异,为杉木人工林的可持续经营提供科学依据。以清远市 11 年生 3 个不同密度(2 100、3 100、4 100 株 \cdot hm $^{-2}$)杉木人工纯林为研究对象,每个密度设置 6 个固定标准样地(20 m \times 20 m),选取大小比数、角尺度、直径结构、树高结构以及树冠结构 5 个参数探究林分结构特征,选取林分平均胸径、平均树高、蓄积和林木单株材积等指标探究林分生长特征,通过方差分析探讨林分密度对杉木人工林林分结构和生长的影响。结果表明,1)林分生长指数受林分密度影响差异显著($P<0.05$),4 100 株 \cdot hm $^{-2}$ 杉木人工林的平均胸径、树高、单株材积显著低于其他 2 种密度林分,3 100 株 \cdot hm $^{-2}$ 杉木人工林的蓄积显著高于其他 2 个密度林分。2)林分直径结构和树高结构在较高的林分密度下,小径级的林木较多,其分布曲线呈现为截尾正态分布。3)3 100 株 \cdot hm $^{-2}$ 的平均冠幅显著大于其他 2 种林分,4 100 株 \cdot hm $^{-2}$ 的平均树冠表面积以及树冠体积显著小于其他 2 种林分,3 种不同密度之间的林分树冠投影比和冠长均呈现显著差异性($P<0.05$),不同密度杉木林的活冠比没有显著性差异($P>0.05$)。4)林分密度对林分角尺度的影响显著($P<0.05$),对林分大小比数的影响不显著($P>0.05$)。综合林木生长和林分结构等 2 个方面,林分密度为 3 100 株 \cdot hm $^{-2}$ 的杉木人工林总体生长表现最好,具有培育速生、优质大径材的潜力,有利于形成稳定、可持续的人工林。

关键词:杉木人工林;林分密度;林分结构;林分生长

中图分类号:S791.27

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2023)06-0162-09

Differences in Stand Growth and Structure of *Cunninghamia lanceolata* Plantations With Different Densities

LU De-hao, CHEN Shi-qing, XIE Hui-yan, DENG Ning-long, FENG Ming-chun, LIN Na*

(South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

Abstract: The objectives of this study were to explore the differences in stand structure and growth of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations with different densities, so as to provide scientific basis for sustainable management of Chinese fir plantation. Three 11-year-old pure Chinese fir plantations with different densities (2 100, 3 100, 4 100 plants \cdot hm $^{-2}$) in Qingyuan City were selected as the research objects, and six fixed standard plots (20 m \times 20 m) were set for each density. Five parameters, including neighborhood comparison, angle index, diameter structure, tree height structure and crown structure were selected to investigate the characteristics of stand structure. The average DBH, average tree height, stock and volume per tree were selected to explore the growth characteristics of the stand, and the influences of stand density on the structure and growth were analyzed by ANOVA. The results showed that 1) the growth index of each stand was significantly affected by stand density ($P<0.05$). The average DBH, tree height and volume of the stands with density 4 100 plants \cdot hm $^{-2}$ were significantly lower than those of the stands

收稿日期:2022-05-29 修回日期:2022-10-31

基金项目:广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金项目(2021A1515011092)。

第一作者:卢德浩。研究方向:森林可持续经营。E-mail:875363261@qq.com

*通信作者:林娜,博士,硕士生导师。研究方向:森林经理。E-mail:nalin@scau.edu.cn

with density 2 100 and 3 100 plants \cdot hm $^{-2}$. The stock of the stands with density 3 100 plants \cdot hm $^{-2}$ was significantly higher than those of the other two density stands. 2) For the stand diameter structure and tree height structure, more small diameter trees were found in the stands with higher stand density, and the distribution curve showed a truncated normal distribution. 3) The average crown breadth of the stands with the density 3 100 plants \cdot hm $^{-2}$ was significantly larger than those of the other two density stands, and the average crown surface area and crown volume of the stands with density 4 100 plants \cdot hm $^{-2}$ were significantly smaller than those of the other two density stands. The canopy projection ratio and crown length of the three densities were significantly different ($P < 0.05$), but there was no significant difference in the live crown ratio between different densities ($P > 0.05$). 4) Stand density had a significant effect on stand angle index ($P < 0.05$), but had no significant effect on stand neighborhood comparison ($P > 0.05$). Considering the two aspects of tree growth and stand structure, the Chinese fir plantation with a stand density of 3 100 plants \cdot hm $^{-2}$ demonstrates the best overall growth performance, and has the potential to cultivate fast-growing and high-quality large-diameter trees, which is conducive to the formation of stable and sustainable plantations.

Key words: Chinese fir plantation; stand density; stand structure; stand growth

林分密度是森林经营过程中最直接的调控因子^[1-2],在促进林分的生长发育及提高林地的生产力水平中起到重要的作用^[3]。林分密度的变化会改变林木个体的生长空间环境与林分结构,影响林木早期生长、个体竞争与分化以及林分对光照、土壤养分和水分的利用能力^[4]。目前,国内外学者在研究林分密度对不同树种、林分结构、林分结构的影响主要集中在生长特征^[5-6]、木材性质^[7-8]、树冠结构^[9-10]、空间结构^[11-12]、胸径结构和树高结构^[13-14]、土壤理化性质^[15-16]等方面。研究结论一般为林分密度越大,对光照和土壤的竞争强度越大,抑制林木树冠延伸,从而加剧林分胸径和树高的分化程度,改变林分的生长环境及林木的空间分布,而合理的林分密度可以促进林分生长和优化林分结构。因此,结合林分的生长性状与结构表现,依照经营目标确定合理林分密度十分必要^[17]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国南方造林面积最大的用材树种之一,不仅在木材生产中发挥着巨大的经济效益,还在生态效益等方面起着重要作用^[18]。但由于密度过大致使许多杉木林林分结构不合理,导致生长发育受阻、生产力下降^[19],对杉木人工林进行以密度调控为主的合理抚育经营势在必行。因此,本试验在清远市选取2 100、3 100、4 100株 \cdot hm $^{-2}$ 的11年生杉木人工林作为研究对象,对3种不同密度的杉木人工林林分生长和林分结构的差异性进行分析,以期对杉木人工林的可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省杉木中心产区之一的清远

