

北京地区侧柏人工林密度效应

段 劼, 马履一*, 贾黎明, 徐程扬, 贾忠奎, 车文瑞

(北京林业大学省部共建森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 密度是影响森林尤其是人工林生长的重要因素, 林冠层是森林生态系统与其他系统进行能量和物质交换的重要场所, 树木及树冠生长对林分密度的响应关系可以看作是生物对环境变化产生的适应性现象。林分密度效应是生态学和森林培育学的重要研究内容之一。以 23 块 8 种不同密度梯度的北京山区侧柏人工幼龄林林分为研究对象分析其树木生长及树冠生长对密度的响应关系, 其中树冠指标使用了参照了美国林业局 (USDA) 的树冠调查指标。研究结果表明: (1) 林分平均胸径、平均树高和平均冠幅生长均随密度增大而减小, 林分密度大于 3000 株/hm² 时各指标减小的趋势变缓, 使用异速生长模型可以很好地拟合这种变化关系; (2) 随密度增加, 树冠水平方向和垂直方向生长均到显著地抑制作用, 树冠外形表现出由饱满冠型向狭长冠型变化的适应性现象; (3) 使用树冠二维、三维指标与密度进行相关性分析可知树冠长度、树冠率等指标与林分密度呈负相关关系, 树冠圆满度及树冠生产效率与密度表现出极显著正相关关系; (4) 采用枝解析的方法研究了树枝长度、材积的平均生长量、连年生量与密度的关系, 结果表明幼龄期各生长量差异不大; (5) 在建立冠幅模型时考虑了自变量间的多重共线性问题, 所建的胸径单自变量二次方模型能够很好地预测侧柏人工幼龄林冠幅生长过程, 模型相关系数 R^2 为 0.961。

关键词: 侧柏人工林; 树冠; 林分密度; 生长模型; 北京山区

The density effect of *Platycladus orientalis* plantation in Beijing area

DUAN Jie, MA Lüyi, JIA Liming, XU Chengyang, JIA Zhongkui, CHE Wenrui

Key Laboratory for Silviculture and Conservation of the Ministry of Education College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract: Density is one of the important factors that affects the growth of forests, especially plantations. Tree crowns are places where forest ecosystems exchange energy and materials with other systems. The response of the growth of trees and tree crowns to forest density can be considered as a phenomenon of adaptation by organisms to the environment. Studying the response of tree growth to density effect is an important topic in ecology and silviculture. The objective of this study was to investigate the relationship between tree diameter at breast height (DBH), tree height, crown width and the stand density in even-aged *Platycladus orientalis* plantation. In total 23 plots with 8 different densities were established in Beijing mountain area, China in 2009. The densities of stands varied between 755 and 4577 trees/hm². Two type of plots with an area of 20 m × 20 m or 15 m × 15 m were created, Average ages of selected stands were between 24 and 40 years. We referred to the crown investigation indexes developed by USDA, Forest Service during the investigation. The crown growth indexes were grouped into two-dimensional indexes and three-dimensional indexes. Results of the investigation were shown as following: (1) Stand density affected the growth indexes significantly. The growth of the average DBH, average height, and average crown width all decreased accompany the increase of density. The effect was particularly obvious when the density was under 3000 trees/hm². When the density was above 3000 trees/hm², the decrease of the growth indexes slowed. We built alleometric models to predict DBH, tree height, and crown width from the density. The format of the model was $y = ax^b$, the correlation index (R^2) were 0.990, 0.955 and 0.891 for three models. (2) The increase of density affected the shape of tree crowns greatly. The crowns were inhibited significantly in both horizontal and vertical directions. The shape of tree

基金项目: 国家林业局“948”资助项目 (2005-4-02); 北京市教育委员会科学研究与科研基地建设项目 (SYSB12009); 北京市教育委员会学科与研究生教育项目 (CXYB12008-2010); 2003 北京市重点资助项目 (2003-018-L18); 北京林业大学科技创新计划 (BJJD200904)

