



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.

ZHANG L L,TAN X J,SI F F,et al.Path analysis of canopy morphological factors and growth form quality of chinese fir plantation with different forest ages[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2023,45(4):894-904.

不同林龄杉木人工林树冠形态因子 与生长形质通径分析

张利利,谭新建*,司芳芳,张华聪,李翱翔,潘文婷

(中国林业科学研究院 亚热带林业实验中心,江西 分宜 336600)

摘要:【目的】研究不同林龄杉木树冠形态因子对单株材积指数、胸径、无节材长度的影响,确定杉木在不同龄级阶段树冠形态调控的重点和方向,为培育速生丰产杉木林提供科学依据。【方法】以江西大岗山3个不同龄级的杉木人工林为研究对象,使用相关性分析和通径分析方法,对杉木树冠形态因子与单株材积指数、胸径、无节材长度的关系进行分析。【结果】不同龄级阶段,树冠形态因子与生长形质性状具有明显相关性,且在中龄林阶段时相关性最为显著。树冠形态因子对生长形质性状的直接作用具有显著差异,冠幅、冠形率对生长形质性状具有极显著的促进作用,冠长率对生长形质性状具有极显著的负效应,随着林分的生长,树冠形态因子对生长形质性状的影响逐渐减弱,杉木树冠形态调控的最佳时间为幼龄林和中龄林阶段。不同的林分生长阶段,树冠形态因子对生长形质性状的相对重要性呈现不同的排序,培育速生丰产杉木理想冠形的调控重点和方向有所差异。幼龄林阶段,树冠形态因子对3个生长形质性状的相对重要性排序由大到小依次为冠长率、冠形率、冠幅;中龄林阶段,对胸径和单株材积指数的相对重要性排序由大到小依次为冠长率、冠幅、冠形率,对无节材长度的相对重要性排序由大到小依次为冠长率、冠形率、冠幅;近熟林阶段,对单株材积指数、胸径和无节材长度影响最重要的树冠形态因子分别为冠形率、冠幅、冠长率。树冠形态因子对生长形质性状整体作用的相对重要性排序,幼龄林阶段为冠长率第1、冠形率第2、冠幅第3;中龄林阶段冠长率第1、冠幅第2、冠形率第3;近熟林阶段为冠幅第1、冠长率第2、冠形率第3。【结论】促进杉木速生丰产树冠调控的重点方向,幼龄林和中龄林阶段均为降低冠长率;近熟林阶段,促进单株材积生长的调控方向为增加冠形狭长度,增加林木胸径的调控方向为增加冠幅宽度,促进无节材长度增长的调控方向为降低冠长率。不同龄级阶段的理想冠形,幼龄林阶段为低冠长率,冠形狭长和在此基础上较为宽大的冠幅;中龄林阶段为低冠长率和宽大的冠幅,以及在该基础上狭长的冠形;近熟林阶段为宽大的冠幅,低冠长率和在该基础上狭长的冠形。

关键词:杉木;树冠形态因子;生长形质;通径分析

中图分类号:S791.27 文献标志码:A

文章编号:1000-2286(2023)04-0894-11

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



收稿日期:2023-03-21 修回日期:2023-04-15

基金项目:中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2020MB005)、中国林科院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(CAFYBB2021ZE005)和“十三五”国家重点研发计划(2017YFD0600905)

Project supported by the Fundamental Research Funds of CAF(CAFYBB2020MB005), Fundamental Research Funds of CAF(CAFYBB2021ZE005) and National Key Research and Development Program(2017YFD0600905)

作者简介:张利利,工程师,硕士生, orcid.org/0009-0004-9598-2015.635764832@qq.com; *通信作者:谭新建,教授级高工,主要从事林业经济管理研究, orcid.org/0009-0002-1262-0066, bjtan@caf.an.cn。

Path Analysis of Canopy Morphological Factors and Growth Form Quality of Chinese Fir Plantation with Different Forest Ages

ZHANG Lili, TAN Xinjian*, SI Fangfang, ZHANG Huacong,
LI Aoxiang, PAN Wenting¹

(Subtropical Forestry Experimental Center, Chinese Academy of Forestry, Fenyi, Jiangxi 336600, China)

Abstract: [Objective] The effects of canopy morphological factors of Chinese fir at different ages on individual volume index, DBH and non-nodular wood length were explored to determine the focus and direction of canopy morphological regulation of Chinese fir at different ages, thus providing scientific basis for cultivating fast-growing and high-yield Chinese fir forest. [Method] Three Chinese fir plantations of different age groups in Dagang Mountain of Jiangxi Province were studied. Correlation analysis and path analysis were used to analyze the relationship between the canopy morphological characteristics of Chinese fir trees and the individual volume index, DBH and length of non-knot timber. [Result] The correlation between canopy morphological factors and growth traits was obvious at different age stages, and the correlation was most significant at the middle-aged forest stage. The direct effects of canopy morphological factors on growth shape and quality traits were significantly different. Canopy width and canopy shape rate had a highly significant promoting effect on growth shape and quality traits, while canopy length rate had a highly significant negative effect on growth shape and quality traits. With the growth of the stand, the influence of canopy morphological factors on growth shape and quality traits was gradually weakened. The best time to regulate the canopy form of Chinese fir is young forest and middle-aged forest stage. In different growth stages of the stand, the relative importance of canopy morphological factors to growth and form traits showed different orders, and the focus and direction of the regulation of ideal canopy shape in the cultivation of fast-growing and high-yield Chinese fir were different. The relative importance of canopy morphological factors to the three growth shape and quality traits in young forest stage was ranked first in canopy length rate, second in canopy shape rate and third in crown width in descending order. In the middle-aged forest stage, the relative importance of canopy morphological factors on DBH and individual volume index was ranked from large to small as canopy length rate, canopy width and canopy shape rate, while the relative importance of length of non-knot timber was ranked from large to small as canopy length rate, canopy shape rate and canopy width. Canopy shape rate, canopy width and canopy length rate ranked first in the relative importance of canopy morphological factors to individual volume index, DBH and length of non-knot timber respectively in near-mature forest stage. In the young forest stage, the relative importance of canopy morphological factors to the three growth traits was ranked from high to low as follows: canopy length rate, canopy shape rate and canopy width. In the middle-aged forest stage, the order of relative importance of DBH and individual volume index from high to low was canopy length rate, canopy width and canopy shape rate, and the relative importance of the length of non-nodal wood from high to low was canopy length rate, canopy shape rate and canopy width. In the near-mature forest stage, the most important crown morphological factors affecting individual volume index, DBH and non-nodal length were canopy shape rate, canopy width and canopy length rate, respectively. The relative importance of canopy morphological factors on the overall effect of growth traits was ranked as follows: In young forest stage, canopy length rate ranked the first, canopy shape rate the second and canopy width the third. In the middle-aged forest stage, canopy length rate ranked first, canopy width the second and canopy shape the third respectively. In the

