

杉木人工林树冠特征与生长形质的动态关系*

李梦仙¹ 晏媛¹ 黄飞¹ 曾曙才¹
华炜文² 贾小容¹

(1. 华南农业大学林学与风景园林学院, 广东 广州 510642; 2. 广东省岭南院勘察设计有限公司, 广东 广州 510599)

摘要 为探究树冠形态因子对生长形质因子的影响, 以明确大径级杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林培育过程的树冠调控的重点与方向, 文章选取粤北地区 4 个年龄序列 (8、20、37、50 a) 的杉木林样地, 结合相关性分析和通径分析方法, 研究杉木在不同生长阶段中树冠形态因子对生长形质的影响规律。结果表明, 杉木树冠形态因子与生长形质因子间大体表现为极显著相关 ($P < 0.01$)。总体而言, 冠幅对生长形质的正向作用随林龄增加而减弱; 冠形率对生长形质的正向作用随林龄增加而减弱; 冠长率对生长形质的负向作用较小。研究结果反映出, 为获得良好生长形质, 可使杉木保持冠幅宽大、冠形率大、冠长率小的树冠形态; 但在不同林龄阶段冠形调控的效果不同, 幼林的树冠调控效果相对更好。

关键词 杉木; 冠形; 林冠因子; 通径分析

中图分类号: S791.27 文献标志码: A 文章编号: 2096-2053 (2024) 06-0018-08

DOI: 10.20221/j.cnki.2096-2053.202406003

Dynamic Relationship Between Canopy Characteristics and Growth Form
Quality of *Cunninghamia lanceolata* PlantationLI Mengxian¹ YAN Yuan¹ HUANG Fei¹
ZENG Shucai¹ HUA Weiwen² JIA Xiaorong¹(1. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China;
2. Guangdong Lingnanyuan Exploration and Design Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510599, China)

Abstract To investigate the influence of canopy morphology factors on growth shape and quality factors, the focus and direction of canopy regulation in the cultivation process of large-diameter *Cunninghamia lanceolata* plantation were clarified. In this paper, *C. lanceolata* forest plots with four age sequences of 8, 20, 37, and 50 years old in northern Guangdong were selected. Combined with correlation analysis and path analysis, the effects of canopy morphology factors on growth form quality of *C. lanceolata* at different growth stages were studied. The results showed that there was a significant correlation between canopy morphology factors and growth shape and quality factors of *C. lanceolata* ($P < 0.01$). Overall, canopy width had a positive effect on growth shape and quality, but the positive effect was weakened with the increase in forest age. The canopy shape rate had a positive effect on growth shape and quality, but the positive effect was weakened by the increase in forest age. The negative effect of the canopy length rate on growth shape and quality was small. This

* 基金项目: 广东省林业局科技项目 (重点) (2023KJCX004), 广东省林业局科技项目 (重大) (2022KJCX015)。

第一作者: 李梦仙 (1997—), 女, 在读硕士, 研究方向为森林生态, E-mail: lmx123@stu.scau.edu.cn。

通信作者: 贾小容 (1978—), 女, 副教授, 研究方向为森林生态, E-mail: xiaorongj@scau.edu.cn。

indicates that in order to achieve the purpose of obtaining good growth shape and quality, *C. lanceolata* can be maintained in a canopy form with a wide canopy width, large canopy shape rate and small canopy length rate. However, the effectiveness of canopy shape control varies at different age stages, and relatively speaking, canopy shape control was more effective in young forests.

