

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.02.008

不同良种与初植密度杉木林分密度指标动态特征

李晓燕¹, 段爱国^{1*}, 张建国^{1,2}, 赵世荣³, 冯随起³

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 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; 3. 福建省邵武卫闽国有林场, 福建 邵武 354006)

摘要: [目的] 探讨不同良种和初植密度杉木林分密度指标的动态特征, 筛选适宜于杉木林分的密度指标, 为杉木人工林密度管理提供依据。[方法] 利用 8 年生杉木良种和密度互作试验林逐年定位观测数据, 分析树冠竞争因子 (CCF)、林分密度指数 (SDI)、优势高一营养面积比 (Z) 这 3 个林分密度指标在不同良种和不同初植密度下的动态变化规律, 并进行密度指标对初植密度和林龄的线性回归分析。[结果] 在相同良种水平、不同初植密度下, 3 种林分密度指标随林龄增长的动态变化规律一致, 均为随林龄增加而增大, 低初植密度下, 密度指标随林龄增长拟合直线斜率较小, 随初植密度增大, 拟合直线斜率增大, 反映初植密度越大的林分对林木间竞争激烈程度的影响更强; 同一林龄下, 均随密度增大而增大, 不同密度间差异达极显著水平; 在相同初植密度、不同良种水平下, 3 种密度指标的良种效应差异均不显著, 且不存在良种和初植密度的交互作用。[结论] 3 种林分密度指标在一定程度上可以反映密度信息, 在 5000~6667 株·hm⁻² 的密度范围内, CCF 和 SDI 在不同密度间差异均未达显著水平, 此密度范围内难以体现不同密度之间的差别, 而 Z 在研究设置的整个密度范围内不同密度间差异均达显著水平, 能明显表示出不同密度之间的差别, 适用的密度范围更广, 且不含参数, 计算简单, 可以很好地用于杉木人工林分生长模拟和密度管理。

关键词: 杉木; 良种; 初植密度; 树冠竞争因子; 林分密度指数; 优势高一营养面积比

中图分类号: S753.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)02-0072-09

林分密度是反映林木间拥挤程度及林木对其所占空间利用程度的指标, 是影响林分生长和木材产量的重要因素。在整个森林培育过程中, 密度控制是可人为干扰调控的重要手段, 通过人为干预进行密度控制, 使森林在整个生长过程中都能保持最佳密度, 以获得更多的木材产量, 提高人工林的生产力和森林稳定性, 使森林发挥更大的经济、生态和社会功能。因此林分密度问题是林学家们关注的重要问题之一, 如何控制和调整林分密度也成为森林经营者关心的重要问题^[1-2]。

林分密度大小取决于单位面积上的林木株数、林木大小以及林木在林地上的空间分布情况^[3]。为此林业工作者从树冠、胸径、树高、单位面积株数等测量因子角度出发进行研究, 针对不同树种、立地条件、培育目标、林分生长发育阶段等提出了许多衡量、评定密度的指标——林分密度指标。目前的密度指标主要包括株数密度、林分断面积、蓄积量、郁闭度、疏密度、林分密度指数^[4]、树冠竞争因子^[5]、优势高一营养面积比^[6]、冠积指数^[7]等。前人研究表明优良的林分密度指标应具备如下几个

收稿日期: 2020-03-20 修回日期: 2020-05-05

基金项目: 国家“十二五”科技计划课题“杉木速生丰产林定向培育技术研究 (2015BAD09B0101)”、国家“十三五”重点研发计划课题“杉木速生材高效培育技术研究 (2016YFD0600302)”、国家自然科学基金面上项目“不同气候区杉木人工成熟林生态系统碳储量格局及其密度效应” (31570619)

* 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

条件: (1) 计算简单; (2) 容易测定; (3) 与年龄和立地无关; (4) 与林分生长量密切相关^[8]。而满足以上全部标准的指标较少, 在实际应用时要根据培育目的、林分年龄、立地条件等进行选择^[9], 每个密度指标因其相关的林分变量不同都有其各自的适用范围, 而对于不同培育措施条件下的林分, 由于生长与竞争过程的变化, 不同密度指标的指示性可能会存在一定的动态差异。为此, 本研究首次利用不同良种和不同初植密度两因素处理下的 8 年生杉木人工林连年调查数据, 选取与树冠直径、胸径、优势木高有关的 3 个密度指标, 树冠竞争因子 (*CCF*)、林分密度指数 (*SDI*)、优势高—营养面积比 (*Z*), 探讨这 3 个林分密度指标在杉木幼龄期不同良种和不同初植密度下的动态变化规律及其互作效应, 并进行密度指标对初植密度和林龄的线性回归分析, 根据动态变化规律和回归分析, 对 3 个林分密度指标作出比较, 筛选适宜于杉木林分密度效应描述的合理密度指标, 为杉木人工林密度管理提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况和样地设置

试验地设置在福建省邵武卫闽国有林场 (27°05' N, 117°43' E), 气候温暖湿润, 属亚热带季风气候。地貌主要为低山高丘, 海拔 250~700 m, 坡度 25°~35°。本地区年均气温 17.7 °C, 年均降水量 1 768 mm, 年均蒸发量 1 283 mm, 年均相对湿度 82% 左右。母岩为花岗岩, 土壤类型为山地红壤。地带性植被类型为常绿阔叶林, 林下植物主要有木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.), 中华杜英 (*Elaeocarpus chinensis* (Gardn. et Champ.) Hook. f. ex Benth.), 狗脊蕨 (*Woodwardia japonica* (L. f.) Sm.), 芒萁 (*Dicranopteris dichotoma* (Thunb.) Berhn.), 乌毛蕨 (*Blechnum orientale* Linn.), 扇叶铁线蕨 (*Adiantum flabellulatum* Linn.) 等。