市,分别为清远市金鸡林场、清远市英德林场和清远市小龙林场。3个林场地处广东省西北部(112°13'01"—113°19'01"E,24°02'16"—24°54'16"N),均属亚热带气候,夏季盛行偏南的暖湿气流,冬季盛行干冷的偏北风,年均气温19.5℃,年降水量约为1 900 mm;土壤多为砂页岩发育而成的山地黄壤和红壤,质地以沙壤为主,土层厚度40 cm左右,腐殖质层1.5~5 cm,石砾含量20%左右,呈酸性。试验区内森林类型多为亚热带常绿阔叶林、针阔混交林等,森林资源丰富。所调查林分为2010年初定植的杉木人工纯林,伴生树种主要有马尾松(*Pinus massoniana*)、白花泡桐(*Paulownia fortunei*)、盐麸木(*Rhus chinensis*)、华润楠(*Machilus chinensis*)、鼠刺(*Itea chinensis*)等;灌木层主要有鲫鱼胆(*Maesa perlaris*)、五指毛桃(*Ficus hirta*)、鸭脚木(*Schefflera octophylla*)、箬叶竹(*Indocalamus longiauritus*)和白花悬钩子(*Rubus leucanthus*)等;草本层以金钗凤尾蕨(*Pteris fauriei*)、乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、半边旗(*Pteris semipinnata*)和兖州卷柏(*Selaginella involvens*)为主。

1.2 样地设置与野外调查

于2020年在清远市3个林场11年生杉木人工林中采用典型抽样,选取立地条件相似,林分密度分别为2 100、3 100、4 100株 \cdot hm $^{-2}$ 的小班,各设置6个20 m \times 20 m的样地,共18个样地(表1)。对样地中胸径 >5 cm的林木用皮尺测定相对位置和冠幅;用胸径尺测量胸径;测竿法测定树高和枝下高;用佳能相机(Canon 50D,日本)鱼镜头(Canon EF 8~15 mm f,日本)在每个样地随机选取3个点(间隔 >5 m)距地面50 cm处拍照,利用Gap Light

Analyzer (GLA) Version 2.0 (Simon Fraser University Forest Ecology and Management Labo, 加

拿大)分析照片得到林分郁闭度;并在每个密度的林分中各选取 3 株平均木做树干解析,共 9 株解析木。

表 1 样地概况

Table 1 Overview of the sample plots

林场	样地 编号	坐标	林分密度/ (株·hm ⁻²)	郁闭度	坡位	海拔	坡度	地貌类型	土壤类型	林下植被 Shannon-wiener 指数
金鸡林场	1	24°10′11″N 112°57′31″E	4 100	0.8	中	493	斜坡	山地	黄棕壤	1.898b
	2	24°10′10″N 112°57′31″E		0.8	上	504	陡坡	山地	黄棕壤	
	3	24°10′12″N 112°57′28″E		0.8	中	510	斜坡	山地	黄棕壤	
	4	24°10′11″N 112°57′27″E		0.9	中	527	斜坡	山地	黄棕壤	
	5	24°10′12″N 112°57′33″E		0.8	中	470	急坡	山地	黄棕壤	
	6	24°10′14″N 112°57′29″E		0.9	中	502	陡坡	山地	黄棕壤	
英德林场	7	24°02′26″N 113°18′57″E	3 100	0.7	中	64	陡坡	山地	黄壤	2.417a
	8	24°02′23″N 113°18′59″E		0.8	中	80	陡坡	山地	黄壤	
	9	24°02′20″N 113°19′01″E		0.8	上	129	陡坡	山地	黄壤	
	10	24°02′16″N 113°18′59″E		0.9	中	138	斜坡	山地	黄壤	
	11	24°02′17″N 113°18′58″E		0.9	上	142	斜坡	山地	黄壤	
	12	24°02′17″N 113°18′57″E		0.8	中	145	陡坡	山地	黄壤	
小龙林场	13	24°53′49″N 112°13′36″E	2 100	0.8	中	351	陡坡	山地	黄壤	2.011ab
	14	24°53′51″N 112°13′35″E		0.8	中	354	陡坡	山地	黄壤	
	15	24°53′50″N 112°13′34″E		0.8	中	348	陡坡	山地	黄壤	
	16	24°54′16″N 112°13′01″E		0.8	中	380	陡坡	山地	黄壤	
	17	24°54′17″N 112°13′02″E		0.9	中	374	陡坡	山地	黄壤	
	18	24°54′17″N 112°13′02″E		0.9	中	380	斜坡	山地	黄壤	

注:不同小写字母表示不同密度的林下植被 Shannon-wiener 指数差异显著($P<0.05$)。

1.3 林分生长指标计算

林分生长量可以反映一段时间内森林能够产出的木材量以及碳储量,是衡量森林生长数量和质量的重要指标之一,也是评估森林生产力、生态功能和衡量林分生长健康情况的重要一环^[20]。本研究用林分平均直径、树高、单株材积和蓄积生长量等来表示林分生长量。