Key words *Cunninghamia lanceolata*; canopy shape; canopy factors; path analysis

杉木 *Cunninghamia lanceolata* 木材质量好、生长迅速、经济价值高, 在我国南方广泛种植以生产木材^[1-2], 用于建筑、桥梁、家具等领域^[3]。目前杉木培育多采用高密度营林的方式, 导致产出现状为中小径级的有节木材居多, 大径材较少, 材种供给结构失衡日趋突出^[4-5]。随着森林质量精准提升工程的实施, 增强人工林森林生态功能, 推进林业供给侧结构性改革已势在必行。目前, 如何优化现有低效杉木林的林分结构, 如何提升现有杉木的林分质量, 成为了广受关注的问题。

树干为树冠叶片提供物理支撑, 还为蒸腾作用提供和储存水分^[6]。而树木冠层对太阳能进行转换, 再形成生产力用于树木的生长, 因此树冠的生长状态及结构特征, 能体现出林地的地上空间及资源的利用能力^[7-8]。树木的树冠结构在一定程度上制约了生产力的大小, 也影响着树木的树干形成^[9]。在杉木生长的生长发育过程, 影响杉木木材形质的主导因素可能有所不同。修枝、密度管理均可调控杉木的树冠形态, 是生产实践中提高林木培育成效的重要技术^[7,10]。在大、中径材的培育过程中, 了解树冠结构与林木生长形质之间的关系, 对于制订森林经营方案和提高木材质量具有重要意义^[9]。在树冠调控研究中, 引入途径分析方法, 可明确树冠形态因子与生长形质的定量关系, 确定不同林龄阶段杉木树冠调控的主要影响因子, 为后期在杉木林分管理的针对树冠形态调控的抚育措施(如修枝强度、修枝时间间隔等)提供理论依据。

本研究依托粤北地区 8、20、37 和 50 a 共 4 个年龄序列的杉木林样地, 探究杉木在不同生长阶段中树冠形态因子对生长形质的影响规律, 为杉木培育过程的冠形控制提供参考, 为培育杉木大径级林分, 优化低效林林分结构, 精准提升林地质量, 促进林业高质量发展提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于广东省韶关市(23°53'~25°31'N, 112°53'~114°45'E)乳源瑶族自治县的天井山林场, 以及韶关市乐昌市的乐昌林场。天井山林场属亚热带季风气候, 四季分明, 年平均气温 17.1 °C, 年平均降水量 2 800 mm^[11], 极端高温 34 °C、极端低温-8 °C^[12], 土壤类型以山地红壤和黄壤为主^[11]。乐昌林场属中亚热带季风气候区, 光照充足、温暖湿润、雨量充沛, 年平均温度 19.6 °C, 年平均降水量 2 522.3 mm, 极端高温 38.4 °C, 极端低温-4.6 °C, 土壤为花岗岩发育而成的中厚腐殖质层厚土层山地黄红壤^[13]。所选取杉木林的林分起源均为实生苗, 均采用过间伐措施, 8 a 生杉木于 2021 年间伐, 20 a 生杉木于 2017—2018 年间伐, 37 a 生杉木于 2018 年间伐, 50 a 生杉木记载有间伐, 时间不详。

1.2 样地设置与调查

2023 年 8—9 月, 在研究区选择 4 个林龄(8、20、37 和 50 a)的杉木人工林群落作为调查样地, 在每个调查样地设置 3 个 20 m×20 m 的样方。对胸径大于 5 cm 的杉木进行每木调查, 测量的指标包括胸径、无节材长度、树高及冠幅; 记录各样地的经纬度、坡度、坡向、海拔、郁闭度等。各样地概况见表 1。

1.3 项目测定

1.3.1 树冠形态指标 树冠形态因子选择冠幅(W)、冠形率(S)和冠长率(R)。计算公式如下:

$$W = \frac{W_{EW} + W_{NS}}{2} \quad (1)$$

$$L = H - L_t \quad (2)$$

$$R = \frac{L}{H} \quad (3)$$

$$S = \frac{L}{W} \quad (4)$$

表 1 样地概况
Table 1 General information of sample plots

林龄/a Forest age	林分密度/ (株·hm ⁻²) Stand density	平均树高/m Mean tree height	平均胸径/cm Mean DBH	郁闭度 Canopy density	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡位 Slope position	坡度 (°) Slope
8	2 008	9.38±0.07d	15.80±0.19d	0.48	620	东南	下	17
20	1 358	15.15±0.17c	19.04±0.40c	0.66	130	东南	下	45
37	1 200	21.60±0.22a	23.82±0.43a	0.58	350	东南	中	37
50	1 617	18.63±0.23b	21.78±0.37b	0.47	450	西南	下	31

注：平均树高和平均胸径所列数字均值±标准误；同列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

Note: The numbers for the mean tree height and mean DBH are mean ± standard error; different lowercase letters within a column show significant difference among different age groups at $P<0.05$ level.