造林材料为福建省邵武卫闽国有林场杉木第 1 代和第 3 代种子园自由授粉种子播种苗, 试验地前茬为 1 代杉木纯林, 造林前炼山整地, 试验林于 2012 年春采用 1 年生杉木裸根苗营造, 造林时施基肥, 每穴 0.5 kg 复合肥, 后期未再施肥, 也无间伐、修枝等干扰。试验采用不同世代良种和初植密度两因素完全随机区组设计, 各区组分别位于上、中、下坡, 包括 2 个良种水平, 分别为经省级

林木良种委员会审定的第 1 代种子园良种和第 3 代种子园良种, 4 种初植密度, 分别为 1 667、3 333、5 000、6 667 株·hm⁻² (株行距分别为 2.0 m × 3.0 m、2.0 m × 1.5 m、2.0 m × 1.0 m、1.0 m × 1.5 m), 重复 3 次, 共 24 块样地, 每块样地面积为 600 m² (20 m × 30 m)。样地中每木编号并挂牌标识, 并在每个样地四周各设有 2 行同样密度的杉木保护带。

1.2 林分调查及数据处理

从 2012 年造林当年起, 于每年年底林木停止生长后, 采用测高杆、胸径尺等工具进行林分调查。2—4 年生时, 每年测定每木树高, 并在每个样地的上、中、下各选 2 株优势木, 6 株优势木平均作为林分优势木平均高; 5 年生开始, 每年测量每木树高、优势木高、胸径、冠幅。利用 Excel 软件统计每块样地林分平均冠幅、平均胸径、林分优势木平均高, 进而计算各种林分密度指标值。用 SPSS Statistics 25.0 软件对统计数据进行分析、多重比较 (Duncan 检验), 并分良种水平进行 3 种林分密度指标对初植密度和林龄的二元线性回归分析, 用 Origin 9.1 软件绘图。

1.3 方法

1.3.1 树冠竞争因子 (*CCF*) 树冠竞争因子 (*CCF*) 是 Krajicek 等根据某一直径林木树冠投影面积与相同直径疏开木的最大树冠面积成比例的假设提出来的, 其含义是林分中所有树木可能拥有的潜在最大树冠面积之和与林地面积的比值^[5]。其中潜在树冠面积常用疏开木或者优势木的冠幅来代替^[10], 一株林木所利用的生长发育空间, 可以使用与相同胸径疏开木的平均树冠投影面积代表, 称作最大树冠面积 (*MCA*)^[11]。自由树冠幅是通过与胸径的回归关系得到, 很多研究表明冠幅与胸径呈线性相关^[12-14], 这种线性关系不随林木的年龄及立地条件的变化而改变, 因此可用林木胸径推算林冠面积。

树冠竞争因子的计算方法如下: (1) 将本试验中初植密度为 1 667 株·hm⁻² 试验林分中的林木近似作为孤立木, 并将其冠幅 (*CW*) 与胸径 (*D*) 进行线性回归, 得到冠幅与胸径的线性回归方程为 $CW = 0.744 + 0.144 D$, 计算结果表明杉木冠幅与胸径之间呈线性相关, 且相关极显著; (2) 计算实际林分中胸径为 *D* 的单木的潜在最大树冠面积 (*MCA_i*), $MCA_i = \pi/4 (CW_i)^2 = \pi/4 (a+bD_i)^2$; (3) 将单位面积林分中所有单木的 *MCA_i* 值累加得林分的 *CCF* 值为:

$$CCF = \frac{\sum_{i=1}^N MCA_i}{S} \times 100 = \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\pi}{4} (a + bD_i)^2 \right)}{S} \times 100 \quad (1)$$

式中： CW 为冠幅； D 为胸径； MCA 为潜在最大树冠面积； S 为样地面积。

CCF 是一个以直径结构、直径和冠幅相互关系为基础的相对密度指标，能较直观地反映林木树冠对空间竞争的激烈程度。 CCF 值越大表明林分竞争激烈程度越大。

1.3.2 林分密度指数 (SDI) 林分密度指数是林分在标准平均胸径时所具有的单位面积株数^[3]。1933年美国学者 Reineke 在对不同树种、完满立木度、未经间伐的同龄林分的调查研究中发现，单位面积株数与林分平均胸径之间呈线性关系，将每公顷林木株数作为平方平均直径的函数，并提出： $\log N = -\beta \log D_g + k$ ，这条直线称自稀疏线或最大密度线^[4]，根据最大密度线公式和林分密度指数定义，导出：

$$SDI = N(D_g/D_0)^\beta \quad (2)$$

式中： N 为每公顷株数； D_g 为平方平均直径； D_0 为标准平均直径，我国杉木一般取 20 cm^[15]； β 为林分的自然稀疏率。根据林分密度指数定义，计算林分总树冠投影面积，并与林地面积比较，分析得 5 年生时林分基本郁闭成林，利用 5—8 年间共 72 组样本点 ($N-D_g$) 数据拟合自稀疏斜率，得 $\beta = 1.588$ ，将 β 、 D_0 值代入式 (2) 中，得：

$$SDI = N(D_g/20)^{1.588} \quad (3)$$

SDI 是林分平均胸径和株数的综合指标，它既能表示林分株数的多少，又能反映林木的大小，而且测定容易，便于应用，是众多林分密度指标中评价最高、应用最多的测度指标之一^[16]。