林分平均胸径是反映林分中林木粗度的基本指标^[21],计算如式(1)所示

$$D_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (1)$$

式中: D_g 为林分平均胸径; d_i 为第 i 株林木的胸径; n 为林木总株数。

林分平均高是反映林分高度平均水平的测树指标^[22],其计算如式(2)所示

$$\bar{H} = \frac{\sum_{i=1}^k h_i G_i}{\sum_{i=1}^k G_i} \quad (2)$$

式中: \bar{H} 为林分平均高; h_i 为林分中第 i 径阶林木的算术平均高; G_i 为林分中第 i 径阶树木的胸高断面面积; k 为林分中径阶个数。

林分平均单株材积和蓄积生长量反映了森林资

源质量以及森林生产力大小,是判断森林经营水平的重要指标^[23]。林木的单株材积采用基于平均标准木的中央断面区分求积法推算,每个密度的杉木人工林取 3 株平均木的材积均值作为该密度林分的平均单株材积,解析木具体信息如表 2 所示。

表 2 9 株杉木解析木的基本信息

Table 2 Information of 9 analytic trees of Chinese fir

密度/ (株·hm ⁻²)	标准木 编号	树高/ m	胸径/ cm	枝下高/ m	材积/ m ³
4 100	1	7.2	8.1	3.9	0.017 1
	2	7.5	8.6	2.7	0.019 4
	3	8.2	8.3	3.4	0.026 9
3 100	4	10.8	11.7	5	0.041 1
	5	11.1	11.6	4.9	0.054 8
	6	10.9	11.8	4.2	0.050 8
2 100	7	10.4	11.8	2.3	0.050 9
	8	10.1	12.7	2.4	0.056 4
	9	9.7	12.1	5.2	0.047 9

蓄积量的计算则是根据平均单株材积乘上样地内的林木株数得出样地的蓄积,再根据样地面积换算得出每公顷蓄积。具体公式见式(3)、式(4)

$$V = \sum_{i=1}^n g_{i\frac{1}{2}} l + \frac{1}{3} g_n l_1 \quad (3)$$

$$M = N \times \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i \quad (4)$$

式中: n 为标准木株数; M 为林分蓄积量; N 为样地内林木总株数; V_i 为第 i 株标准木的材积; $g_{i\frac{1}{2}}$ 为第 i 区分段中央断面积; l 为区分段长度; g_n 为梢头木底断面积; l_1 为梢头长度; n 为区分段个数。

1.4 林分结构参数计算

1.4.1 林分直径结构和树高结构指标计算 林分结构是影响森林生态系统演替的重要因子,也是评价森林生态效益的重要因素之一,合理的林分结构有利于发挥森林生态系统的各项功能^[24]。其中,林分直径结构表示在林分内各种大小直径林木按径阶的分配状态^[25];树高结构与材积近似为一次关系,在重要性上仅次于林分直径结构,表示林分内不同树高大小的分配状态^[26]。本研究林分直径结构和树高结构的计算方法^[24-25]如下:胸径按 2 cm 径阶,树高按 2 m 组距将每一样地的直径、树高序列划分等级,分别统计各个等级的林木出现的频数,将频数除以总样木数转换成频率,得出林分径阶和树高级的频率分布,并作分布直方图表示。

1.4.2 树冠结构指标计算 树冠是反映树木长期生长、竞争水平及健康状态的重要指标之一,其大小直接影响树木的生长和树干形状^[27],其结构决定了树木生活力、生产力及生态效益的发挥^[28]。本研究采用平均冠幅(C_W)、活冠比(C_R)、冠长(C_L)、树冠投影比(C_{PR})、树冠体积(C_{SA})、树冠表面积(C_V)来表示树冠结构。其中平均冠幅、活冠比、冠长等表示在树冠水平或垂直平面的空间大小;树冠体积、表面积、树冠投影比等表示树冠的三维空间尺度^[29]。各指标的计算^[30]分别如式(5)~式(10)所示

$$C_W = (C_{Wew} + C_{Wsn}) / 2 \quad (5)$$

$$C_R = C_L / H \quad (6)$$

$$C_L = H - H_{CB} \quad (7)$$

$$C_{PR} = C_W / D_{BH} \quad (8)$$

$$C_{SA} = \pi \times C_W / 4 \times \sqrt{C_L^2 + C_W^2} / 4 \quad (9)$$

$$C_V = \pi \times C_{Wew} \times C_{Wsn} \times C_L / 12 \quad (10)$$

式中: C_{Wew} 、 C_{Wsn} 分别为东西向和南北向冠幅, H 为树高, D_{BH} 为胸径, H_{CB} 为枝下高。

1.4.3 林分空间结构参数计算 森林空间结构决定了林木之间的竞争势和空间生态位,对林分的稳定性、发展的可能性和经营空间的大小有着重要影响。在探究林分空间结构时,多数研究以树种混交程度、林分水平分布特征以及林木个体之间的竞争关系为主^[12]。但由于本研究对象为杉木人工纯林,不存在树种之间混交现象,因此仅选取大小比数、角尺度 2 个指标来描述林木的水平分布格局及竞争程度。

大小比数是评估林木在竞争单元中优势度的指

标^[31],计算公式如下

$$U_i = 1/n \sum_{j=1}^n K_{ij} \quad (11)$$

$$\bar{U} = 1/N \sum_{i=1}^n U_i \quad (12)$$

式中: U_i 为对象木 i 的大小比数; n 为相邻木的株数; K_{ij} 为离散变量,表示对象木 i 的胸径小于相邻木 j 时, $K_{ij} = 1$,否则 $K_{ij} = 0$; \bar{U} 为林分的平均大小比数; N 为林木的总株数。

角尺度是描述林木水平空间分布格局的重要参数^[32],计算公式如下

$$W_i = 1/n \sum_{j=1}^4 Z_{ij} \quad (13)$$

$$\bar{W} = 1/N \sum_{i=1}^N W_i \quad (14)$$

式中: W_i 是对象木 i 的角尺度; Z_{ij} 为离散型的变量,表示为当标准角 α_0 大于第 j 个角时, $Z_{ij} = 1$,否则 $Z_{ij} = 0$; \bar{W} 为林分平均角尺度。