式中, W_{EW} 为东西方向的冠幅, W_{NS} 为南北方向的冠幅, L 为冠长, H 为树高, L_1 为无节材长度。

1.3.2 杉木生长形质指标 生长形质因子选择胸径、单株材积、无节材长度及前 3 者的综合评价。

胸径是在杉木高度为 1.3 m 处的直径大小 (cm); 无节材长度是树干上第 1 个活枝到树干基部的高度 (m)。单株材积 (V) 是指单株的木材体积 (m³), 计算公式^[14] 如下;

$$V = 5.877\ 704\ 2 \times 10^{-5} \times D^{1.969\ 983\ 1} \times H^{0.896\ 461\ 57} \quad (5)$$

运用多目标决策法中的一维比较法, 将 3 个形质性状的效用值 (U) 分别乘以各自权重后相加生成综合评价, 不同形质的权重设置参考同类型研究^[15]。该指标的数值越高, 说明杉木的形质性状表现越好。计算公式如下:

形质性状的效用值 (U) 为:

$$U_i = 1 - 0.9 \times \frac{(X_{\max} - X_i)}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (6)$$

整体评价价值 (V) 为:

$$V = (0.2 \times U_{dbh}) + (0.5 \times U_V) + (0.15 \times U_{L_1}) \quad (7)$$

式中, X_i 代表第 i 个杉木个体该形质的值, X_{\max} 、 X_{\min} 分别代表所有杉木个体中该形质的最大值、最小值。 U_{dbh} 、 U_V 、 U_{L_1} 分别指胸径、单株材积和无节材长度的效用值。

1.4 数据分析

通径分析是将自变量与因变量的相关系数拆分为直接通径系数和间接通径系数的过程^[16], 还可计算决定系数, 比较各原因对结果的相对重要程度^[17]。通过计算影响杉木干形形质的直接通径系数、间接通径系数和决定系数, 量化杉木树冠形态与干形形质的关系。

直接通径系数 (P_{yi}) 为:

$$P_{yi} = \frac{b_i S_i}{S_y} \quad (8)$$

间接通径系数 (P_{yij}) 为:

$$P_{yij} = r_{ij} \times P_{yi} \quad (9)$$

决定系数 (D_{yxi}) 为:

$$D_{yxi} = P_{yi}^2 \quad (10)$$

式中, b_i 则为 y 对 i 的偏回归系数; S_i 表示 i 的标准差, S_y 表示 y 的标准差; r_{ij} 表示 i 与 j 的相关系数^[15]。

采用 Excel 2019 软件进行数据处理, 运用 IBM SPSS Statistics 24 软件进行通径系数、相关系数的计算以及显著性检验。

2 结果与分析

2.1 相关性分析

杉木冠幅与 4 个形质因子间均呈显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$) 正相关 (表 2)。总体而言, 冠形率与单株材积、胸径、无节材长度、整体评价价值呈现出极显著负相关关系 ($P<0.01$)。冠长率与无节材长度呈极显著负相关 ($P<0.01$), 但在不同林龄阶段, 冠长率与胸径、单株材积、整体评价价值三者的相关性有所不同。

2.2 通径分析

2.2.1 冠幅、冠形率、冠长率与单株材积间的通径分析 杉木冠幅、冠形率对单株材积的直接通径系数均为正值, 对单株材积有正向影响; 而冠长率则相反, 对单株材积有负向影响 (表 3)。