收稿日期: 2010-01-03; **修订日期:** 2010-03-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: maluyi@bjfu.edu.cn

crowns appeared to change from plump to narrow. (3) Two-dimensional indexes and three-dimensional indexes were correlated to tree densities. The result showed that the crown length, crown ratio, crown production efficiency, crown density, composite crown surface area, composite crown volume were negatively correlated with the tree density, while the crown fullness ratio, crown production efficiency were positively correlated with the tree density. All those indicated that the increase of stand density could inhibit the growth of tree crowns significantly. (4) Branches were analyzed to study the effects of tree densities on the length of branch, average growth increment of branch volume, and consecutive annual growth increment of branch volume. The increment of length of branch was not significantly different from that of the branch volume in young stands. The increment of length of branch did not change significantly as the tree density has been changed. The growth of volume of branch responded negatively to the tree densities. This might be caused by the complex environment. (5) Crown width is the most easy-to-measure index of tree crowns during forest inventory and other indexes can be calculated from it. A model was constructed to predict the crown width from *DBH*, crown ratio, and stand density. After considering the multicollinearity of independent variables, the final model was only based on *DBH*. The *DBH-CW* model could predict the growth of crown width of young *Platycladus orientalis* plantations well ($R^2 = 0.96$).

Key Words: *Platycladus orientalis* plantation; crown; stand density; growth model; Beijing mountain area

森林冠层是树木转换利用太阳能形成生产力的主要场所,是森林生态系统与土壤、大气进行热量、水分和其它物质交换的能量转换场所^[1-3]。树冠生长往往受到树木自身遗传因素和环境的双重作用,表现在冠幅、枝条数量、叶面积、冠长、树冠表面积和体积等的变化上。国外对树冠的研究较多,按照研究尺度划分为两类:第一类研究在林分或者景观尺度上进行,主要内容是树冠与森林生态系统功能的关系,例如树冠与野生动物习性、病虫害发生概率、火灾隐患、能量和气体交换以及森林微气候等的关系^[4-8];第二类研究在单木尺度上,内容包括生长模型构建,树冠结构变化等方面^[9-11]。国内对树冠的研究相对较少,研究对象多以人工针叶林和经济树种为主,如落叶松、樟子松、苹果树、茶树等,研究内容包括树冠分枝角度、着枝位置、光分配及光响应等^[12-17]。林分密度是影响林分生长和造成林木间竞争的主要原因之一,同时密度也是营造林工作中能够有效控制的因子之一^[18]。国内外对林分密度的研究主要包括 3 个方面:(1)林分密度控制,通过控制林分密度来实现营林目标^[19-22];(2)密度效应研究,密度对林木及林分生产力的影响^[23-27];(3)密度对森林生态系统组分的影响等^[28-30]。总的来看,多数有关密度的研究均是与森林抚育间伐等经营措施结合起来进行的。

林分密度和树冠之间有必然的联系^[23,31],常见的是在林分及单木生长模型研究中树冠指标常被用来表征密度作为建模的竞争指标^[32];此外,在森林抚育工作中可以通过树冠来确定合理经营密度^[33]。国外对密度和树冠之间相互影响的研究较多^[34-36],国内相关研究较少。本文以北京地区侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林为例研究了树木及树冠生长与密度的响应关系,研究目的是通过分析森林密度效应来为人工林的科学抚育管理及森林生态系统经营提供依据,同时为相关理论研究提供参考。

1 试验地概况与研究方法

1.1 试验地概况

1.1.1 昌平十三陵林场

林场地处北京市昌平区,北纬 40°44',东经 116°35',属燕山低山丘陵区,海拔 68—954.2 m,春季干旱多风,夏季多雨,冬季寒冷干燥;年均温 11.8℃,全年 $\geq 0^\circ\text{C}$ 积温为 4500℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 积温为 4200℃;年均降水量 631 mm,6—8 月份占全年降水量的 76%;林分类型以人工侧柏林和油松林(*Pinus tabulaeformis*)为主,林龄在 2—48a 之间,其中中幼龄林的面积、蓄积占林地总面积的 90%。