1.3.3 优势高—营养面积比 (Z) 刘金福等^[6]提出，采用相对植距的倒数，将植距改为营养面积，即林分优势木平均高和林木平均营养面积的比值，简称优势高—营养面积比 (Z)，作为一个新的林分密度指标。公式为：

$$Z = NH_D/10\,000 \quad (4)$$

式中： N 为每公顷株数； H_D 为林分优势木平均高。

2 结果与分析

2.1 密度指标随林龄、密度、良种的变化规律

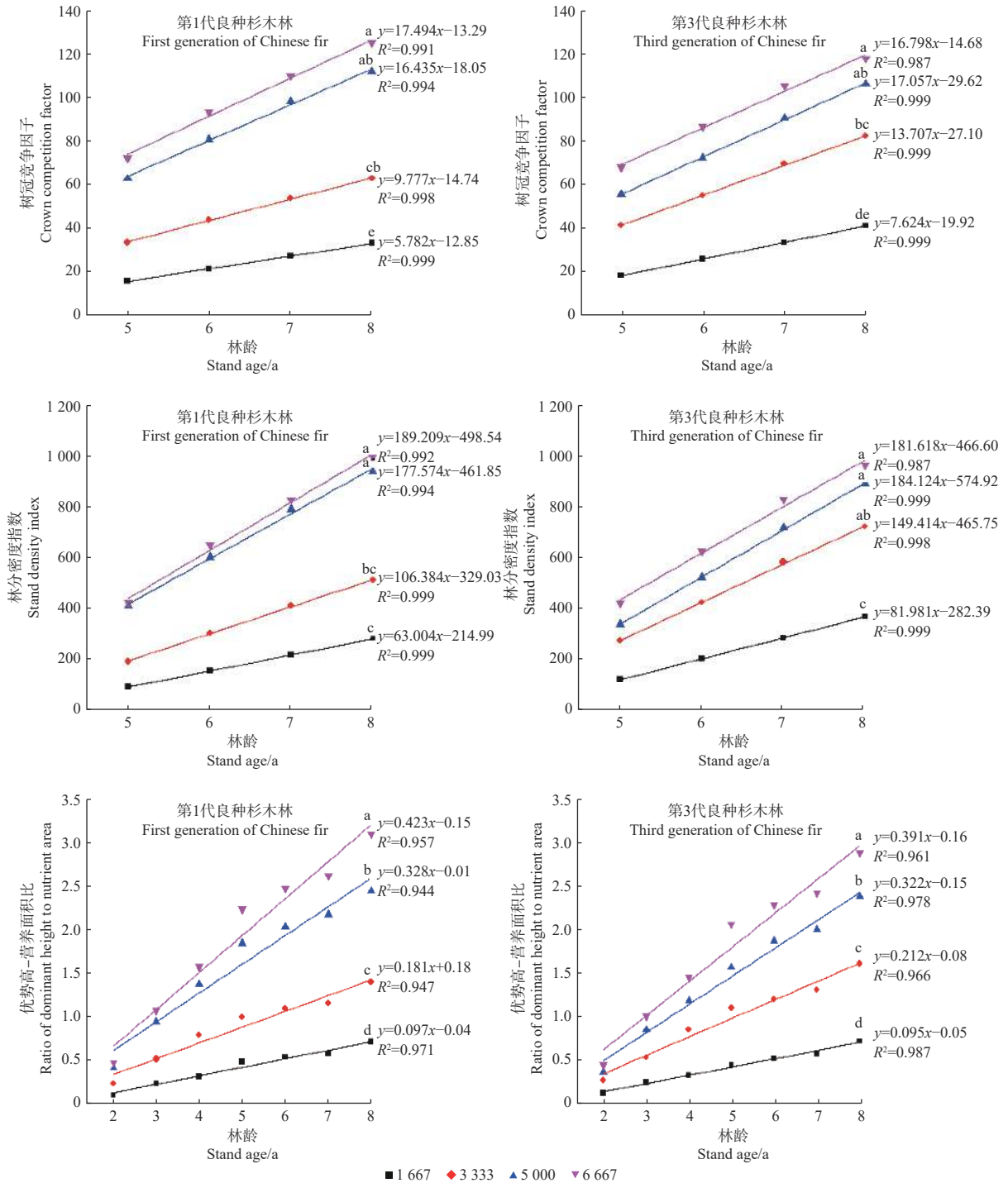
2.1.1 相同良种不同初植密度林分密度指标的动态

变化 图 1 表示相同良种水平不同初植密度林分树冠竞争因子 (CCF)、林分密度指数 (SDI)、优势高—营养面积比 (Z) 随林龄变化的线性拟合结果。两个良种的密度变化规律一致，杉木幼龄期 CCF 、 SDI 、 Z 值均随林龄增长而增加，反映幼龄期各种密度林分随林龄增加林分密度越来越大，林分中林木越拥挤，这符合现实林分的生长发育规律。对于两个世代杉木良种，初植密度越小，拟合直线斜率越小，随初植密度增大，拟合直线斜率增大，表明随初植密度增大， CCF 、 SDI 、 Z 值随林龄增长变化速度加快，这与幼龄期随林龄增加，林分由于自由生长初植密度越大更易或更早造成林分拥挤的事实一致。