在各林龄阶段, 相较于冠形率和冠长率, 冠幅的决定系数均最大, 冠幅对单株材积的直接通径系数均最大, 但总体上该系数随林龄增加而减小。在各林龄阶段, 冠形率对单株材积的直接通

表 2 杉木树冠形态因子与生长形质性状的相关系数
Table 2 Correlation coefficients between canopy morphology factors and growth shape and quality of *Cunninghamia lanceolata*

林龄/a Forest age	因子 Factor	冠形率 Canopy shape rate	冠长率 Canopy length rate	胸径 DBH	无节材长度 Length of non- knot timber	单株材积 The individual volume	整体评价值 Comprehensive score
8	冠幅	-0.760**	0.068	0.553**	0.171**	0.548**	0.564**
	冠形率		0.399**	-0.170**	-0.330**	-0.110	-0.173**
	冠长率			0.251**	-0.836**	0.268**	0.142*
	胸径				0.066	0.970**	0.972**
	无节材长度					0.115	0.237**
	单株材积						0.989**
20	冠幅	-0.648**	-0.131	0.676**	0.392**	0.666**	0.687**
	冠形率		0.690**	-0.249**	-0.684**	-0.249**	-0.317**
	冠长率			0.080	-0.881**	0.046	-0.050
	胸径				0.281**	0.972**	0.971**
	无节材长度					0.310**	0.407**
	单株材积						0.994**
37	冠幅	-0.294**	0.074	0.684**	0.254**	0.717**	0.713**
	冠形率		0.892**	-0.285**	-0.818**	-0.230**	-0.285**
	冠长率			-0.059	-0.857**	-0.010	-0.072
	胸径				0.377**	0.978**	0.981**
	无节材长度					0.372**	0.431**
	单株材积						0.998**
50	冠幅	-0.573**	0.088	0.730**	0.163*	0.705**	0.709**
	冠形率		0.488**	-0.278**	-0.543**	-0.239**	-0.278**
	冠长率			0.110	-0.916**	0.124	0.056
	胸径				0.188**	0.966**	0.969**
	无节材长度					0.197**	0.265**
	单株材积						0.997**

注：*代表 $P < 0.05$ ，**代表 $P < 0.01$ 。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), while ** indicates significant correlation extremely ($P < 0.01$).

径系数均较大，总体而言随林龄增加而减小。在杉木的 8、20 和 50 a 林龄段，冠长率的决定系数均很小，对单株材积的直接通径系数数值很小。但在 37 a 林龄时，冠长率的决定系数略大于冠形率，冠长率对单株材积的直接影响大于冠形率。

2.2.2 冠幅、冠形率、冠长率与胸径间的通径分析 从对胸径的直接通径系数来看，杉木冠幅、冠形率均为正值，对胸径均表现为正向作用；而冠长率则与之相反，对胸径有负向影响（表 4）。

在各林龄阶段，杉木冠幅的决定系数均最大，冠幅对胸径的直接作用均明显大于冠形率和冠长率，且直接通径系数随林龄增加而先减后增。冠形率对胸径的直接作用较大，且随林龄增加而先减后增。冠长率对胸径的直接作用较小且均不显著。

2.2.3 冠幅、冠形率、冠长率与无节材长度的通径分析 杉木冠幅、冠形率对无节材长度的直接通径系数均为正数，冠长率则为负值，冠幅和冠形率对无节材长度均表现为极显著的正向作用（ $P < 0.01$ ），冠长率则表现为极显著的负向作用（ $P < 0.01$ ）（表 5）。

各林龄阶段，杉木冠长率对无节材长度的直接通径系数均最大。冠幅对无节材长度的直接通径系数较大，总体而言随林龄增大而减小。在 8、20 和 50 a 林龄阶段，冠形率对无节材长度的直接作用总体来说随林龄增大而减小，而 37 a 林龄阶段的直接作用仅次于 8 a 林龄阶段，这是因为 37 a 林龄阶段的冠形率通过冠长率对无节材长度的间接作用最大。