near-mature forest stage, canopy width, canopy length and canopy shape rank the first, the second and the third respectively. [Conclusion] The key direction to promote the rapid growth and high yield of Chinese fir canopy regulation is to reduce the canopy length rate in both young and middle-aged forest stages. In the near-mature forest stage, the focus and direction of promoting the regulation of individual volume index is to make the canopy long and narrow, the increasing the DBH is to increase the canopy width, and the promoting of non-knot timber length is to reduce the canopy length. The ideal canopy shape of different age stages is as follows: low canopy length ratio, narrow canopy shape and relatively broad canopy width in the young forest stage; low canopy length ratio, broad canopy width and narrow canopy shape the middle-aged stage; broad canopy width, low canopy length ratio and narrow canopy shape in the near mature forest stage.

Keywords: Chinese fir; canopy morphological factors; growth shape and quality traits; path analysis

【研究意义】杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国长江流域、秦岭以南地区栽培最广、生长快、材质好、病害少且经济价值高的用材树种, 占我国人工林蓄积量的 25%, 在林业生产中发挥着重要作用^[1-2]。长期以来, 由于经营者们盲目追求杉木的集约化经营效果, 导致杉木的纯林化, 多代连栽的现象越来越普遍, 杉木生产力受到严重影响^[3-4], 培育大径材林木成为解决森林资源短缺问题的重要经营措施。树冠能将太阳能转化为生产力, 其生长状态能体现林木的竞争能力和生产力水平^[5-8], 而树冠形态调控技术(如目标树选择、密度管理等)对于培育大径材林木尤为关键^[9]。因此, 在生产经营活动中, 明确不同林龄阶段树冠形态因子与林木生长形质间的关系, 对于经营者精确掌握树冠形态调控的方向及重点、制定科学的树冠形态调控经营措施, 培育速生丰产优质的人工林具有重要意义^[10-11]。【前人研究进展】部分学者对林木树冠形态因子对生长形质性状间的关系进行了研究, 如田红灯等^[11]对不同林龄杉木人工林冠幅与生长因子的关系进行了研究, 结果表明冠幅及冠形率在不同的生长阶段主导因子并不相同; 欧建德等^[10]分析了幼林南方红豆杉的树冠形态特征对单株材积指数等因子的影响, 结果表明优质的南方红豆杉调控重点和方向是降低树冠率; 肖伟伟等^[12]就 16 年生水曲柳的树冠形态与林木生长形质的关系及其对修枝的响应进行了研究, 认为树冠形态特征对生长形质具有显著的直接作用。已有的研究多数只选择一个林龄进行分析或仅分析生长因子对冠幅因子的作用, 对于不同林龄杉木树冠形态与生长形质之间关系及规律的研究尚不多见。【本研究切入点】由于不同的经营措施、立地条件的差异、气候条件和人为因素的干扰随机出现在实际经营活动中, 导致树冠形态因子与林木生长形质和木材品质之间的关系十分复杂, 并可能存在非线性关系^[12-14], 而通径分析可以通过自变量与因变量之间表面直接相关性的分解, 来研究自变量对因变量的直接重要性和间接重要性^[15-16]。【拟解决的关键问题】为了准确反映杉木树冠形态因子(冠幅、冠形率、冠长率)与不同生长形质指标间的关系, 本研究以江西大岗山不同林龄阶段的杉木人工林为研究对象, 使用通径分析方法剖析冠幅、冠形率、冠长率对生长形质性状的影响, 阐明不同林龄阶段树冠形态调控的重点与方向, 为培育速生丰产优质干材的杉木提供科学理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于中国林业科学研究院亚热带林业实验中心长埠实验林场, 地处江西省分宜县最南端, 境内气候宜人, 四季分明、温暖湿润; 年平均气温 16.5 °C, 七月平均最高温度 28.8 °C, 一月平均最低温度 5.3 °C, 年降水量 1 500~1 800 mm, 年无霜期 265 d, 海拔 170~1 090 m, 属亚热带湿润季风气候, 土质以黄红壤为主。

1.2 试验材料

2021 年 10—11 月, 在中国林业科学研究院亚热带林业实验中心长埠实验林场选择立地条件基本相同、生长态势良好且分布邻近的杉木人工林样地 9 个, 其中幼龄林(9 a)、中龄林(15 a)、近熟林(21 a)样地各 3 个(由于成熟林阶段树冠结构已趋于稳定, 因此本研究未设置成熟林分的样地), 样地大小为

30 m×30 m,林分概况见表1(自然稀疏及间伐抚育措施使林分密度随林龄增大而减小)。对样地内胸径≥5 cm的活立木进行每木检尺,调查因子包括胸径、树高、活枝下高、冠幅等,共调查1 364株树木,其中幼龄林668株,中龄林630株,近熟林288株。