同一年龄下，两个世代杉木良种的 CCF 、 SDI 、 Z 值均随初植密度的增大而增大。方差分析结果显示 (表 1)，3 个密度指标在各年龄下密度间差异均达极显著水平。8 年生时，在林龄和良种相同的条件下， CCF 和 SDI 的第 1 世代良种初植密度为 5 000 株·hm⁻² 和 6 667 株·hm⁻² 间差异均未达显著水平，但却显著大于初植密度为 1 667 株·hm⁻² 和 3 333 株·hm⁻²，两个密度指标的第 3 世代良种初植密度为 3 333 株·hm⁻² 和 5 000 株·hm⁻²、5 000 株·hm⁻² 和 6 667 株·hm⁻² 间差异未达显著水平，但却显著大于 1 667 株·hm⁻²。对于 Z 值，8 年生时，两个良种的 Z 值在 4 种初植密度下差异均达显著水平，表明不同密度间 Z 值差别比较明显。

2.1.2 相同初植密度不同良种水平林分密度指标的动态变化 在不同良种水平相同初植密度下的 CCF 、 SDI 、 Z 动态变化规律见图 2。初植密度相同时，两个良种水平的林分 CCF 、 SDI 、 Z 值均随林龄增加而增加；低初植密度下 (1 667 株·hm⁻² 和 3 333 株·hm⁻²)，第 3 世代良种的 CCF 、 SDI 、 Z 值大于第 1 世代良种；而高初植密度下 (5 000 株·hm⁻² 和 6 667 株·hm⁻²)，第 1 世代良种的 CCF 、 SDI 、 Z 值大于第 3 世代良种。在林龄和初植密度相同条件下，两个良种的 CCF 、 SDI 、 Z 值相差不大，受良种的影响程度小，表明 3 个密度指标几乎不随良种世代数变化而变化。根据双因素方差分析 (表 1)，5—8 年生时， CCF 和 SDI 值的良种间差异均未达显著水平， Z 值除在第 5 年生时差异达显著水平外，在 6—8 年生时，良种间差异未达显著水平。

2.1.3 初植密度与良种交互效应 双因素方差分析



注: 不同字母代表差异达显著水平 ($p < 0.05$); 图中方程为线性拟合方程; 1 667、3 333、5 000 和 6 667 分别代表初植密度为 1 667 株·hm⁻²、3 333 株·hm⁻²、5 000 株·hm⁻² 和 6 667 株·hm⁻²。

Note: Different letters indicate significant difference ($p < 0.05$); The equation in the figure is a linear fitting equation; 1 667, 3 333, 5 000 and 6 667 indicate that the initial planting densities are 1 667 trees·hm⁻², 3 333 trees·hm⁻², 5 000 trees·hm⁻² and 6 667 trees·hm⁻², respectively.

图 1 相同良种不同初植密度林分 3 个密度指标的线性拟合结果

Fig. 1 Linear fitting results of three stand density measures at the same improved variety and different planting densities

结果表明 (表 1), CCF、SDI、Z 值的良种和初植密度间交互效应均不显著, 表明 3 个密度指标均不存在良种和初植密度的交互作用。

2.2 密度指标与初植密度和林龄的二元线性回归分析

利用多元线性回归分析方法分析初植密度和林

表1 双因素方差分析结果
Table 1 Results of two-way analysis of variance

密度指标 Stand density measures	变异来源 Source of variation	林龄 Stand age/ a			
		5	6	7	8
树冠竞争因子 Crown competition factor	密度 Planting density	56.896**	44.211**	43.431**	44.603**
	良种 Improved variety	0.044	0.002	0.169	0.338
	良种×密度 Improved variety×planting density	1.182	1.069	1.019	1.202
林分密度指数 Stand density index	密度 Planting density	18.310**	18.922**	21.570**	24.069**
	良种 Improved variety	0.065	0.092	0.493	0.724
	良种×密度 Improved variety×planting density	0.913	0.870	0.866	0.986
优势高—营养面积比 Ratio of dominant height to nutrient area	密度 Planting density	212.559**	170.04**	151.276**	70.004**
	良种 Improved variety	5.706*	1.932	1.121	0.123
	良种×密度 Improved variety×planting density	2.548	1.142	1.330	0.569

注:**表示在0.01水平上差异显著。下同。

Note: ** indicates significant difference at 0.01 levels. The same below.