1.1.2 密云穆家峪水漳村林场

林场位于北京密云县穆家峪镇,北纬 40°25',东经 116°53',海拔 220—599 m;年均温 8.5—9.5℃, $\geq 10^\circ\text{C}$ 的积温为 3385—4210℃;年降水量 660 mm,6—9 月份的降水量占全年的 80% 以上;土壤为山地淋溶褐土和山

地褐土;植被分布于浅山丘陵和低山地带,主要树种有侧柏、油松和刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等,森林覆盖率达到 56%。

1.1.3 西山林场

位于北京西郊,总面积约 0.8 万 hm^2 ;海拔 180—250 m,最高海拔 823 m;年均温 11.8℃,年均降水量 630 mm,集中于 6—9 月份(约占全年 70%左右);土壤多为山地淋溶褐土,成土母岩以硬砂岩为主,土壤酸碱度在 5.5—7.5 左右,土壤质地上层多为砂质土,下层较粘,土壤含水量只有 8%。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置

于 2009 年在上述林场设置了 23 块侧柏人工幼龄林样地(林龄 <40a),按照密度梯度分为 8 个密度组,范围从 755 株/ hm^2 到 4577 株/ hm^2 ,除第 8 密度组有 2 个样地外其余密度组均有 3 个样地,取各密度组的平均值作为研究变量;面积主要为 20 m × 20 m,由于研究区内高密度的侧柏人工林均进行过不同程度的抚育,所以第 7、8 密度组只设置了 15 m × 15 m 面积的样地,各样地具体情况见表 1。

表 1 侧柏样地特征表

Table 1 Basic characteristics of *Platycladus orientalis* plantation plots

分组编号 Group number	林龄 Age/a	密度 Density /(株/ hm^2)	海拔 Elevation /m	坡向 Aspect	坡度 Slope /(°)	平均胸径 Mean DBH /cm	平均树高 Mean H /m	平均冠幅 Avg. crown width/m
1	33—35	755—933	155—282	N, SE	6—23	13.8	8.8	3.1
2	33—35	1155—1422	115—267	N, S	5—8	11.9	7.5	2.8
3	26—34	1600—1867	131—155	N, SE	5—20	9.8	6.7	2.1
4	35—40	2000—2500	131—140	S, SE	5—8	8.3	6.2	2.0
5	33—36	2800	201—231	NE, S	5—30	8	5.8	2.0
6	26—34	3200—3350	170—175	NE, S	6—23	7.6	4.9	1.9
7	33—35	3500—3835	115—230	S, SE	6—20	6.8	4.8	1.9
8	33—36	4333—4577	131—271	S, SE	3—6	6.1	5.1	1.8

1.2.2 林分调查

记录林分经纬度、海拔、坡向、坡度等因子;林分年龄查照各林场小班资料;每木胸径使用胸径尺测量;树高、活枝下高使用鱼竿测量;冠幅使用皮尺测量。

1.2.3 单木树冠调查

将树冠调查指标分为两类:二维和三维指标。二维指标代表水平和垂直方向的树冠特征,包括冠幅(CW, crown width)、树冠长度(CL, crown length)、树冠率(CR, crown ratio)、圆满度(CFR, crown fullness ratio)等;三维指标代表树冠三维空间的特征^[37],包括树冠密度(CD, crown density)、树冠表面积(CCSA, composite crown surface area)、树冠体积(CCV, composite crown volume)、树冠生产效率(CEFF, crown production efficiency)等,可以看出二维指标一般能够直接观测,计算简单,三维指标则是根据二维指标计算得到。

(1)冠幅 树冠的垂直投影宽度,一般分为东西冠幅、南北冠幅;

(2)树冠长度 树冠顶部到树冠底部的垂直长度;

(3)树冠率 树冠长度与树高的比值;

(4)圆满度 冠幅与树冠长度的比值;

(5)树冠密度 确定了树冠外轮廓后,目测树冠外层枝条、叶片和其它组织阻挡可见光穿过树冠的数量占整个树冠表面积的百分比;