表3 杉木树冠形态因子与单株材积的通路分析

Table 3 Path analysis of canopy morphology factors and individual volume of *Cunninghamia lanceolata*

林龄/a Forest age	树冠形态因子 Canopy morphology factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通路系数 Direct path coefficient	间接通路系数 Indirect path coefficient			决定系数 Determination coefficient
				冠幅 Canopy width	冠形率 Canopy shape rate	冠长率 Canopy length rate	
8	冠幅	0.548**	1.263**		-0.702	0.013	1.595
	冠形率	-0.110	0.924**	-0.960		0.074	0.854
	冠长率	0.268**	-0.186**	0.085	0.369		0.035
20	冠幅	0.666**	0.957**		-0.312	0.021	0.916
	冠形率	-0.249**	0.481**	-0.620		-0.111	0.232
	冠长率	0.046	-0.160	-0.126	0.332		0.026
37	冠幅	0.717**	0.910**		-0.153	-0.040	0.828
	冠形率	-0.230**	0.520*	-0.268		-0.482	0.270
	冠长率	-0.010	-0.540**	0.067	0.464		0.292
50	冠幅	0.705**	0.914**		-0.198	-0.011	0.835
	冠形率	-0.239**	0.345**	-0.524		-0.061	0.119
	冠长率	0.124	-0.124	0.080	0.168		0.015

注: *代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$; 空格表示两组变量间不存在间接通路系数。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), while ** indicates significant correlation extremely ($P < 0.01$); the blank indicates that there is no indirect path coefficient between the two groups of variables.

表4 杉木树冠形态因子与胸径的通路分析

Table 4 Path analysis of canopy morphology factors and DBH of *Cunninghamia lanceolata*

林龄/a Forest age	树冠形态因子 Canopy morphology factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通路系数 Direct path coefficient	间接通路系数 Indirect path coefficient			决定系数 Determination coefficient
				冠幅 Canopy width	冠形率 Canopy shape rate	冠长率 Canopy length rate	
8	冠幅	0.553**	1.092**		-0.532	-0.007	1.192
	冠形率	-0.170**	0.700**	-0.830		-0.041	0.490
	冠长率	0.251**	-0.102	0.074	0.279		0.010
20	冠幅	0.676**	0.931**		-0.266	0.011	0.867
	冠形率	-0.249**	0.411**	-0.603		-0.056	0.169
	冠长率	0.080	-0.081	-0.122	0.283		0.007
37	冠幅	0.684**	0.772**		-0.065	-0.023	0.596
	冠形率	-0.285**	0.222	-0.227		-0.280	0.049
	冠长率	-0.059	-0.314	0.057	0.198		0.099
50	冠幅	0.730**	0.915**		-0.174	-0.010	0.837
	冠形率	-0.278**	0.304**	-0.524		-0.058	0.093
	冠长率	0.110	-0.119	0.080	0.148		0.014

注: *代表 $P < 0.05$, **代表 $P < 0.01$; 空格表示两组变量间不存在间接通路系数。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), while ** indicates significant correlation extremely ($P < 0.01$); the blank indicates that there is no indirect path coefficient between the two groups of variables.

表 5 杉木树冠形态因子与无节材长度的通径分析

Table 5 Path analysis of canopy morphology factors and length of non-knot timber of *Cunninghamia lanceolata*

林龄/a Forest age	树冠形态因子 Canopy morphology factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			决定系数 Determination coefficient
				冠幅 Canopy width	冠形率 Canopy shape rate	冠长率 Canopy length rate	
8	冠幅	0.171**	0.896**				0.803
	冠形率	-0.330**	0.844**	-0.681			0.712
	冠长率	-0.836**	-1.234**	0.061	0.337		1.523
20	冠幅	0.392**	0.501**				0.251
	冠形率	-0.684**	0.387**	-0.325			0.150
	冠长率	-0.881**	-1.082**	-0.066	0.267		1.170
37	冠幅	0.254**	0.619**				0.384
	冠形率	-0.818**	0.831**	-0.182			0.690
	冠长率	-0.857**	-1.644**	0.046	0.741		2.702
50	冠幅	0.163*	0.335**				0.112
	冠形率	-0.543**	0.145**	-0.192			0.021
	冠长率	-0.916**	-1.016**	0.029	0.071		1.033