表1 不同龄级杉木样地概况

Tab.1 General situation of Chinese fir plots of different age grades

林龄 Forest age	林分密度/(株·hm ⁻²) Stand density	平均树高/m Mean tree height	平均胸径/cm Average DBH	郁闭度 Canopy density	海拔/m Altitude	坡向 Aspect	坡度/(°) Slope
幼龄林(9 a) Young forest	2 474	8.82	11.64	0.9	220	西	28
中龄林(15 a) Middle aged forest	2 333	10.56	13.82	0.8	180	东	25
近熟林(21 a) Near-mature forest	1 066	12.83	17.41	0.8	165	东	21

1.3 指标测定

冠幅(W)是指树木东南西北4个方向的冠幅平均值(m);冠长(L)为树干上第1个活枝到树梢的高度(m);冠长率(R)为冠长(L)与树高(H)二者之比;冠形率(S)为冠长(L)与冠幅(W)的比值;单株材积指数(I_v)是指胸径的平方与树高的乘积;无节材长度是指第一个活枝到树干基部的高度^[17-20]。

本文选取胸径、单株材积指数、无节材长度作为生长形质性状,3个指标的整体评价价值通过多目标一维比较法计算,整体评价价值越高说明林分的生长状态越利于优质林木径材品质的形成^[10,15-16]。

(1)单个生长形质性状效用值的计算公式为 $1-0.9(X_{\max}-X)/(X_{\max}-X_{\min})$, X_{\max} 代表该形质性状在群体中的最大值, X_{\min} 代表该形质性状在群体中的最小值。(2)不同形质性状权重值通过咨询专家意见确定,其中胸径为0.2,单株材积指数为0.5,无节材长度为0.15。(3)整体评价价值为3个形质性状的效用值与分别与其对应的权重系数的乘积之和,公式为 $\sum(\text{指标效用值} \times \text{对应指标的权重系数})$ 。

1.4 分析方法

通径分析可以将自变量与因变量间表面的直接相关性进行分解,研究其直接及间接的重要性,为准确的开展统计决策提供理论依据^[13-14]。本文利用SPSS软件,采用Pearson法,将树冠形态因子(冠幅、冠长率、冠形率)作为自变量(X),生长形质性状(胸径、单株材积指数、无节材长度)作为因变量(Y)进行通径分析,研究树冠结构特征因子对生长形质性状的直接和间接作用。

$$P_{yi} = b_i s_i / s_y; P_{yij} = r_{ij} \times P_{yi} \quad (1)$$

式(1)中: P_{yi} 与 P_{yij} 分别代表直接通径系数和间接通径系数; r_{ij} 为自变量*i*与因变量*j*间的相关系数; b_i 是因变量*y*对自变量*i*的偏回归系数; s_i 、 s_y 分别代表*i*和*y*的标准差。

2 结果与分析

2.1 不同林龄树冠形态因子与生长形质性状的相关性分析

由表2可以看出,不同林龄杉木的树冠形态因子与生长形质特征的关系呈现不同的规律。幼龄林阶段,冠形率、冠长率与无节材长度、单株材积指数呈现极显著的负相关关系($P<0.01$);冠幅与无节材长度间存在着极显著的负相关关系($P<0.01$),与胸径和单株材积指数的相关性不明显;3个树冠形态因子与综合评价价值均呈显著负相关关系($P<0.01$),其中冠长率与综合评价价值的负相关关系最显著,其相关系数为(-0.615)。中龄林阶段和近熟林阶段,冠幅与胸径、无节材长度、单株材积指数、综合评价价值之间均呈现极显著的正相关($P<0.01$),冠长率、冠形率与生长形质性状之间的相关性在中龄林阶段表现为极显著的负相关($P<0.01$),冠长率和冠形率与综合评价价值间呈显著负相关。随着龄级的增加,冠幅与胸径间极显著的正相关关系逐渐加强,冠幅与单株材积指数间的相关性在中龄林阶段最大,为0.503;冠形率、冠长率与综合评价价值及生长形质性状间的相关性均在中龄林阶段最强。树冠形态特征因子间的相关性均表现为显著相关($P<0.05$)或极显著相关($P<0.01$)。

由于树冠形态因子与生长形质性状间的相关系数不能准确地表明原因性状与目的性状之间的关系,因此,需要采用通径分析方法来确定树冠形态因子对杉木生长形质因子的直接作用和重要程度^[10,15-16]。

表 2 杉木树冠形态因子与生长形质性状的相关系数
Tab.2 Correlation coefficient between crown morphological characteristic factors and growth shape and quality characters of Chinese fir