(6)树冠表面积计算公式为:

$$CCSA = \frac{4\pi \cdot CL}{3R^2} \left[\left(R^2 + \frac{R^4}{4CL^2} \right)^{1.5} - \left(\frac{R^4}{4CL^2} \right)^{1.5} \right] CD \quad (1)$$

(7) 树冠体积计算公式为:

$$CCV=0.5 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot CL \cdot CD$$
 (2)

(8) 树冠生产率计算公式为:

$$CEFF=\frac{CCSA}{CCV}$$
 (3)

式中, *CCV* 为树冠体积, *CCSA* 为树冠表面积, *CEFF* 为树冠生产率, *R* 为树冠宽半径, *CL* 为树冠长度, *CD* 为树冠密度。

1.2.4 枝解析

采用枝解析法分析侧柏树冠生长动态。在上述各密度组中分别选择一块样地进行取样, 每块样地内选择与平均胸径接近的 3 棵样木, 按南北方向各取 1 个最长枝进行枝解析。枝解析方法与树干解析方法一致^[18], 各区分段长度均为 0.25m, 枝圆盘厚度为 3cm, 龄阶定为 3a; 测量每个圆盘垂直方向和水平方向两条直线的长度并取平均值作为该龄阶直径; 枝龄与每个圆盘年轮数之差作为树枝长到该断面长度所需要的年数, 然后计算出各龄阶树枝长度; 根据胡伯尔公式计算龄阶材积; 据此可以计算出树枝的直径、长度及材积生长量:

$$V=g_{\frac{1}{2}}l=\frac{\pi}{4}d_{\frac{1}{2}}^2l$$
 (4)

式中, $g_{\frac{1}{2}}$ 为枝区分段中央断面积, $d_{\frac{1}{2}}$ 为其中央直径, l 为区分段长度。

本文所有数据分析、处理及模型构建均使用了 EXCEL 2007 和 SPSS V15.0 统计软件进行, 文中各模型构建主要使用了 SPSS 软件中的曲线回归功能项, 并参考模型 R^2 值、 F 值及 P 值来判定模型的拟合优度。

2 结果与分析

2.1 不同密度下侧柏单木生长变化

林分的胸径、树高及生物量等随林分密度增大均会减小^[38], 但也有相反结论^[39-40]。本文侧柏林胸径、树高及冠幅随密度变化见图 1 和图 2, 可知各变量均随密度增大而减小; 当密度增大到 3000 株/hm² 时, 减小趋势趋于稳定; 用多个模型对其变化进行拟合, 以异速生长模型拟合效果最好, 模型形式为: $y=ax^b$, 拟合参数见表 2。结果表明侧柏林林分密度的增大抑制了林木纵向和横向的生长, 林内竞争加剧, 有限的光照、水分及土

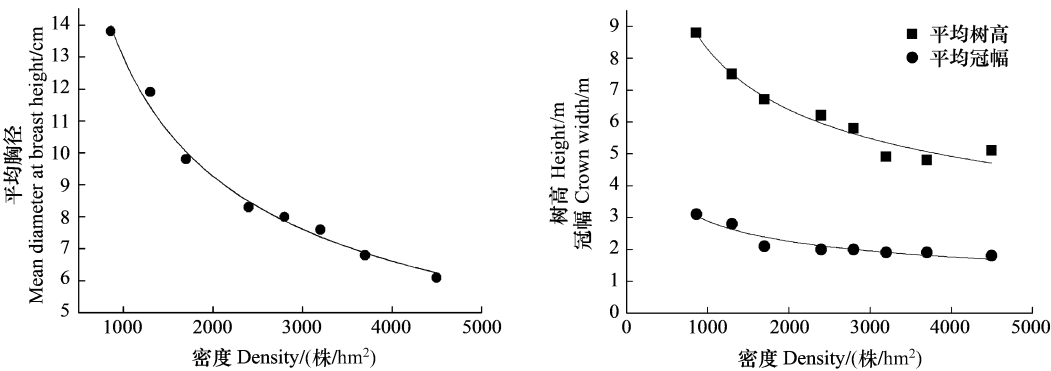


图 1 侧柏人工林主要生长指标随密度变化图

Fig. 1 Figure of the relationship of main growth indices and density of *Platycladus orientalis* plantation