龄对密度指标的影响,相关分析表明初植密度与林龄不相关,共线性统计中方差膨胀系数(VIF)均等于1,表明不存在自变量间的共线性问题;德宾—沃森值都在2左右,表明不存在序列的自相关性;残差符合正态分布,且散点图分布规律表明不存在异方差现象。不同良种水平下杉木幼龄林CCF、SDI、Z值对初植密度和林龄的回归分析结果见表2。回归分析结果表明,两个良种水平下3种林分密度指标对初植密度和林龄的回归模型均达极显著水平,表明密度指标与初植密度和林龄之间的线性关系在总体上达极显著水平;调整后 R^2 均在0.894以上,表明模型拟合效果较好;t检验结果显示模型回归系数均达极显著水平,表明初植密度和林龄对密度指标均产生极显著影响,且对密度指标有极显著的正向影响;初植密度的Beta值均比林龄的Beta值大,表明在当前阶段,初植密度对3种密度指标的影响程度相对林龄要大。

3 讨论

3.1 密度指标的动态变化

3.1.1 林龄 CCF、SDI、Z值在不同良种和不同初植密度下随林龄的动态变化规律显示,在相同良种水平不同初植密度下,3个密度指标随林龄增长的动态变化规律一致,均为随林龄增加而增大,这符合林分生长发育规律,即随林龄增加,密度指标

值增大,表示林分中林木越拥挤^[9]。3种密度指标在不同初植密度下的拟合直线斜率随初植密度增大而增大,表明高密度林分的密度指标值随林龄增长而增加的程度较低密度林分大,反映随林龄增加,初植密度越大的林分对林木间竞争激烈程度的影响更强,这与幼龄期随林龄增加,林分由于自由生长,初植密度越大更易或更早造成林分拥挤的现实一致,其中Z更能清晰地反映这种变化。

3.1.2 初植密度 同一年龄下,3个林分密度指标均随初植密度的增大而增大,且方差分析结果显示密度间差异达极显著水平,回归分析结果表明初植密度对密度指标产生显著影响,且均为正向影响,反映同一年龄下初植密度越大的林分,林木间竞争程度越激烈。但是一个理想的密度指标不仅要能反映林木的拥挤程度,还要对不同密度有所区分^[9]。本研究中,在初植密度为5 000~6 667株·hm⁻²的范围内,CCF和SDI随林龄增长,密度间差别越来越小,不同密度间差异未达到显著水平,难以对这个密度范围内的不同密度做出区分,从这个意义上说,CCF和SDI在该密度范围内难以适用,而刘金福等^[6]指出SDI适用于天然林和初植密度很大的人工林,对于初植密度较稀的人工林,则适用性较差。本研究中林分5—8年生时,在初植密度为5 000~6 667株·hm⁻²的范围内,Z在不同密度间差异达显著水平,能明显表示出不同初植密度之间的差别,