1.5 数据处理与分析

数据的整理与计算在 Excel 2019 中进行,空间结构指数的计算在 Winkelmass 1.0(CAF,2008)中进行;用 Prism 8.0 画图软件做直径结构和树高结构的分布直方图及曲线图;用 SPSS 22.0 对林分生长指标和林分树冠结构、空间结构指数进行正态分布和方差齐性检验,经检验后数据满足方差分析的要求,采用单因素方差分析(ANOVA)和邓肯(Duncan)多重比较进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同密度杉木人工林林分生长差异分析

4 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的杉木人工林的平均胸径、平均树高和单株材积显著低于 2 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 和 3 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的林分($P < 0.05$),密度为 2 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的林分的平均胸径、平均树高和单株材积最高(13.3 cm、10.4 m、0.0517 m^3),3 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 林分的蓄积显著高于其他 2 种密度林分($P < 0.05$)(表 3)。

2.2 不同密度杉木人工林林分结构差异分析

2.2.1 不同密度杉木人工林直径结构和树高结构分析 2 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的径阶株数主要集中在 6~18 cm,其中在 14 cm 径阶的株数占比最高,4 cm 径阶的占比最低,呈偏右正态分布;3 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的径阶株数主要集中在 12 cm 径阶,呈近似正态分布;4 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的径阶株数主要集中在 4~16 cm,其中 10 cm 径阶占比最高,18 cm 径阶的占比最低,呈截尾正态分布(图 1a)。

3 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 和 2 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的杉木人工林树高分布集中在 10 m,呈近似正态分布;4 100 株 $\cdot \text{hm}^{-2}$ 的杉木人工林树高分布多为 6 m,呈截尾

正态分布。3 种密度杉木林树高分布曲线的总体峰度均偏大,树高分布曲线较为陡峭(图 1b)。

2.2.2 不同密度杉木人工林树冠结构分析 不同密度下杉木人工林的平均冠幅、树冠投影比、冠长、树冠表面积、树冠体积均呈现出差异显著性(表 4)。

其中 3 100 株·hm⁻² 的平均冠幅显著大于其他 2 种密度林分,3 种密度的树冠投影比和冠长均呈现显著差异($P<0.05$),4 100 株·hm⁻² 的树冠表面积和树冠体积显著小于其他 2 种密度($P<0.05$),不同密度杉木林的活冠比没有显著性差异。

表 3 杉木人工林林分生长各指标

Table 3 Growth indices of Chinese fir plantation

密度/(株·hm ⁻²)	平均胸径/cm	平均树高/m	单株材积/m ³	蓄积/(m ³ ·hm ⁻²)
2 100	13.3±0.4a	10.4±0.3a	0.0517±0.0020a	106.48±7.19b
3 100	12.1±0.3a	10.1±0.4a	0.0489±0.0033a	148.53±7.23a
4 100	9.4±0.4b	7.3±0.3b	0.0211±0.0024b	91.49±6.34b

注:不同小写字母表示不同密度林分生长指标差异显著($P<0.05$)。

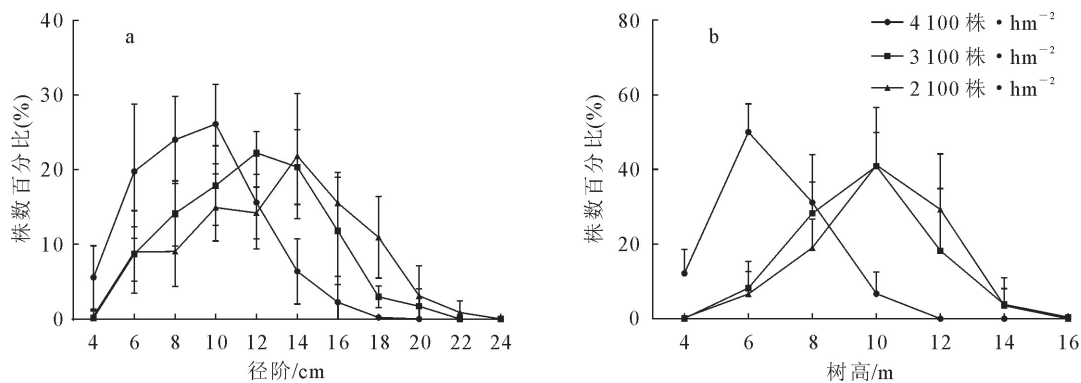


图 1 不同密度杉木人工林林木直径结构和树高结构

Fig. 1 Diameter structure and height structure of Chinese fir with different densities

表 4 杉木人工林树冠结构

Table 4 Canopy structure of Chinese fir plantation

密度/(株·hm ⁻²)	平均冠幅/m	活冠比	冠长/m	树冠投影比	树冠表面积/m ²	树冠体积/m ³
2 100	2.10±0.05ab	0.51±0.30a	5.22±0.02a	0.17±0.01c	18.80±1.42a	7.37±0.77a
3 100	2.22±0.09a	0.42±0.14a	4.14±0.03b	0.20±0.01b	15.80±0.70a	6.52±0.49a
4 100	1.89±0.04b	0.44±0.04a	3.07±0.02c	0.22±0.01a	10.29±0.81b	3.43±0.34b