注：* 代表 $P < 0.05$ ，** 代表 $P < 0.01$ ；空格表示两组变量间不存在间接通径系数。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), while ** indicates significant correlation extremely ($P < 0.01$); the blank indicates that there is no indirect path coefficient between the two groups of variables.

2.2.4 冠幅、冠形率、冠长率与整体评价值通径分析 杉木冠幅、冠形率对整体评价值的直接通径系数均为正值，对整体评价值具有极显著的正向作用 ($P < 0.01$)；但冠长率则相反，表现为极显著的负向作用 ($P < 0.01$) (表 6)。

各林龄阶段，杉木冠幅对整体评价值的直接

通径系数最大。在 8、20 和 50 a 林龄阶段，冠形率对整体评价值的作用总体上随林龄增加而减小，但 37 a 林龄阶段的直接通径系数仅次于 8 a 林龄。在 8、20 和 50 a 林龄阶段，冠长率对整体评价值的直接影响较小；37 a 林龄阶段，冠长率对整体评价值的直接作用比冠形率的大。

表 6 杉木树冠形态因子与整体评价值的通径分析

Table 6 Path analysis of canopy morphology factors and comprehensive score of *Cunninghamia lanceolata*

林龄/a Forest age	树冠形态因子 Canopy morphology factors	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient			决定系数 Determination coefficient
				冠幅 Canopy width	冠形率 Canopy shape rate	冠长率 Canopy length rate	
8	冠幅	0.564**	1.312**				1.721
	冠形率	-0.173**	0.955**	-0.997			0.912
	冠长率	0.142*	-0.328**	0.089	0.381		0.108
20	冠幅	0.687**	0.975**				0.950
	冠形率	-0.317**	0.498**	-0.632			0.248
	冠长率	-0.050	-0.266**	-0.128	0.344		0.071
37	冠幅	0.713**	0.916**				0.839
	冠形率	-0.285**	0.535*	-0.269			0.287
	冠长率	-0.072	-0.617**	0.067	0.478		0.381
50	冠幅	0.709**	0.925**				0.856
	冠形率	-0.278**	0.347**	-0.530			0.121
	冠长率	0.056	-0.195**	0.081	0.170		0.038

注：* 代表 $P < 0.05$ ，** 代表 $P < 0.01$ ；空格表示两组变量间不存在间接通径系数。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), while ** indicates significant correlation extremely ($P < 0.01$); the blank indicates that there is no indirect path coefficient between the two groups of variables.

3 讨论与结论

相关性分析表明,粤北不同林龄阶段杉木的大部分树冠形态指标与生长形质指标间呈极显著或显著相关。这表明不同林龄杉木的树冠形态指标与生长形质指标间均有一定的关联。通径分析结果显示,冠长率对生长形质综合表现为极显著的负向作用,冠幅、冠形率对生长形质综合表现为极显著的正向作用。这与乳源木莲 *Manglietia yuyuanensis*^[18]、南方红豆杉 *Taxus chinensis var. mairei*^[10]、水曲柳 *Fraxinus mandshurica*^[19]、蛮大杉 *Cunninghamia konishii*^[9] 的相关研究结果类似,表明树冠形态与生长形质相关紧密,通过树冠形态调控的方法来改善杉木生长形质具有可行性。