林龄 Forest age	指标 Index	冠幅 Canopy width	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	单株材积指数 Individual volume index	整体评价价值 Overall evaluation
幼龄林 Young forest	冠幅	1.000	-0.269**	0.396**	0.03	-0.325**	0.004	-0.105**
	冠形率	-0.269**	1.000	0.590**	-0.071	-0.467**	-0.080*	-0.222**
	冠长率	0.396**	0.590**	1.000	-0.353**	-0.939**	-0.388**	-0.615**
	胸径	0.03	-0.071	-0.353**	1.000	0.555**	0.967**	0.937**
	无节材长度	-0.325**	-0.467**	-0.939**	0.555**	1.000	0.587**	0.789**
	单株材积指数	0.004	-0.080*	-0.388**	0.967**	0.587**	1.000	0.958**
	综合评价价值	-0.105**	-0.222**	-0.615**	0.937**	0.789**	0.958**	1.000
中龄林 Middle aged forest	冠幅	1.000	-0.478**	-0.187**	0.506**	0.247**	0.503**	0.477**
	冠形率	-0.478**	1.000	0.720**	-0.301**	-0.669**	-0.327**	-0.462**
	冠长率	-0.187**	0.720**	1.000	-0.411**	-0.963**	-0.463**	-0.656**
	胸径	0.506**	-0.301**	-0.411**	1.000	0.536**	0.944**	0.930**
	无节材长度	0.247**	-0.669**	-0.963**	0.536**	1.000	0.603**	0.775**
	单株材积指数	0.503**	-0.327**	-0.463**	0.944**	0.603**	1.000	0.968**
近熟林 Near-mature forest	冠幅	1.000	-0.624**	-0.147*	0.510**	0.202**	0.450**	0.462**
	冠形率	-0.624**	1.000	0.491**	-0.296**	-0.446**	-0.229**	-0.328**
	冠长率	-0.147*	0.491**	1.000	-0.191**	-0.927**	-0.202**	-0.399**
	胸径	0.510**	-0.296**	-0.191**	1.000	0.415**	0.944**	0.948**
	无节材长度	0.202**	-0.446**	-0.927**	0.415**	1.000	0.438**	0.621**
	单株材积指数	0.450**	-0.229**	-0.202**	0.944**	0.438**	1.000	0.972**
	综合评价价值	0.462**	-0.328**	-0.399**	0.948**	0.621**	0.972**	1.000

**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), * indicates significant differences ($P < 0.05$).

2.2 不同林龄树冠形态因子与生长形质性状的通径分析

2.2.1 冠幅、冠形率、冠长率与单株材积指数间的通径分析 通径分析可以反映原因性状对目的性状的重要性。不同林龄的树冠形态因子与单株材积指数间的通径分析(表 3)表明,冠幅对单株材积指数的直接通径系数均高于 0.5,具有显著的促进作用,且在幼龄林阶段时促进作用最明显,直接通径系数为 0.598,但其相关性最低,这是由于冠幅通过冠形率和冠长率对单株材积指数产生了间接负向效应(-0.184, -0.408)。中龄林和近熟林阶段,冠幅通过冠形率和冠长率对单株材积的影响不大,因此相关性与直接作用基本一致,均表现为极显著的正效应。

在不同林龄阶段,冠形率对单株材积指数的直接作用均呈现极显著的促进作用,且随着林龄的增加,冠形率的直接促进作用逐渐降低,这是由于在幼龄林和中龄林阶段,林分密度大,树冠需不断向上生长竞争更多的生长空间^[21-23],冠形率越大,树冠的高度与冠幅的比值越大,树冠形状更狭长,能获取更多的光合作用面积,因此,对于单株材积的增长具显著的促进作用。幼龄林阶段冠形率对单株材积指数的促进作用最为明显,但在该阶段由于冠形率通过冠幅和冠长率对单株材积指数产生了间接的负效应(-0.160, -0.606),因此,该阶段冠形率对单株材积指数的直接作用不能简单通过两者间的相关系数来分析。

随着林龄的增长,冠长率对单株材积指数的负向作用逐渐减弱,这与随着林龄的增加,林木向上争取生长空间的速度下降,树冠长度占整个树高的比例降低有关。在幼龄林阶段,虽然冠长率对单株材积指数的直接通径系数为-1.027,具有极显著的负效应,但其与单株材积指数的相关系数为-0.384,为弱度负效应,这是由于受到冠幅和冠形率对单株材积的间接正效应(0.237,0.405)的影响,导致冠长率对单株材积指数的直接效应不能通过两者之间的相关系数来表示相关。

在幼龄林阶段,树冠形态因子的重要性排序依次为冠长率、冠形率、冠幅,因此,在幼龄林,树冠调控的重点方向以增加单株材积指数应该以降低冠长率,促进冠形狭长着手,可以通过修理侧枝和密度调控的方式促进单株材积的增长;中龄林阶段,树冠形态因子重要性排序第1的为冠长率,第2为冠幅,第3为冠形率,该阶段树冠调控的重点应从降低冠长率并适当增加冠幅宽度着手,可以通过降低林分密度,增加林木生长空间的方式来促进林木的生长^[24-25]。近熟林阶段决定系数排序第1的为冠幅,冠幅是影响单株材积生长的主要因子,该阶段单株材积生长调控的重点方向为增加冠幅生长空间,可以通过抚育间伐的方式对林分空间结构进行优化^[26]。

表3 杉木树冠形态因子与单株材积指数的通径分析

Tab.3 The path analysis between canopy shape factors and individual volume index of Chinese fir

龄级 Age grade	树冠形态因子 Canopy morphological 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	
				幼龄林 Young forest	冠幅	0.010	
幼龄林 Young forest	冠形率	-0.079*	0.687**	-0.160	\	-0.606	0.472
	冠长率	-0.384**	-1.027**	0.237	0.405	\	1.055
中龄林 Middle aged forest	冠幅	0.503**	0.584**	\	-0.205	0.124	0.341
	冠形率	-0.327**	0.429**	-0.279	\	-0.477	0.184
中龄林 Middle aged forest	冠长率	-0.463**	-0.662**	-0.109	0.309	\	0.438
	冠幅	0.450**	0.555**	\	-0.145	0.026	0.308
近熟林 Near-mature forest	冠形率	-0.229**	0.233**	-0.346	\	-0.116	0.054
	冠长率	-0.202**	-0.236**	-0.061	0.114	\	0.056

**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), * indicates significant differences ($P < 0.05$).

2.2.2 冠幅、冠形率、冠长率与胸径的通径分析 树冠形态因子与胸径的通径分析结果见表4。从表4中可以看出,不同龄级阶段,树冠形态因子对胸径的直接作用具有显著差异,随着龄级的增加冠幅对胸径的直接正效应逐渐降低,冠形率对胸径的直接正效应先降低后升高,冠长率对胸径的负效应逐渐减弱。