注:不同小写字母表示不同密度林分之间树冠结构因子差异显著($P<0.05$)。

2.2.3 不同密度杉木人工林空间结构分析 3 种密度杉木人工林角尺度一元分布特征整体服从正态分布(图 2a),从各个密度在 5 种分布状态($W_i=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1$)的频率分布可以看出, $W_i=0$ 和 $W_i=1$ 的分布概率值都 $<10\%$,这表明在这 3 个密度中,处于绝对均匀和绝对不均匀的结构单元较少。角尺度在 0.25、0.5 和 0.75 的取值的分布较多,其中 3 个密度杉木人工林的角尺度取值为 0.5 的概率在所有分布状态中均占比最高,表明大多数的结构单元都处于随机分布状态。不同密度杉木林林分平均胸径大小比数的一元分布频率在各个等级中较为平均(图 2b),均趋近于 20%,其中密度为 2 100 株·hm⁻² 的大小比数在 0.25 的取值最大,密度为 3 100 株·hm⁻² 在 0.5 的取值最大,密度为 4 100 株·hm⁻² 在 0.00 的取值最大,占比分别为 21.53%、21.53%、21.24%。

不同密度下的杉木人工林的角尺度差异显著(表 5),其中 2 100 株·hm⁻² 的林分角尺度显著大于 3 100 株·hm⁻² 的林分角尺度($P<0.05$),4 100 株·hm⁻² 的林分角尺度与其他 2 种密度的林分无显著差异($P>0.05$)。3 100 株·hm⁻² 的杉木人工林角尺度为 0.501 2,说明该密度杉木人工林整体分布格局属随机分布,2 100 株·hm⁻² 和 4 100 株·hm⁻² 的角尺度在 0.52~0.55,属于聚集分布。不同密度杉木人工林的胸径大小比数无显著差异,大小排序为密度 3 100 株·hm⁻² (0.493 1) $>$ 4 100 株·hm⁻² (0.489 6) $>$ 2 100 株·hm⁻² (0.488 6)。

3 结论与讨论

3.1 结论

本研究通过对清远市 3 种密度 11 a 杉木人工林林分生长特征和林分结构的差异性进行探讨,得

出:1)不同密度杉木人工林林分平均胸径、树高、单株材积、平均冠幅、树冠表面积和树冠体积的差异显著,其中低密度杉木人工林的生长状况和树冠结构更好,说明减小密度可以降低树冠间的竞争强度,促进树冠向外伸展,有利于形成饱满树冠以利用更多的空间资源,促进林分的生长发育。2)杉木人工林直径结构和树高结构在较大的林分密度下,小径级的林木居多,其分布曲线呈现为截尾正态分布;较小密度下则以大、中径级的林木为主。因此,若经营目

的为培育大、中径材林,造林密度要适当低一些,若培育短周期工业用材林则密度可相对较高。3)林分密度对林分平均角尺度的影响显著,较低密度的杉木人工林整体分布格局属随机分布,较高密度的林分属于轻度聚集分布。随着林分年龄的增长、林木内部微环境的变化,要及时对林分进行密度调整,释放生长空间,促进林分胸径生长和林下植被发育,有利于提升人工林林分稳定性。

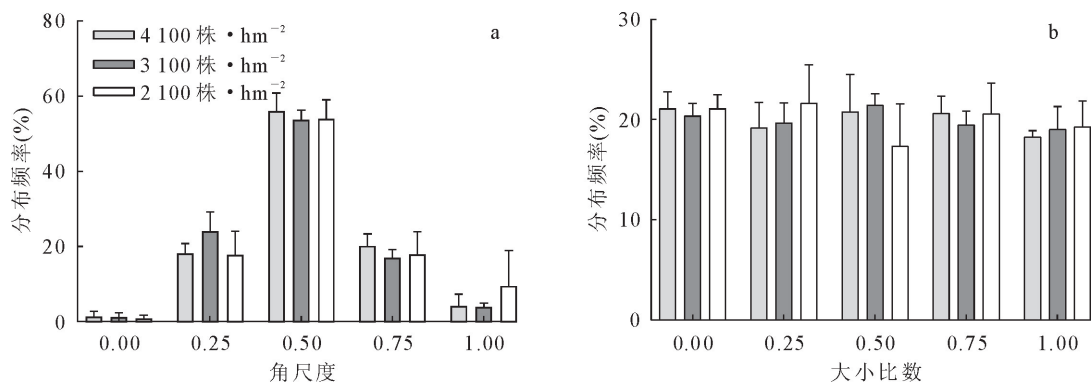


图 2 不同密度杉木人工林平均大小比数和角尺度分布

Fig. 2 Average neighborhood comparison and uniform angle index of Chinese fir plantations with different densities

表 5 不同密度杉木人工林林分空间结构指数差异

Table 5 Differences in spatial structure index of Chinese fir plantations with different densities

密度/(株·hm ⁻²)	角尺度	大小比数
2 100	0.544 0±0.020 5a	0.488 6±0.005 1a
3 100	0.501 2±0.007 2b	0.493 1±0.005 0a
4 100	0.525 8±0.000 0ab	0.489 6±0.003 7a

注:不同小写字母表示不同密度林分之间空间结构指数差异显著($P<0.05$)。

3.2 讨论

密度影响杉木人工林的林分平均胸径、树高、单株材积和平均冠幅、树冠表面积、树冠体积(表 3 和表 4),表明杉木人工林各生长指标间存在密度效应。研究结果显示,4 100 株·hm⁻² 的杉木人工林林分平均胸径、单株材积、平均冠幅、树冠表面积和树冠体积显著低于其他 2 种密度($P<0.05$)。其原因在于在密度较小的林分,林木的枝干能够获得充足的伸展空间和较好的光照条件,故可以促进胸径和树冠的生长;而在密度较大的林分中林木对土壤养分、水分以及光照等营养成分的激烈竞争,使得林木个体的生长相对减弱,这与密度竞争效应的一般规律相似^[33]。密度对单株材积的影响和对胸径的影响可认为是一致的,林分密度对林木单株材积生长的影响主要取决于其胸径^[33]。而林分平均树高对林分密度的响应机制比较复杂,以往的研究结论也并不一致。一些学者认为,林分密度对树高生长