首先,可通过增加杉木冠幅促进树干形质提升,密度控制是培育大径级杉木的重要措施^[4],在杉木各个生长阶段均有其相应的适宜密度^[20],可通过抚育间伐调节至合理的林分密度,改善林冠层挤压状况^[21],促进冠幅发展,提高林木质量^[22],使杉木形质更符合市场需求。此外,幼林阶段,杉木在与林下植物的养分竞争中处于劣势地位^[23],可通过施肥、割灌除草来增加林地营养,改善林灌养分竞争状况。其次,可减小冠长率,降低对树干形态的负面影响,修枝能减小冠长,增加无节材长度,提高木材形质,虽然修枝减小了叶面积可能会降低树木的生长速率,但可促使木材形质性状表现更好,提高林木的生长量,能在一定程度上改善林分的卫生状况,有利于培育通直、饱满、无节的木材^[24-27]。最后,通过权衡无节材长度及冠长的大小,充分发挥冠形率对树干形态的积极作用。

从直接通径系数和间接通径系数来看,冠幅和冠形率对生长形质的正向作用随林龄增加而减弱,在不同林龄阶段冠形调控的效果不同。这是因为冠幅通过冠形率对生长形质指标具有较大的间接作用,且这个间接作用随林龄增加而减小。8、20和37 a,冠形率通过冠幅对生长形质指标具有较大的间接作用,且这个间接作用随林龄增加而减小;但50 a林龄阶段,冠形率通过冠幅对生长形质指标的间接作用增加。总体来看,随着杉木的生长,冠幅和冠形率对生长形质的正向作用减弱,可能是因为相比于高林龄杉木,低林龄杉木的生长能力更强,冠幅与冠形率的联系更紧密,

因此对低龄杉木的冠层进行调控更能促进良好干形材质的形成。据现行的国家标准《主要树种龄级与龄组划分》^[28]和广东省地方标准《森林资源规划设计调查技术规程》^[29],若作为一般用材林时,杉木在37和50 a林龄应归为过熟林,生长速度变慢,树冠调控的作用可能不理想。

从决定系数来看,树冠形态因子与无节材长度的通径分析中,8、20和50 a阶段中,各树冠因子的重要性依次为:冠长率、冠幅、冠形率,在37 a林龄阶段则为冠长率、冠形率、冠幅。在树冠形态因子与胸径、单株材积、整体评价值的通径分析中,在不同年龄阶段,冠幅均为粤北杉木生长形质的主要影响因子,此外,除在37 a林龄阶段冠形率的重要性小于冠长率外,其余林龄阶段均为冠形率重要性大于冠长率。

综上,冠长率对生长形质综合表现为极显著的负向作用,冠幅、冠形率对生长形质综合表现为极显著性的正向作用;为获得良好生长形质,应使杉木保持冠幅宽大、冠形率大、冠长率小的树冠形态,可通过密度调控、施肥、割灌除草、修枝等抚育措施进行树冠形态调控。但在不同林龄阶段冠形调控的效果不同,在培育杉木大径级林分时,尤其是杉木低龄阶段,应注意树冠形态的调控。

参考文献

- [1] DONG C, CHEN Y, LOU X, et al. Site quality classification models of *Cunninghamia lanceolata* plantations using rough set and random forest west of Zhejiang Province, China[J]. *Forests*, 2022, 13(8): 1312.
- [2] LI K, CHEN S, CHEN X, et al. Genetic diversity and differentiation of Chinese fir around Karst landform in Guangxi[J]. *Forests*, 2023, 14(2): 340.
- [3] 彭万喜, 吴义强, 张仲凤, 等. 中国的杉木研究现状与发展途径[J]. *世界林业研究*, 2006, 19(5): 54-58.
- [4] 周柏屹, 孙麟均, 吴鹏飞, 等. 杉木大径材培育研究进展[J]. *世界林业研究*, 2024, 37(1): 54-58.
- [5] 周静, 于超, 程顺丹, 等. 杉木优良无性系早期生长和侧枝发育特征比较[J]. *森林与环境学报*, 2023, 43(6): 561-568.
- [6] SIDDIQ Z, ZHANG Y, ZHU S, et al. Canopy water status and photosynthesis of tropical trees are associated with trunk sapwood hydraulic properties[J]. *Plant physiology and biochemistry*, 2019, 139: 724-730.