表 2 侧柏人工林生长指标与密度异速生长模型

Table 2 Allometric model of growth indices and density of *Platycladus orientalis* plantation

生长指标 Growth index	参数 Parameters		R^2	F	P
	a	b			
胸径 DBH	374.5	-0.5	0.990	4863.5	0.000
树高 H	111.0	-0.4	0.955	1850.1	0.000
冠幅 CW	34.2	-0.4	0.891	809.3	0.000

壤元素等生长资源不能满足高密度林木的需求。本结果与大多数研究一致。

2.2 侧柏树冠指标与密度的响应

为分析树冠与林分密度的响应关系,首先使用二维及三维树冠指标与密度做相关分析,相关关系矩阵见表3。从表3可以看出林分密度对树冠生长有较强的抑制作用,其中,密度对树冠长度(*CL*)、树冠率(*CR*)和树冠生产效率(*CEFF*)表现出极显著的抑制作用,这表明树冠在水平和垂直两个方向的生长均受到高密度的影响;树冠密度(*SD*)是树冠光合叶面积的度量值之一,该值也随密度增加而减小,这表明密度增加后树冠光合叶面积减小,树冠变得稀疏;树冠圆满度(*CFR*)与密度呈正相关性,原因是冠幅随密度减小的趋势不及树冠长度快,导致圆满度表现出随密度增大而增加的现象;树冠生产效率(*CEFF*)与密度呈极显著正相关(相关系数为0.917),这是由于林分密度增加,冠形变得狭长,表现出生物个体对环境变化的适应性,在高密度条件下狭长型树冠能够获得更多的光照,同时也能够说明在较差生长环境中,树木个体只有提高生产效率才能维持自身生长。

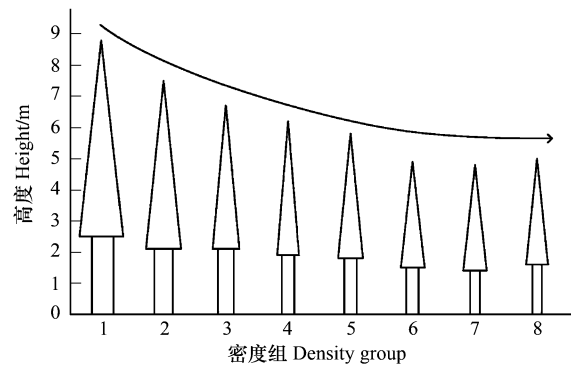


图2 不同密度组侧柏人工林单木生长示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the single tree growth condition of *Platycladus orientalis* plantation in different density group

表3 侧柏树冠指标与密度相关关系矩阵

Table 3 Correlation coefficients matrix among crown indices of *Platycladus orientalis* plantation and stand density

项目 Item	二维树冠指标 Crown indices in two dimension					三维树冠指标 Crown indices in three dimension		
	<i>D</i>	<i>CL</i>	<i>CR</i>	<i>CFR</i>	<i>CD</i>	<i>CCSA</i>	<i>CCV</i>	<i>CEFF</i>
<i>D</i>	1.000	-0.919 **	-0.906 **	0.624	-0.497	-0.795 *	-0.791 *	0.917 **
<i>CL</i>		1.000	0.838 **	-0.523	0.763 *	0.947 **	0.945 **	-0.968 **
<i>CR</i>			1.000	-0.401	0.432	0.785 *	0.791 *	-0.882 **
<i>CFR</i>				1.000	-0.067	-0.268	-0.243	0.370
<i>CD</i>					1.000	0.888 **	0.881 **	-0.735 *
<i>CCSA</i>						1.000	0.998 **	-0.938 **
<i>CCV</i>							1.000	-0.948 **
<i>CEFF</i>								1.000