影响较小,和林分的其他生长指标相比可认为是不受林分密度的影响^[34-35];而有些学者则认为林分平均树高随着密度的增大呈现降低的趋势^[2,36]。本研究中 4 100 株·hm⁻² 的杉木人工林林分平均树高显著低于其他 2 种密度($P<0.05$),与张健强等^[37]对华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)的研究结果一致。这可能是由于密度过大的林分树冠发育程度较低(4 100 株·hm⁻² 的林分平均冠幅为 1.89 m、树冠表面积为 10.29 m²、树冠体积为 3.43 m³,在 3 种密度林分中均最小),树木对光的利用和捕获潜力弱,导致树高增长缓慢^[38]。

林分蓄积量主要由树高、胸径和林木株数共同决定。密度的降低可以促进林木个体的生长,提高单株材积,但林分活立木株数也会减少。密度的改变导致林分蓄积的变化量取决于活立木株数损失蓄积量与单位面积蓄积量增量的相对差值^[39]。在本研究中,3 100 株·hm⁻² 的林分蓄积最大(148.53 m³/hm²),且显著大于 2 100 株·hm⁻² (106.48 m³/hm²)和 4 100 株·hm⁻² (91.49 m³/hm²)($P<0.05$),这与田新辉^[40]在 107 杨(*Populus × euramericana* ‘Neva’)的研究结论一致。此外,4 100 株·hm⁻² 的杉木人工林的直径和树高结构呈现截尾正态分布(图 1),这表明密度大的林分中,林木个体对营养空间的竞争激烈,大多数林木无法得到充分生长,导致小径级林木较多,符合人工林林分结构

分布规律,这也与以往的研究结论一致^[30,37]。

林分密度对研究区杉木人工林林分空间结构有着重要的影响,其中林分平均角尺度在 3 个密度下呈一定的差异性(表 5)。3 100 株·hm⁻² 林分的平均角尺度为 0.501 2,从均值上看该密度下的杉木林整体分布格局属随机分布,另外 2 种密度杉木林的平均角尺度均在 0.52~0.55,属于轻度聚集分布,三者间存在显著性差异。而有学者认为,在 2 500~5 200 株·hm⁻² 的密度范围内,油松飞播林的林分平均角尺度随着林分密度增大逐渐由随机分布向均匀分布发展^[41];也有学者认为,在 800~3 000 株·hm⁻² 的范围内,云杉人工林林分平均角尺度随着密度的增大而减小^[42];还有学者认为,在 1 600~3 100 株·hm⁻² 的区间内,杉木人工林林分平均角尺度先随着密度的增大而增大,但在 2 400 株·hm⁻² 时出现拐点,随着密度的增大林分平均角尺度开始减小^[13]。导致这些结论不同的原因一方面可能是不同的立地条件或不同树种对林分密度的适应性相异;另一方面可能是在不同密度区间范围内,林分平均角尺度表现的差异性不同,密度较大的人工林经过二三十年的生长、自然稀疏和经营,其水平格局大部分仍处于均匀的状态^[43]。因此,在对人工林结构进行优化经营时应优先将角尺度小的林木作为间伐对象,避免林木单侧的聚集分布,促使林分向天然林的结构特征演变^[44]。

参考文献:

- [1] 韩金,王新杰,张鹏,等.不同立地条件下杉木径生长过程研究[J].山东农业大学学报:自然科学版,2019,50(5):768-773.
HAN J, WANG X J, ZHANG P, et al. Study on the growth process of *Cunninghamia lanceolata* diameter under different site conditions[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition, 2019, 50(5): 768-773. (in Chinese)
- [2] 童书振,盛炜彤,张建国.杉木林分密度效应研究[J].林业科学研究,2002,15(1):66-75.
TONG S Z, SHENG W T, ZANG J G. Studies on the density effects of Chinese fir stands[J]. Forestry Research, 2002, 15(1): 66-75. (in Chinese)
- [3] 吴海平,孙清琳,张彦君,等.不同密度油松人工林群落特征与物种多样性耦合关系[J].西北林学院学报,2022,37(5):1-8.
WU H P, SUN Q L, ZHANG Y J, et al. Coupling relationship between community characteristics and species diversity of *Pinus tabulaeformis* plantations with different densities[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(5): 1-8. (in Chinese)
- [4] 欧建德.造林密度对苗木杉生长形质及林分分化的影响[J].东北林业大学学报,2018,46(1):7-11.
OU J D. Effect of planting density on growth, form quality and stand differentiation of *Cunninghamia konishii* plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2018, 46(1): 7-11. (in Chinese)
- [5] 李华福,谭文玮,刘斌,等.不同抚育间伐强度对杉木林生长的影响[J].安徽农业科学,2022,50(5):105-108.
LI H F, TAN W W, LIU B, et al. Effects of different tending and thinning intensities on the growth of *Cunninghamia lanceolata* forests[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2022, 50(5): 105-108. (in Chinese)
- [6] CHERNOGAEVA G M, KUZNETSOVA V V, KUKHTA A E. Precipitation effects on the growth of boreal forest stands in the volga region[J]. Russian Meteorology and Hydrology, 2020, 45(12): 851-857.
- [7] 张晓文,于青君,张卫强,等.不同树龄油松建筑材林木材性质及生长过程研究[J].中南林业科技大学学报,2020,40(6):122-131.
ZHANG X W, YU Q J, ZHANG W Q, et al. Study on wood physical properties and growth process of different tree age of *Pinus tabulaeformis* building timber forest[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(6): 122-131. (in Chinese)
- [8] 高建亮,赵林峰.30 a 杉木萌生林和实生林木材的材性比较[J].东北林业大学学报,2020,48(4):93-97,119.
GAO J L, ZHAO L F. Wood properties comparison of *Cunninghamia lanceolata* between coppice and 30-a seedling stand[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(4): 93-97, 119. (in Chinese)
- [9] 魏晓慧,孙玉军,黄冬辉.马尾松人工林树冠结构研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(11):125-130,138.
WEI X H, SUN Y J, HUANG D H. Study on crown structure for Masson pine plantation[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2012, 40(11): 125-130, 138. (in Chinese)
- [10] 马载阳,张怀清,李永亮,等.基于空间结构的杉木树冠生长可视化模拟[J].林业科学研究,2018,31(4):150-157.
MA Z Y, ZHANG H Q, LI Y L, et al. Visual simulation of Chinese fir crown growth based on spatial structure[J]. Forestry Research, 2018, 31(4): 150-157. (in Chinese)
- [11] WAN P, ZHANG G Q, WANG H X, et al. Impacts of different forest management methods on the stand spatial structure of a natural *Quercus aliena* var. *acuteserrata* forest in Xiaolongshan, China[J]. Ecological Informatics, 2019, 50: 86-94. (in Chinese)
- [12] 黄晓霞,尤美子,徐伟涛,等.目标树经营对杉木人工林林分空间结构的影响[J].森林与环境学报,2022,42(2):131-140.
HUANG X X, YOU M Z, XU W T, et al. Influence of target tree management on the spatial structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation[J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 131-140. (in Chinese)
- [13] 冯宜明,李毅,曹秀文,等.甘肃南部不同密度云杉人工幼林的林分结构特征及土壤理化性质[J].林业科学,2018,54(10):20-30.
FENG Y M, LI Y, CAO X W, et al. Characteristics of stand structure and soil physicochemical properties of artificial young *Picea asperata* plantation with different densities in southern Gansu[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2018, 54(10): 20-