- [7] 欧建德. 基于简单竞争指数的南方红豆杉人工林树冠形状模拟[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 110-115.
- [8] 和璐璐, 张莹, 章毓文, 等. 辽东山区不同坡向长白落叶松人工林树冠特征与林木生长关系[J]. 植物生态学报, 2023, 47(11): 1523-1539.
- [9] 欧建德, 吴志庄, 康永武. 大杉树冠特征与生长形质通径分析[J]. 东北林业大学学报, 2018, 46(11): 8-11, 40.
- [10] 欧建德, 吴志庄. 幼龄南方红豆杉人工林树冠形态特征与生长形质通径分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(4): 185-191.
- [11] 肖以华, 佟富春, 杨昌腾, 等. 冰雪灾害后的粤北森林大型土壤动物功能类群[J]. 林业科学, 2010, 46(7): 99-105.
- [12] 李芳华, 苏正荣, 梁东成, 等. 云锦杜鹃等3种野生杜鹃花属植物在广东天井山苗期生长特性研究[J]. 林业与环境科学, 2016, 32(1): 71-74.
- [13] 侯晓丽, 薛立. 冰雪灾害对粤北杉木林生物多样性的影响[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(5): 89-94.
- [14] 方乐金, 王基福, 陈寿良. 黄山地区杉木优良家系区域选择及效果研究[J]. 林业科学研究, 1991(5): 560-564.
- [15] 张利利, 谭新建, 司芳芳, 等. 不同林龄杉木人工林树冠形态因子与生长形质通径分析[J]. 江西农业大学学报, 2023, 45(4): 894-904.
- [16] 杜家菊, 陈志伟. 使用SPSS线性回归实现通径分析的方法[J]. 生物学通报, 2010, 45(2): 4-6.
- [17] 刘广深, 徐冬梅, 许中坚, 等. 用通径分析法研究土壤水解酶活性与土壤性质的关系[J]. 土壤学报, 2003(5): 756-762.
- [18] 欧建德, 吴志庄, 康永武. 杉莲混交林中乳源木莲树冠特征与生长形质综合表现通径分析[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(4): 114-121.
- [19] 肖伟伟, 李海瑜, 杨振景, 等. 水曲柳人工林树冠形态与林木生长形质的关系及其对修枝的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(9): 47-54, 158.
- [20] 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(5): 530-534.
- [21] 蒋孟多, 马映栋, 蒋睿, 等. 不同密度下小陇山蒙古栎次生混交林树冠结构与密集度的关系[J]. 林业科学研究, 2024, 37(1): 110-118.
- [22] 黄婷, 王哲, 司徒荣贵, 等. 轮伐中期间伐对湿加松采脂前后生长的影响[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(3): 1-7.
- [23] 林开敏, 俞新妥, 黄宝龙, 等. 杉木人工林林下植物物种多样性的动态特征[J]. 应用与环境生物学报, 2001(1): 13-19.
- [24] 程朝阳. 杉木人工林无节材培育技术研究[J]. 林业科学研究, 2005(5): 530-534.
- [25] 马永春, 余诚棋, 方升佐. 不同修枝方法对杨树人工林生长, 光合叶面积和主干饱满度的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(4): 137-142.
- [26] LI R, HAN J, GUAN X, et al. Crown pruning and understory removal did not change the tree growth rate in a Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation[J]. Forest ecology and management, 2020, 464: 118056.
- [27] MAURIN V, DESROCHERS A. Physiological and growth responses to pruning season and intensity of hybrid poplar[J]. Forest ecology and management, 2013, 304: 399-406.
- [28] 国家林业局. 主要树种龄级与龄组划分: LY/T 2908-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [29] 广东省市场监督管理局. 森林资源规划设计调查技术规程: DB44/T 2149-2018[S]. 广州: 广东省标准化研究院, 2019.