* *: $P < 0.01$; *: $P < 0.05$; *D*:密度; *CL*:树冠长度; *CR*:树冠率; *CFR*:圆满度; *CD*:树冠密度; *CCSA*:树冠表面积; *CCV*:树冠体积; *CEFF*:树冠生产效率

2.3 侧柏树冠生长量与密度的响应关系

年生长量这一指标能够体现个体在生长过程中因受到环境变化即外界干扰后的详细变化情况^[18]。图3、图4分别为侧柏枝长与枝材积的平均生长量、连年生长量图。总体来看,两指标均随年龄增大而增加,幼龄时各密度组枝生长量接近,之后随时间推移不同密度组枝生长量无明显规律;材积平均生长量、连年生长量变化规律与枝长生长量类似,幼龄期枝材积生长量接近,生长后期密度较小的林分其树枝材积生长量明显大于密度较大林分。枝长度和枝材积生长量在各年龄阶段均对林分密度增大表现出抑制响应,但随密度梯度变化不明显,这是由于树枝在生长过程中对外界干扰很敏感,环境条件稍有变化其生长便受到影响。

综上可知林分密度的增大抑制了树冠的生长,降低了树冠光合作用效率,林木树冠为了获得充足的光照而产生了形态上的适应性,即林分密度较低时树冠水平表面积大、生长饱满、树枝生长速度快;反之,当林分密度逐渐增大时冠形变得狭长以增加其垂直冠面积从而获得更多光照,同时树冠变得稀疏,但是树冠内部叶片的受光概率增大。

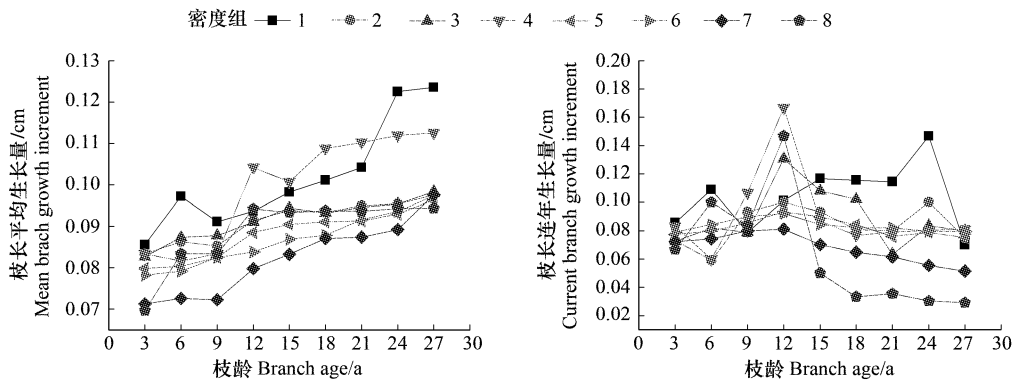


图 3 不同密度组侧柏枝生长量变化图
Fig. 3 Variation diagram of branch growth increment of *Platycladus orientalis* plantation in different density group

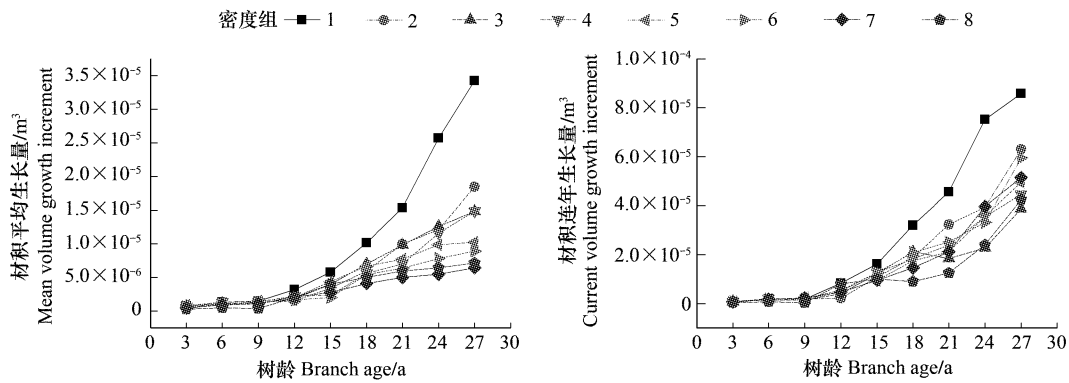


图 4 不同密度组侧柏枝材积生长量变化图
Fig. 4 Variation diagram of branch volume increment of *Platycladus orientalis* plantation in different density group