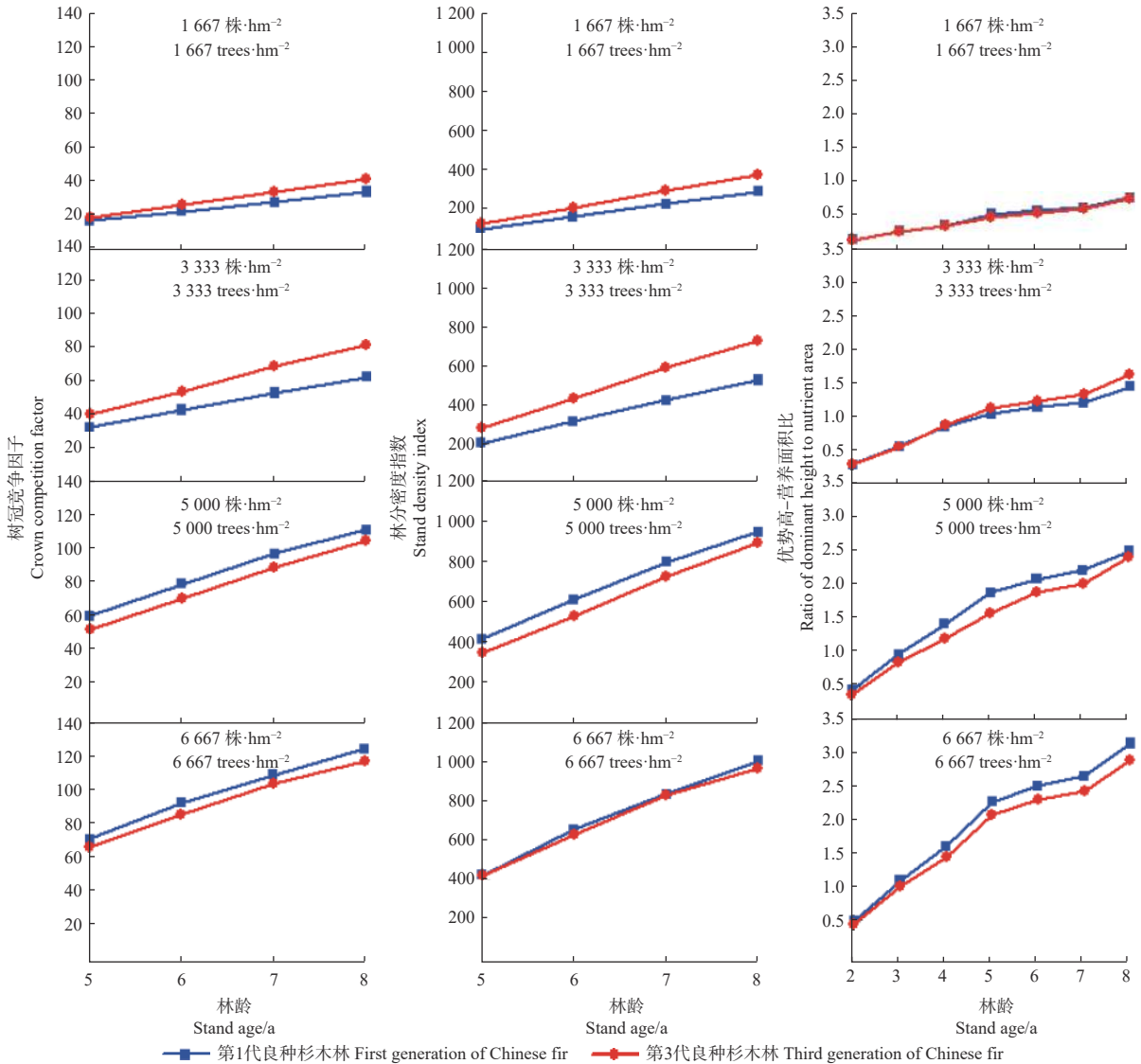


图2 相同初植密度不同良种林分3个密度指标的动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of three stand density measures at the same planting density and different improved varieties

且能更清晰地反映初植密度越大, 林分内林木竞争程度越剧烈。

3.1.3 良种及其与初植密度交互效应 前人研究表明, 一个理想的密度指标要与年龄、立地及其他特征无关^[9], 本研究杉木良种和初植密度交互试验结果显示, 在相同初植密度不同良种水平下, 3种林分密度指标随良种的变化规律不明显, 良种效应差异不显著, 表明3种密度指标均受良种改良世代数影响较小。初植密度与良种的交互作用结果表明, 3种林分密度指标的良种和密度间交互作用不显著, 表明对于CCF、SDI和Z等3个密度指标, 良种与初植密度交互作用的正向促进效应对林分内单木间彼此竞争激烈程度的影响未达明显作用, 而由于幼龄期林分株数变量较为稳定, 相应的表明这种

遗传与密度的交互控制对此时林分冠幅、直径及优势高影响不显著。

3.2 密度指标的比较分析

本研究所选3个林分密度指标, 树冠竞争因子、林分密度指数、优势高—营养面积比, 除林木株数外, 分别涉及冠幅、胸径和树高因子。有研究认为, 冠幅比胸径、树高等生长指标对环境 and 竞争响应要快, 可以更好地指示密度变化, 因此认为包含树冠因子的密度指标如树冠竞争因子CCF^[12]、冠积指数^[7]等更能反映林分密度状况, 是评价林分竞争程度的可靠因子。CCF虽然与林分生长量显著相关^[17], 可用于生长和收获预估, 但是树冠外形不规则, 测定比较困难, 且难以保证精确度, 计算比较麻烦, 难以区分不同林分密度。另外有研究指

表 2 3 种林分密度指标与初植密度、林龄的线性回归分析

Table 2 Linear regression analysis between the three stand density measures and initial planting density and stand age

良种 Improved variety	因变量 Dependent variable	预测变量 Predictive variable	<i>B</i>	<i>Beta</i>	<i>F</i>	调整后 R^2 Adjusted R^2	<i>t</i>	<i>p</i>	
1代 First generation	树冠竞争因子 Crown competition factor	密度 Planting density	0.016	0.882	109.909**	0.936	13.452	0.000	
		林龄 Stand age	12.372	0.409			6.233	0.000	
		常量 Constant	-81.486				-5.820	0.000	
	林分密度指数 Stand density index	密度 Planting density	0.116	0.784	63.950**	0.894	9.305	0.000	
		林龄 Stand age	134.043	0.542			6.428	0.000	
		常量 Constant	-861.171				-5.855	0.000	
	优势高—营养面积比 Ratio of dominant height to nutrient area	密度 Planting density	0.001	0.959	220.192**	0.967	20.425	0.000	
		林龄 Stand age	0.166	0.226			4.818	0.000	
		常量 Constant	-1.201				-4.933	0.000	
	3代 Third generation	树冠竞争因子 Crown competition factor	密度 Planting density	0.013	0.819	124.216**	0.943	13.244	0.000
			林龄 Stand age	13.796	0.528			8.545	0.000
			常量 Constant	-76.289				-6.699	0.000
林分密度指数 Stand density index		密度 Planting density	0.090	0.686	90.655**	0.923	9.569	0.000	
		林龄 Stand age	149.284	0.680			9.473	0.000	
		常量 Constant	-824.296				-7.416	0.000	
优势高—营养面积比 Ratio of dominant height to nutrient area		密度 Planting density	0.001	0.942	235.423**	0.969	20.724	0.000	
		林龄 Stand age	0.192	0.292			6.433	0.000	
		常量 Constant	-1.231				-5.857	0.000	

注: *B* 为非标准化系数; *Beta* 为标准化系数; *t* 为 *t* 检验; *p* 为 *t* 检验的显著性。

Note: *B* is the non-standardized coefficient; *Beta* is the standardized coefficient; *t* is the t-test; and *p* is the significance of the t-test.