幼龄林阶段,冠幅和冠形率对胸径均具有极显著的正向直接效应,但冠幅与胸径的相关性表现为极弱度的正效应(0.03),这是由于受到了冠形率(-0.181)和冠长率(-0.392)对胸径的间接负效应的共同影响,导致其相关性不能表示冠幅对胸径的直接效应;冠形率对胸径的直接作用同样具有极显著的促进作用,但其相关性则表现为不显著的弱度负相关,这与冠形率对胸径的直接效应受到冠幅(-0.162)和冠长率(-0.584)对胸径的间接负效应的影响,导致两者的相关性不能表示冠形率对胸径的直接效应有关;由于受到冠幅(0.239)和冠形率对(0.398)胸径的间接正效应的综合影响,冠长率对胸径的直接作用虽为极显著的强度负向作用(-0.989),但其相关性仅呈现极显著的弱度负效应(-0.353)。

中龄林阶段,冠幅和冠形率对胸径的直接正效应较幼龄林阶段有小幅度降低。冠形率对胸径具有极显著的正向作用,但其相关性表现为极显著的负向作用,这是由于冠形率对胸径的直接作用受到冠幅(-0.282)和冠长率对胸径(-0.428)的间接负效应的综合影响,导致冠形率对胸径的直接效应不能通过相关系数来表示有关。近熟林阶段,冠幅对胸径的直接正效应相较于中龄林阶段有所减弱,而冠形率的直接正效应则有小幅度增加。

幼龄林阶段决定系数排序第 1 为冠长率,第 2 为冠形率,第 3 为冠幅;中龄林阶段排序第 1 的为冠长率,第 2 为冠幅,第 3 位冠形率;近熟林阶段排序第 1 的为冠形率,第 2 的为冠幅,第 3 为冠长率,说明在不同龄林阶段调控树冠形态因子以增加林木胸径的重点方向有所差异,幼龄林阶段首先要有较低的冠长率,其次是狭长的冠形和宽大的冠幅;中龄林阶段首先为降低的冠长率,其次为宽大的冠幅,最后再增加冠形的狭长度;近熟林阶段首先为增加冠形的狭长度,其次为宽大的冠幅,最后为较低的冠长率。

表 4 杉木树冠形态因子与胸径的通路分析

Tab.4 The path analysis between canopy shape factors and DBH of Chinese fir

龄级 Age grade	树冠形态因子 Canopy shape factor	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	
				幼龄林 Young forest	冠幅	0.03	
	冠形率	-0.071	0.674**	-0.162	\	-0.584	0.454
	冠长率	-0.353**	-0.989**	0.239	0.398	\	0.978
中龄林 Middle aged forest	冠幅	0.506**	0.590**	\	-0.196	0.111	0.348
	冠形率	-0.301**	0.409**	-0.282	\	-0.428	0.167
	冠长率	-0.411**	-0.595**	-0.110	0.294	\	0.354
近熟林 Near-mature forest	冠幅	0.510**	0.482**	\	0.056	0.013	0.232
	冠形率	-0.296**	0.572**	-0.301	\	-0.056	0.327
	冠长率	-0.191**	-0.115*	-0.053	-0.023	\	0.013

**在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), * indicates significant differences ($P < 0.05$).

2.2.3 冠幅、冠形率、冠长率与无节材长度的通路分析 冠幅、冠形率、冠长率与无节材长度的通路分析结果表明,幼龄阶段冠幅对无节材长度呈现极显著的正向效应,促进无节材长度的增加,但是由于该阶段冠幅对无节材长度的直接作用(0.248)受到冠长率(-0.49)和冠形率(-0.09)的间接负效应的影响,导致冠幅与无节材长度的直接通路系数不能通过其相关系数来表示。中龄林阶段冠幅对无节材长度的直接正效应(0.117)受到冠长率对无节材长度正效应的影响(0.194),导致其相关性系数表现的促进作用比直接的促进效应更强。在 3 个不同龄级阶段,冠形率对无节材长度的直接作用均表现为显著的促进作用,直接正向作用随着龄级的增加逐渐减弱,但由于受冠幅和冠长率对无节材长度间接负向效应的综合影响,冠形率与无节材长度的相关性在 3 个龄级阶段均表现为负效应,因此,冠形率对无节材长度的直接作用不能通过其相关性来表示。冠长率对无节材长度的直接作用均表现为极显著负相关,具有显著的抑制作用,幼龄林阶段冠长率的抑制作用最强,随着林龄的增加抑制作用逐渐减弱。

在幼龄林和中龄林阶段,树冠形态因子对无节材长度影响的重要性排序均为冠长率第 1,冠形率第 2,冠幅第 3,而在近熟林阶段则表现为冠长率第 1,冠幅第 2,冠形率第 3,表现出这个差异的原因可能是在幼龄林和中龄林阶段林木生长速度较快,树冠长度占树高的比例较大,冠形狭长,因此,该阶段对无节材长度的抑制作用相较于平均生长速度更为缓慢的近熟林阶段更强。

综上所述,在幼龄林和中龄林阶段,冠长率对无节材长度的影响具有主导作用,该阶段调控树冠形态以增加无节材长度的重点方向应优先考虑减少冠长率,增加冠形的狭长度,而后增加冠幅宽度;在近熟林阶段增加无节材长度的树冠形态调控方向首要方向为降低冠长率,再是增加冠幅宽度,而后为增加冠形狭长度。

2.2.4 冠幅、冠形率、冠长率与整体评价价值通路分析 由于 3 个树冠形态因子对不同生长形质性状具有不同的作用且在不同林龄阶段表现有所差异,导致不同生长形质性状因子开展树冠调控的重点和方向不一致,但在实际生产中,单株材积指数与胸径、无节材长度等均为评价林木是否为大径材的关键要素^[27-29],因此为明确不同林龄阶段杉木树冠调控的理想树冠特征,评价树冠形态因子对生长形质性状的综合作用,本文对树冠形态因子对生长形质的整体作用进行通路分析,结果见表 5、6。