2.4 冠幅模型研究

冠幅是最容易测量的树冠指标,且其他多数树冠指标都是通过冠幅计算出来的^[37];同时,由于冠幅生长受密度影响很大,所以本文研究了侧柏人工林的冠幅模型,常见的冠幅模型自变量有胸径、树冠率和林分密度^[41-42]。

从模型变量相关关系矩阵(表 4)可以看出冠幅与胸径、树冠率间有极显著正相关关系,与林分密度有极显著负相关关系,但是考虑到密度与胸径、密度与树冠率之间也存在显著相关关系,如果将 3 个自变量同时作为冠幅模型的参数必然会出现多重共线性问题,所以必须对 3 个自变量进行多重共线性诊断来选择最终能够进入模型的变量。

表 4 侧柏冠幅模型变量相关关系矩阵

Table 4 Correlation coefficients matrix of crown model variables of <i>Platycladus orientalis</i> plantation				
变量 Variables	CW	DBH	CR	D
CW	1.000	0.969 **	0.843 **	-0.849 **
DBH		1.000	0.894 **	-0.945 **
CR			1.000	-0.906
D				1.000

* *: $P < 0.01$; CW: 冠幅; DBH: 胸径; CR: 树冠率; D: 密度

表 5 为冠幅模型自变量多重共线性诊断表,表中条件数越大说明自变量间相关性越强,当条件数大于 100 时认为自变量间存在严重多重共线性,方差比例值越接近的自变量表明其存在极强相关性^[43]。表 5 显示自变量条件数为 207.695,远超过 100,而且常数项与胸径的方差比例值几乎相等,且接近于 1,这表明使用胸

径一个自变量足以解释冠幅的生长过程。在确定冠幅—胸径模型时发现线性模型和二次方模型拟合效果较好,见表 6,结果表明胸径一个自变量便能够涵盖其他环境因素等对树冠生长的影响。

表 5 冠幅模型自变量共线性诊断表^①

Table 5 Collinearity diagnostics table of independent variables of crown model

维度 Dimension	特征根 Eigen value	条件数 Condition index	方差比例表 Variance Proportions			
			常数 Constant	DBH	CR	D
2	0.233	4.019	0.00	0.00	0.010	0.042
3	0.003	35.782	0.013	0.014	0.963	0.690
4	0.000	207.695	0.987	0.986	0.027	0.267

表 6 侧柏人工林冠幅模型

Table 6 Crown model of *Platycladus orientalis* plantation

模型 Model	参数 Parameters			R^2	F	P
	常数项 Constant	a	b			
线性模型 Liner model	0.614	0.175		0.929	1233.333	0.000
二次方模型 Quadratic model	2.050	-0.134	0.016	0.961	1505.053	0.000

3 结论与讨论

本文研究了 23 块不同密度梯度的侧柏人工幼龄林样地,分析了密度对林木生长、树冠生长的影响,并得出以下结论:

(1)侧柏人工林生长明显受到高密度的抑制,胸径、树高、冠幅生长均随密度增大而减小,且在密度由 860 株/hm²增加到 3000 株/hm²过程中抑制作用表现最强,林分生产力明显降低,同时研究表明侧柏人工幼龄林经营时最好将密度控制在 3000 株/hm²以下。