30. (in Chinese)
- [14] 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, 14.
ZHANG P, WANG X J, HAN J, *et al.* Short-term effect of thinning on the growth of Chinese fir plantation[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2016, 44(2): 6-10, 14. (in Chinese)
- [15] HAN C, LIU Y J, ZHANG C K, *et al.* Effects of three coniferous plantation species on plant-soil feedbacks and soil physical and chemical properties in semiarid mountain ecosystems[J]. Forest Ecosystems, 2021, 8(1): 22-34. (in Chinese)
- [16] 曹小玉,李际平. 杉木林土壤有机碳含量与土壤理化性质的相关性分析[J]. 林业资源管理, 2014(6): 104-109.
CAO X Y, LI J P. Contents of soil organic carbon and its relations with soil physicochemical properties in Chinese fir plantations[J]. Forest Resources Management, 2014(6): 104-109. (in Chinese)
- [17] 王翰琛,张雄清,张建国,等. 杉木人工林不同密度间伐林分生长优势的变化规律分析[J]. 林业科学研究, 2021, 34(5): 32-38.
WANG H S, ZHANG X Q, ZHANG J G, *et al.* Variation of growth dominance in thinned Chinese fir stands with different planting densities[J]. Forest Research, 2021, 34(5): 32-38. (in Chinese)
- [18] 沙子舟,范少辉,冯随起,等. 不同强度修枝对杉木人工林生长的影响[J]. 西北林学院学报, 2022, 37(1): 131-136.
SHA Z Z, FAN S H, FENG S Q, *et al.* Effects of different pruning intensities on the growth of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2022, 37(1): 131-136. (in Chinese)
- [19] 夏丽丹,于姣姐,邓玲玲,等. 杉木人工林地力衰退研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(2): 37-42.
XIA L D, YU J D, DENG L L, *et al.* Research progress on fertility decline of Chinese fir plantation[J]. World Forestry Research, 2018, 31(2): 37-42. (in Chinese)
- [20] 卢婧,冯仲科. 运用随机森林模型对北京市林分蓄积生长量的预测[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(5): 7-11.
LU J, FENG Z K. Forecast of stand volume growth in Beijing by using random forest[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(5): 7-11. (in Chinese)
- [21] 刘雨霞. 用 EXCEL 计算林分平均胸径[J]. 林业科技情报, 2013, 45(1): 32-34.
LIU Y X. Calculating stand average diameter using EXCEL[J]. Forestry Science and Technology Information, 2013, 45(1): 32-34. (in Chinese)
- [22] 周生祥. 林分平均树高的求算与分析[J]. 华东森林经理, 1989(3): 37-45.
- [23] KIMBERLEY M, WEST G, DEAN M, *et al.* The 300 index-a volume productivity index for radiata pin[J]. New Journal of Forestry, 2005, 50(2): 13-18.
- [24] 赵中华,惠刚盈. 林分结构多样性研究进展[J]. 林业科学, 2020, 56(9): 143-152.
ZHAO Z H, HUI G Y. Advances in structural diversity of stand structure[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2020, 56(9): 143-152. (in Chinese)
- [25] 张祥宇,包倪雯,刘丽婷,等. 桉树人工林林分结构特征及调控技术研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 45-51.
ZHANG X Y, BAO N W, LIU L T, *et al.* Structural characteristics and control techniques of *Eucalyptus* stand[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 45-51. (in Chinese)
- [26] 陈哲,魏浩亮,周庆营,等. 抚育间伐对华北落叶松人工林林分结构的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(5): 54-64.
CHEN Z, WEI H L, ZHOU Q Y, *et al.* Influence of tending and thinning on the stand structure of *Larix principis-rupprechtii* plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2022, 42(5): 54-64. (in Chinese)
- [27] 苏乙奇. 人工落叶松枝下高动态研究[J]. 林业调查规划, 2008(1): 21-24.
SU Y Q. Dynamic study on under branch height of artificial *Larix gmelinii*[J]. Forest Inventory and Planning, 2008(1): 21-24. (in Chinese)
- [28] 李广德,张亚雄,付海曼,等. 三倍体毛白杨无性系 B301 幼树树冠结构特征研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(3): 94-101, 127.
LI G D, ZHANG Y X, FU H M, *et al.* Effects of clone and planting spacing on growth and morphological traits of poplar plantations[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(3): 94-101, 127. (in Chinese)
- [29] 包倪雯,张水花,莫晓勇. 乔木树种树冠结构研究综述[J]. 桉树科技, 2021, 38(1): 68-74.
BAO N W, ZHANG S H, MO X Y. Overview of tree crown structures[J]. Eucalypt Science & Technology, 2021, 38(1): 68-74. (in Chinese)
- [30] 张艳华,方升佐,田野,等. 无性系和株行距对杨树人工林生长和树冠结构的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, 40(5): 13-19, 94.
ZHANG Y H, FANG S Z, TIAN Y, *et al.* Effects of clone and planting spacing on growth and morphological traits of poplar plantations[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, 40(5): 13-19, 94. (in Chinese)
- [31] 赵中华,惠刚盈,胡艳波,等. 基于大小比数的林分空间优势度表达方法及其应用[J]. 北京林业大学学报, 2014, 36(1): 78-82.
ZHAO Z H, HUI G Y, HU Y B, *et al.* Method and application of stand spatial advantage degree based on the neighborhood comparison[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(1): 78-82. (in Chinese)
- [32] 惠刚盈. 角尺度——一个描述林木个体分布格局的结构参数[J]. 林业科学, 1999(1): 39-44.
HUI G Y. The neighbourhood pattern—a new structure parameter for describing distribution of forest tree position[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1999(1): 39-44. (in Chinese)
- [33] 徐勃,张仕清. 同仁地区青杨速生丰产林几种常用造林密度对生长的影响[J]. 青海大学学报: 自然科学版, 2002, 20(2): 8-10.
XU B, ZHANG S Q. Effect of several afforestation densities of cathay coplar fast-growing and heavy bearing to their growing in Tongren region[J]. Journal of Qinghai University: Natural Science Edition, 2002, 20(2): 8-10. (in Chinese)