表5 杉木树冠形态特征性状与无节材长度的通径分析

Tab.5 The path analysis between canopy shape factors and length of non-knot timber of Chinese fir

龄级 Forest age	树冠形态因子 Canopy morphological 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	
幼龄林 Young forest	冠幅	-0.318**	0.248**	\	-0.087	-0.488	0.062
	冠形率	-0.468**	0.324**	-0.066	\	-0.725	0.105
	冠长率	-0.939**	-1.229**	0.098	0.191	\	1.510
中龄林 Middle aged forest	冠幅	0.247**	0.117**	\	-0.064	0.194	0.014
	冠形率	-0.669**	0.133**	-0.056	\	-0.747	0.018
	冠长率	-0.963**	-1.037**	-0.022	0.096	\	1.075
近熟林 Near-mature forest	冠幅	0.202**	0.135**	\	-0.070	0.106	0.018
	冠形率	-0.446**	0.112**	-0.084	\	-0.474	0.013
	冠长率	-0.927**	-0.965**	-0.015	0.055	\	0.931

**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), * indicates significant differences ($P < 0.05$).

表6 杉木树冠形态因子与综合评价值的通径分析

Tab.6 The path analysis between canopy shape factors and overall evaluation value of Chinese fir

龄级 Age grade	树冠形态因子 Canopy morphological 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	
幼龄林 Young forest	冠幅	-0.105**	0.542**	\	-0.170	-0.476	0.294
	冠形率	-0.222**	0.633**	-0.146	\	-0.710	0.401
	冠长率	-0.615**	-1.203**	0.215	0.373	\	1.447
中龄林 Middle aged forest	冠幅	0.477**	0.501**	\	-0.180	0.156	0.251
	冠形率	-0.462**	0.376**	-0.239	\	-0.600	0.141
	冠长率	-0.656**	-0.833**	-0.094	0.271	\	0.694
近熟林 Near-mature forest	冠幅	0.462**	0.527**	\	-0.130	0.047	0.278
	冠形率	-0.328**	0.209**	-0.329	\	-0.209	0.044
	冠长率	-0.399**	-0.425**	-0.058	0.103	\	0.181

**在0.01级别(双尾),相关性显著;*在0.05级别(双尾),相关性显著。

** indicates extremely significant differences ($P < 0.01$), * indicates significant differences ($P < 0.05$).

幼龄林阶段,冠幅对整体评价值的直接通径系数为0.542,具有显著促进作用,但由于受到冠形率和冠长率对整体评价值的间接负效应(-0.170, -0.476)的影响,导致冠幅对整体评价值的相关性表现为显著的负相关;冠形率对整体评价值的相关性为显著负相关,是由于冠形率对整体评价值的直接正效应(0.633)受到了冠幅和冠长率对整体评价值的间接负效应(-0.146, -0.710)的影响。根据决定系数大小可以看出,该阶段树冠形态因子对整体评价值的相对重要性排序由大到小依次为冠长率、冠形率、冠幅。

中龄林和近熟林阶段,冠形率对整体评价值均具有直接促进作用,直接通径系数分别为0.376和0.209,但由于分别受到冠幅和冠长率对整体评价值间接抑制作用的影响,中龄林阶段为-0.239和-0.600,近熟林阶段为-0.329和-0.209,冠形率与整体评价值的相关性表现为极显著负相关;冠幅和冠长率对整体评价值的直接作用分别表现为促进作用和抑制作用,与其相关性表现的基本一致。

根据决定系数的大小可以看出,树冠形态因子的重要性程度排序,幼龄林阶段为冠长率第1、冠形率第2、冠幅第3;中龄林阶段冠长率第1、冠幅第2、冠形率第3;近熟林阶段冠幅第1、冠长率第2、冠形率第3。因此不同林龄阶段树冠调控的理想冠形特征,幼龄林阶段为较低的冠长率和狭长的冠形和在此

基础上较为宽大的冠幅,中龄林阶段为低冠长率和宽大的冠幅以及在该基础上狭长的冠形,近熟林阶段为宽大的冠幅和低冠长率和在该基础上狭长的冠形。

3 结论与讨论

杉木是我国南方地区经济价值高的主要用材树种,研究不同林龄阶段杉木树冠形态因子对生长形质性状的影响,明确不同龄级阶段杉木树冠形态的调控重点,对于实现杉木人工林的速生丰产具有重要意义。本研究表明,树冠形态因子与生长形质性状在林分不同生长阶段均显著相关,说明可以通过林木树冠形态因子预测林木生长形质性状的生长情况,并根据树冠形态因子对不同生长形质性状的影响特点及时进行树冠形态调控。

不同树冠形态因子对生长形质性状的直接作用有所差异,冠幅和冠形率对生长形质性状均表现为极显著的促进作用,冠长率对生长形质性状均呈现极显著的负效应,这与欧建德等^[5]对南方红豆杉、田红灯等^[9]对杉木、肖伟伟等^[14]对水曲柳的研究类似,随着林分的生长,树冠形态因子对生长形质性状的直接促进或抑制作用均具有逐渐减弱的趋势,这是由于随着林龄的增加,林分生长的愈发趋于平稳,林木竞争空间已趋向于饱和,该阶段影响林分生长的因素主要为土壤养分、立地条件等^[21,27-30],因此杉木树冠形态调控的最佳时间为幼龄林和中龄林阶段。