出与冠径关系最密切的变量是预测自疏的最佳指标^[18]。很多研究证明,相比于树高、材积,直径与冠幅之间的关系更加密切,更能准确预测林分密度变化^[19]。Zeide^[18]认为直径和林木数量之间的关系要比树高和林木数量之间的关系更直接,树高是通过与直径的联系进而与自疏有关的。*SDI*综合了林木株数和平均直径这两个因子,不仅能表示林木株数的多少,还能反映树木的大小。自1933年Reineke提出林分密度指数表达式以来,*SDI*一直是广泛使用的评估林分密度的工具^[20],在编制林分密度管理图及其它研究中得到广泛应用^[21-24]。Reineke指出方程斜率为1.605,并且认为这一斜率对于所有树种、年龄和地区都是适用的。而Zeide^[25]认为Reineke的模型形式和参数在生物学和统计学方面

可能会引起争议,其指出参数 β 随年龄和树木大小的变化而变化。也有研究表明自然稀疏率随年龄和树木大小的增加而增加,并不是保持不变的。在幼龄林中直径较小时,自然稀疏率较小,而随年龄增大,直径变大,自然稀疏率逐渐增大^[18]。Reineke模型参数取值除用1.605外,还有1.6^[22-23]、1.913^[26]等,车少辉在杉木人工林密度指标的分析研究中指出,自然稀疏斜率从1.5变为1.605过程中,*SDI*值几乎没有变化,说明该参数取值具有一定的弹性空间^[27]。*SDI*的参数随林龄和林木大小的变化而变化,而参数的不稳定性会使密度估计产生偏差,本研究在计算林分密度指数时,参数取值为1.588,对于同一树种在不同地区不同年龄阶段,参数取值可能会在一定的范围内波动。另外Zeide^[28]和

Shaw^[29]指出 Reineke 的相对密度指数方程中使用的平均直径不应该是 D_g ——既不是平方平均直径,也不是算术平均直径, Zeide 将其命名为 D_R , 其中 $D_R = \left(\frac{1}{N} \sum d_i^\beta\right)^{\frac{1}{\beta}}$, 代入 Reineke 的模型表达式中得 $SDI^* = \sum \left(\frac{d_i}{D_0}\right)^\beta$ 。从以上的各种研究中发现, 由于 Reineke 的模型形式和参数在使用时争议较大, 所以在实际应用时有必要做进一步研究。 Z 表达式中含有优势高, 有研究表明关于林分优势高的测定标准并不统一, 通常认为同龄林林分优势高生长受林分密度的影响很小, 调查时一般基于单位面积内一定数量的最粗或最高的树木树高的平均值来表示^[30]。刘金福等^[6]提出优势高一营养面积比 (Z), 指出 Z 与年龄及地位指数的相关性皆不显著, 与林分断面积相关性达显著水平, 表明与年龄及地位指数无关, 而与林分断面积关系紧密, 认为 Z 作为林分密度指标是比较理想的。张连金等^[9]亦认为密度指标 Z 优于 SDI , 而且得出该指标适用年龄范围广, 在整个林分发育过程中变化较小, 是一种比较适用的密度指标, 与本研究初植密度效应结果一致, 但本试验发现不同世代良种对 5 年生林分密度指标 Z 具有显著影响, 且林分 8 年生时 Z 较 CCF 和 SDI 更能反映不同初植密度两两间对林分竞争态势的差异性作用, 因此, 对杉木人工林而言, 密度指标 Z 具有更好的指示性。

4 结论

本研究通过树冠竞争因子 (CCF)、林分密度指数 (SDI)、优势高一营养面积比 (Z) 在不同初植密度和良种水平下的动态变化规律及密度指标对初植密度和林龄的回归分析, 得出如下 3 点结论: (1) 3 个密度指标随林龄增长的动态变化规律一致, 均为随林龄增加而增大, 密度指标随林龄增长的变化速率随初植密度的增大而增大; (2) 密度指标在不同密度间差异达极显著水平, 3 个密度指标均能反映初植密度越大, 林分内林木越拥挤, 在 $5\ 000 \sim 6\ 667$ 株· hm^{-2} 的范围内, CCF 和 SDI 在不同密度间差异不显著, 难以区分不同密度之间的差别, 而 Z 在研究设置的整个密度范围内不同密度间差异均达显著水平, 更能清晰地反映初植密度越大, 林分内林木竞争程度越剧烈; (3) 密度指标随良种的变化规律不明显, 良种效应差异不显著, 且良种和密度的交互控制对幼龄期杉木林分