- [34] 张连翔,黄丽华,李杰. 林木胸径与材积的关系: Logistic 衍生模型[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(2): 99-101.
ZHANG L X, HUANG L H, LI J. Relationship between diameter at breast height and volume of forest-tree: Logistic derivation model[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001, 29(2): 99-101. (in Chinese)
- [35] 丁贵杰,周政贤. 马尾松不同造林密度和不同利用方式经济效益分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 1996, 20(2): 24-29.
DING G J, ZHOU Z X. The economic results analysis on masson pine at various planting density and utilization ways [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 1996, 20(2): 24-29. (in Chinese)
- [36] 丁贵杰,周政贤,严仁发,等. 整地方式对杉木生长和经济效益的影响[J]. 林业科学研究, 1997, 10(2): 118-124.
DING G J, ZHOU Z X, YAN R F, *et al.* Study on the effect of soil preparation on growth and economic benefits of Chinese fir[J]. Forest Research, 1997, 10(2): 118-124. (in Chinese)
- [37] 张健强,尹振海,李学营,等. 华北落叶松人工林林分密度与生长因子的关系研究[J]. 河北林果研究, 2013, 28(2): 109-112.
ZHANG J Q, YI Z H, LI X Y, *et al.* Study on relationship of forest density and growth factor of *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2013, 28(2): 109-112. (in Chinese)
- [38] 王慧,郭晋平. 我国森林抚育间伐研究进展[J]. 山西林业科技, 2008(2): 29-32.
WANG H, GUO J P. China's forests thinning experiment and research progress[J]. Shanxi Forestry Science and Technology, 2008(2): 29-32. (in Chinese)
- [39] 田新辉,孙荣喜,李军,等. 107 杨人工林密度对林木生长的影响[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 184-188.
TIAN X H, SUN R X, LI J, *et al.* Effects of stand density on growth of *Populus × euramericana* 'Neva' plantations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(3): 184-188. (in Chinese)
- [40] 徐慧兰,颜培栋,杨章旗. 造林密度对 15 年生马尾松生长和材性的影响[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 505-511.
XU H L, YAN P D, YANG Z Q. Effects of planting density on wood growth and properties of 15-year-old *Pinus massoniana* [J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5): 505-511. (in Chinese)
- [41] 陶观护,卜元坤,薛卫鹏,等. 不同密度油松飞播林灌草多样性与林分空间结构关系[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(2): 171-177.
TAO G H, BU Y K, XUE W P, *et al.* Relationship between understory diversity and stand spatial structure in air-drilled *Pinus tabulaeformis* forests of different densities. [J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(2): 171-177. (in Chinese)
- [42] 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: 43-44.
- [43] 赵中华,袁士云,惠刚盈,等. 经营措施对林分空间结构特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2008(7): 135-142.
ZHAO Z H, YUAN S Y, HUI G Y, *et al.* Impacts of different management measures on spatial structure characteristics[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Sciences Edition, 2008(7): 135-142. (in Chinese)
- [44] 董灵波,刘兆刚. 樟子松人工林空间结构优化及可视化模拟[J]. 林业科学, 2012, 48(10): 77-85.
DONG L B, LIU Z G. Visual Management simulation for *Pinus sylvestris* var. *mongolica* plantation based on optimized spatial structure[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2012, 48(10): 77-85. (in Chinese)