林分不同的生长阶段,树冠形态因子对不同生长形质性状的重要性呈现不同的排序。幼龄林阶段,不同树冠形态因子对生长形质性状因子影响的相对重要性排序均为冠长率第1、冠形率第2、冠幅第3;中龄林阶段树冠形态因子对胸径和单株材积指数影响的相对重要性的排序为冠长率第1、冠幅第2、冠形率第3,对无节材长度的影响的相对重要性排序为冠长率第1、冠形率第2、冠幅第3;近熟林阶段树冠形态因子对单株材积指数、胸径和无节材长度的相对重要性排序第1的分别为冠形率、冠幅、冠长率,排序第2的分别为冠幅、冠长率、冠形率,排序第3的分别为冠长率、冠形率、冠形率。

培育速生丰产杉木理想冠形的调控重点和方向有所差异。幼龄林和中龄林阶段促进生长形质性状(单株材积指数、胸径、无节材长度)增加的冠形调控重点和方向为降低冠长率;近熟林阶段促进单株材积调控的重点和方向为增加冠形狭长度,增加林木胸径的调控方向为增加冠幅宽度,促进无节材长度的调控方向为降低冠长率。

基于树冠形态因子对生长形质性状整体评价值的通径分析及相对重要性确定的杉木不同龄林阶段的理想冠形,幼龄林阶段为较低的冠长率、狭长的冠形和在此基础上较为宽大的冠幅,中龄林阶段为低冠长率和宽大的冠幅以及在该基础上狭长的冠形,近熟林阶段宽大的冠幅、低冠长率和在该基础上狭长的冠形。因此,中幼龄林阶段,可以通过修理侧枝、施肥、除草等抚育方式或适当降低林分密度的方式提高林木向上生长速度,从而降低冠长率;近熟林阶段可以通过抚育间伐的方式去除不合理树冠林木,对林分空间结构进行优化,增加冠幅生长空间。

本文在幼龄林、中龄林、近熟林3个龄组中分别选择了1个林龄的杉木人工林进行了研究,由于不同龄级阶段杉木的树冠调控的重点与方向呈现不同的规律,因此,为更加精准地进行树冠调控,后续研究可以用3年或5年为梯度,选择不同林龄的林分进行持续深入的研究,为更好地实现杉木速生丰产林的培育目标提供理论依据。

参考文献 References:

- [1] 田红灯,申文辉,谭一波,等.不同林龄杉木人工林冠幅与生长因子的关系[J].中南林业科技大学学报,2021,41(5):93-101.
TIAN H D, SHEN W H, TAN Y B, et al. Relationship between crown width and growth factors in Chinese fir plantation among different stand ages[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2021, 41(5): 93-101.
- [2] 熊静,邢文黎,虞木奎,等.杉木人工林下原生与引入树种叶性状变异特征[J].生态学报,2019,39(6):1897-1907.
XIONG J, XING W L, YU M K, et al. Variations in leaf traits of native and introduced tree species in *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Acta ecologica Sinica, 2019, 39(6): 1897-1907.
- [3] 卢妮妮,王新杰,张鹏,等.不同林龄杉木胸径树高与冠幅的通径分析[J].东北林业大学学报,2015,43(4):12-16.

- LU N N, WANG X J, ZHANG P, et al. Path analysis between diameter at breast height, height and crown width of *Cunninghamia lanceolata* in different age[J]. Journal of northeast forestry university, 2015, 43(4): 12-16.
- [4] 谢政锴, 曹小玉, 赵文菲, 等. 不同龄组杉木公益林分空间结构与灌木物种多样性[J]. 生态学杂志, 2022, 41(8): 1466-1473.
- XIE Z C, CAO X Y, ZHAO W F, et al. Spatial structure and shrub species diversity of different aged stands of Chinese fir public welfare forests[J]. Chinese journal of ecology, 41(8): 1466-1473.
- [5] 符利勇, 孙华, 张会儒, 等. 不同郁闭度下胸高直径对杉木冠幅特征因子的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(8): 2434-2443.
- FU L Y, SUN H, ZHANG H R, et al. Effects of diameter at breast height on crown characteristics of Chinese fir under different canopy density conditions[J]. Acta ecologica Sinica, 2013, 33(8): 2434-2443.
- [6] 符利勇, 孙华. 基于混合效应模型的杉木单木冠幅预测模型[J]. 林业科学, 2013, 49(8): 65-74.
- FU L Y, SUN H. Individual crown diameter prediction for *Cunninghamia lanceolata* forests based on mixed effects models [J]. Scientia silvae sinicae, 2013, 49(8): 65-74.
- [7] TUN T N, GUO J, FANG S Z, et al. Planting spacing affects canopy structure, biomass production and stem roundness in poplar plantations[J]. Scandinavian journal of forest research, 2018, 33(5): 464-474.
- [8] RUSSELL M B, WEISKITTEL A R. Maximum and largest crown width equations for 15 tree species in Maine[J]. Northern journal of applied forestry, 2011, 28(2): 84-91.
- [9] 吴明钦. 福建杉木人工林树冠结构研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
- WU M Q. A study on crown structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation in Fujian[D]. Beijing: Journal of Beijing Forestry University, 2014.
- [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.
- OU J D, WU Z Z. Path analysis between canopy morphological characteristics and growth form quality of *Taxus chinensis* var. *mairei* plantation at young age[J]. Journal of Nanjing forestry university (natural sciences edition), 2019, 43(4): 185-191.
- [11] 李生, 陈存及. 混交林中乳源木莲冠层特性与生长的通径分析[J]. 林业科学研究, 2005, 18(3): 310-314.
- LI S, CHEN C J. Path analysis on the crown characteristics and growth of *Manglietia yuyuanensis* in mixed stands[J]. Forest research, 2005, 18(3): 310-314.
- [12] 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.
- XIAO W W, LI H Y, YANG Z J, et al. Relationship of canopy morphological characteristics and growth characters of *Fraxinus mandshurica* and their responses to pruning[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2022, 42(9): 47-54.
- [13] 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.
- DU J J, CHEN Z W. Using SPSS linear regression to achieve path analysis method[J]. Bulletin of biology, 2010, 45(2): 4-6.
- [14] 孙宇, 李际平, 曹小玉, 等. 2020. 基于通径分析的杉木林空间结构与土壤养分关系研究. 中南林业科技大学学报, 40(7): 41-47.
- SUN Y, LI J P, CAO X Y, et al. Research on the relationship between spatial structure and soil nutrients of *Cunninghamia lanceolata* forest based on path analysis method[J]. Journal of central south university of forestry & technology, 2020, 40(7): 41-47.
- [15] 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.
- OU J D, WU Z Z, KANG Y W. Path analysis between canopy characteristics and growth, form quality of *Cunninghamia konishii*[J]. Journal of northeast forestry university, 2018, 46(11): 8-11.
- [16] 欧建德, 吴志庄, 康永武. 乳源木莲树冠形态与生长形质通径分析[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2019, 39(1): 36-42.
- OU J D, WU Z Z, KANG Y W. Path analysis on crown morphology and growth shape of *Manglietia yuyuanensis*[J]. Journal of southwest forestry university, 2019, 39(1): 36-42.
- [17] WANG W W, GE F X, HOU Z Y, et al. Predicting crown width and length using nonlinear mixed-effects models: a test of competition measures using Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) [J]. Annals of forest science, 2021, 78(3): 77.
- [18] 郭艳荣, 吴保国, 郑小贤, 等. 杉木不同龄组树冠形态模拟模型研究[J]. 北京林业大学学报, 2015, 37(2): 40-47.