冠幅、胸径、优势高影响不显著。综上所述, 密度指标 Z 优于 CCF 和 SDI , Z 能够明显地表示出不同密度之间的差别, 更加清晰地反映林木间竞争水平, 而且该指标是一个无参数的密度指标, 相较其他密度指标容易测定, 更适用于杉木人工林分生长模拟和密度管理。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 张阳锋, 尹光天, 杨锦昌, 等. 造林密度对米老排人工林初期生长的影响[J]. 林业科学研究, 2018, 31(4): 83-89.
- [3] Curtis R O. Stand density measures: an interpretation[J]. Forest Science, 1985, 16(16): 403-414.
- [4] Reineke L H. Perfecting a stand-density index for even-aged forests[J]. Journal of Agricultural Research, 1933, 46(7): 627-638.
- [5] Krajicek J E, Brinkman K A, Gingrich S F. Crown competition. A measure of density[J]. Forest Science, 1961, 7(1): 35-42.
- [6] 刘金福, 王笃志. 福建杉木人工林可变密度收获表编制方法的研究[J]. 林业勘察设计, 1995, (2): 1-5.
- [7] 陈东来, 刘丽华, 张景兰. 林分密度的新指标——冠积指数[J]. 东北林业大学学报, 2003, 31(5): 15-17.
- [8] 方怀龙. 现有林分密度指标的评价[J]. 东北林业大学学报, 1995, 23(4): 100-105.
- [9] 张连金, 惠刚盈, 孙长忠. 不同林分密度指标的比较研究[J]. 福建林学院学报, 2011, 31(3): 257-261.
- [10] 王迪生, 宋新民. 华北落叶松人工林CCF特性的探讨[J]. 河北林学院学报, 1995, 10(1): 1-5.
- [11] Strub M R, Vasey R B, Burkhart H E. Comparison of diameter growth and crown competition factor in loblolly pine plantations[J]. Forest Science, 1975, 21(4): 427-431.
- [12] 段 劼, 马履一, 贾黎明, 等. 北京地区油松人工林树冠竞争因子的测算与分析[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(3): 14-18.
- [13] 李 赞, 温小容, 余光辉, 等. 基于 UAV 高分影像的杨树冠幅提取及相关性研究[J]. 林业科学研究, 2017, 30(4): 653-658.
- [14] 马 炜, 孙玉军. 长白落叶松人工林密度表的编制及应用[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(6): 69-75.
- [15] 车少辉, 张建国. 基于自稀疏理论的杉木人工林密度指标研究[J]. 植物研究, 2012, 32(3): 343-347.
- [16] Zeide B. The mean diameter for stand density index[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 13(5): 1023-1024.
- [17] 范万圣, 孔淑庆. 对林分密度与密度指标的初步评价[J]. 山西水土保持科技, 1995, (4): 34-36.
- [18] Zeide B. Comparison of self-thinning models: an exercise in reasoning [J]. Trees, 2010, 24(6): 1117-1126.
- [19] Burkhart H E. Comparison of maximum size-density relationships based on alternate stand attributes for predicting tree numbers and stand growth[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 289: 404-408.
- [20] Ducey M J, Larson B C. Is there a correct stand density index? An alternate interpretation[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2003, 18(3): 179-184.
- [21] Woodall C W, Fiedler C E, Milner K S. Stand density index in un-

- even-aged ponderosa pine stands[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(1): 96-100.
- [22] Long J N, Shaw J D. A density management diagram for even-aged ponderosa pine stands[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(4): 205-215.
- [23] Long J N, Shaw J D. A density management diagram for even-aged sierra nevada mixed-conifer stands[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2012, 27(4): 187-195.
- [24] Quiñonez-Barraza G, Tamarit-Urias J C, Martinez-Salvador M, *et al.* Maximum density and density management diagram for mixed-species forests in Durango, Mexico[J]. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente, 2018, 24(1): 73-90.
- [25] Zeide B. How to measure stand density[J]. Trees, 2005, 19(1): 1-14.
- [26] 付立华. 杉木人工林最大密度线的研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2008.
- [27] 车少辉. 基于神经网络方法的杉木人工林林分生长模拟研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2012.
- [28] Zeide B. The mean diameter for stand density index[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1983, 13(5): 1023-1024.
- [29] Shaw J D. Application of stand density index to irregularly structured stands[J]. Western Journal of Applied Forestry, 2000, 15(1): 40-42.
- [30] 雷相东, 朱光玉, 卢 军. 云冷杉阔叶混交过伐林分优势高估计方法的研究[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 36-41.

Dynamic Characteristics of Stand Density Measure of Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Plantations with Different Improved Varieties and Initial Planting Densities

LI Xiao-yan¹, DUAN Ai-guo¹, ZHANG Jian-guo^{1,2}, ZHAO Shi-rong³, FENG Sui-q³

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, National Forestry and Grassland Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China; 2. The Southern National Forestry Collaborative Innovation Center, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. State-owned Forestry Farm of Weimin, Shaowu, Fujian Province, Shaowu 354006, Fujian, China)

Abstract: [Objective] To study the dynamic characteristics of stand density measures of *Cunninghamia lanceolata* plantation at different improved varieties and initial planting densities in order to select the appropriate density index and provide a basis for density management of *Cunninghamia lanceolata* plantation. [Method] Based on 8-year positioning observation data of interactive test forest, the dynamic characteristics of three stand density measures, including crown competition factor (*CCF*), stand density index (*SDI*), ratio of dominant height to nutrient area (*Z*), with different improved varieties and initial planting densities and the linear regression analysis between the three stand density measures and initial planting density and stand age were analyzed. [Result] The law of dynamic changes of the three stand density measures were consistent with age with same improved variety and different initial planting densities, which increased with age. Under lower initial planting density, the slope of the fitting line of stand density measures was small, and became larger with the increase of initial planting density. The results showed that the higher the initial planting density, the stronger the competition intensity. Under same stand age, all the density measures increased with the initial planting density. There were quite significant differences among planting densities. Under the same initial planting density and different improved varieties, the improved varieties had no significant effect on the three stand density measures, and there was no interaction between the improved varieties and initial planting densities. [Conclusion] The three stand density measures can reflect density information to some extent. In the density ranging from 5000 to 6667 trees·hm⁻², the difference is not significant among initial planting densities in *CCF* and *SDI*, and it is difficult to reflect the difference between densities in this range. But the difference among densities reaches a significant level in *Z* in the whole density range. The *Z* can show the difference at different densities clearly, and has a larger applicable density, with no parameter and easy calculation. Therefore, it can be well applied to growth modeling and density management in Chinese fir plantation.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; improved variety; initial planting density; crown competition factor; stand density index; ratio of dominant height to nutrient area