- GUO Y Y, WU B G, ZHENG X X, et al. Simulation model of crown profile for Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in different age groups[J]. Journal of Beijing forestry university, 2015, 37(2): 40-47.
- [19] 欧建德. 权干对幼龄期南方红豆杉生长形质及树冠结构的影响[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(8): 22-27.
- OU J D. Effects of forking on growth form quality and crown structure of *Taxus chinensis* var. *mairei* Sapling[J]. Journal of northeast forestry university, 2022, 50(8): 22-27.
- [20] 潘磊, 王轶夫, 孙钊, 等. 长白落叶松树冠半径分布特征及其对竞争的影响[J]. 林业科学研究, 2022, 35(3): 27-37.
- PAN L, WANG Y F, SUN Z, et al. The distribution characteristics of crown radius and its response to competition of *Larix olgensis*[J]. Forest research, 2022, 35(3): 27-37.
- [21] 哈努拉·塔斯肯, 蔡慧颖, 金光泽. 树冠结构对典型阔叶红松林生产力的影响[J]. 植物生态学报, 2021, 45(1): 38-50.
- TASIKEN H, CAI H Y, JIN G Z. Effects of canopy structure on productivity in a typical mixed broadleaved-Korean pine forest[J]. Chinese journal of plant ecology, 2021, 45(1): 38-50.
- [22] 史月冬, 郑宏, 叶代全, 等. 杉木生长性状的空间与竞争效应及其对遗传参数估计的影响[J]. 林业科学, 2022, 58(5): 75-84.
- SHI Y D, ZHENG H, YE D Q, et al. Spatial and competition effects for growth traits of Chinese fir and their impacts on estimations of genetic parameters[J]. Scientia silvae sinicae, 2022, 58(5): 75-84.
- [23] 熊光康, 厉月桥, 熊有强, 等. 低密度造林对杉木生长、形质和材种结构的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(3): 165-173.
- XIONG G K, LI Y Q, XIONG Y Q, et al. Effects of low stand density afforestation on the growth, stem-form and timber assortment structure of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Journal of nanjing forestry university (naturalsciences edition), 2021, 45(3): 165-173.
- [24] 卢德浩, 陈世清, 谢惠燕, 等. 不同密度杉木人工林林分生长和林分结构差异研究[J/OL]. 西北林学院学报: 1-18.
- LU D H, CHEN S Q, XIE H Y, et al. Study on the difference of stand growth and stand structure of *Cunninghamia lanceolata* plantation with different densities[J/OL]. Journal of Northwest forestry university: 1-18.
- [25] 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): 9.
- 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): 9.
- [26] 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]. Forest research, 2000, 13(2): 177-181.
- [27] 晏姝, 王润辉, 邓厚银, 等. 南岭山区杉木大径材成材影响因子研究[J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(2): 80-89.
- YAN S, WANG R H, DENG H Y, et al. Study on impact factors of large-diameter wood formation of *Cunninghamia lanceolata* in Nanling Mountains[J]. Journal of south China agricultural university, 2021, 42(2): 80-89.
- [28] 黄磊, 王港, 杨冰, 等. 杉木大径材成材与地形、土壤养分的关系[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2021, 50(5): 619-623.
- HUANG L, WANG G, YANG B, et al. Relationship between Chinese fir timber, topography and soil nutrient[J]. Journal of Fujian agriculture and forestry university (natural science edition), 2021, 50(5): 619-623.
- [29] 费裕狮, 吴庆锥, 张筱, 等. 不同林下植被管理措施对杉木大径材培育林土壤特性与出材量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(3): 626-634.
- FEI Y C, WU Q Z, ZHANG X, et al. Effects of different undergrowth vegetation management measures on soil characteristics and timber outturn of a large-diameter, timber plantation of *Cunninghamia lanceolata*[J]. Chinese journal of applied and environmental, 2020, 26(3): 626-634.
- [30] 陈嘉琪, 赵光宇, 李仰龙, 等. 杉木人工林土壤磷素形态及含量的林龄变化[J]. 林业科学, 2022, 58(5): 10-17.
- CHEN J Q, ZHAO G Y, LI Y L, et al. Age changes of soil phosphorus form and content in Chinese fir plantations[J]. Scientia silvae sinicae, 2022, 58(5): 10-17.