(2)侧柏树冠生长同样受到高密度抑制,表现在树冠二维水平方向生长及垂直方向生长均受到高林分密度的抑制,三维树冠密度、树冠表面积及树冠体积均随密度增大而减小。

(3)侧柏枝长生长量和枝材积生长量均随密度增大而减小,但是同年龄树枝的生长量没有随密度梯度表现出明显变化规律,同时各密度梯度幼龄期树枝长和枝材积生长量接近,这说明树木在苗龄期到成熟期的过程中密度对其生长的影响作用逐渐大于环境因素。

(4)本文选取与冠幅呈极显著相关的 3 个变量:胸径、树冠率、林分密度建立冠幅模型,在自变量选取过程中考虑了多重共线性问题,结果表明使用胸径一个自变量就可以解释影响冠幅生长过程中的绝大多数信息,所建冠幅-胸径二次方模型拟合效果较好,能够方便使用。

结构决定功能,森林三大效益的发挥依赖于森林生态系统稳定而复杂的结构,同时,森林会因环境及人为干扰产生形态与结构上的改变。林分密度是影响森林生态系统结构与功能的主要因素,人们往往通过调整林分密度来间接调控森林生长,实现森林的可持续经营。根据林分密度来确定合理抚育方式及抚育强度需要系统研究森林各生长指标对密度的响应关系,这也是实现森林目的经营的重要途径。本文以北京地区侧柏人工幼龄林为例系统研究了不同密度梯度下林分的生长动态变化,研究结果可为该区的森林抚育工作提供理论依据。同时本文还着眼于森林冠层,分析了树枝生长、冠型变化与密度的响应关系。冠层是维持和调节森林生态系统功能的重要场所,是其与外界进行气体和物质交换的边界层,研究冠层生长与密度的响应可为森林生态系统经营提供参考,还可作为以后开展叶片尺度与森林生态系统关系研究提供借鉴。目前,国外有很多森林生态系统模型将冠层作为模拟对象,以此实现叶片生理尺度与林分及景观等较大尺度的森林生长动态模拟^[44-45]。

人工林生态系统的稳定性相对较差,各类干扰因素均会增大其时空异质性,因此本文研究的侧柏人工林密度效应不能完全反映实际生长情况,但可为同类研究提供参考,系统科学的研究结论还需进行大量试验来

获得。

致谢:北京林业大学森林培育学科的杨军教授对本文写作给予帮助。

References:

- [1] Li H G, Huang M R. The relationship between crown characteristics and stemwood growth of new *Poplar* clones. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35 (5): 34-37.
- [2] John A. Crown structure in western hemlock, Douglas-fir, and grand fir in western Washington; horizontal distribution of foliage within branches. *Canadian Journal of Forest Research*, 1996, 26(1): 128-142.
- [3] Ninements U, Kull O. Effects of light availability and tree size on the architecture of assimilative surface in the canopy of *Picea abies*; variation in needle morphology. *Tree Physical*, 1995, 15:307-315.
- [4] Johnson D H; O'neil T A. Wildlife-habitat Relationships in Oregon and Washington. Corvallis; Oregon State University Press, 2001: 736.
- [5] Winchester, N N; Ring R A. Northern temperate coastal Sitka spruce forests with special emphasis on canopies; studying arthropods in an unexplored frontier. *Northwest Science*, 1996, 70(special issue): 94-103.
- [6] Latham, P A; Zuuring H R; Coble D W. A method for quantifying vertical structure. *Forest Ecology and Management*, 1998, 104(1/3): 157-170.
- [7] Rose C L. Forest canopy-atmosphere interactions. *Northwest Science*, 1996, 70(special issue): 7-14.
- [8] Gray A N; Spies T A; Easter M J. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coniferous forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(2): 332-343.
- [9] Bharat P, Pobert E F. Evaluation alternative implementations of the Lake States FVS diameter increment model. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(5): 1759-1771.
- [10] Jungkee C, Graig G L, Jayne V, William G C, George L M. A crown model for simulation long-term stand and gap dynamics in northern hardwood forests. *Forest Ecology and Management*, 2001, 152(1): 235-258.
- [11] Felipe C C, Peter M, Valerie L, Ulises D A. A crown profile model for *Pinus radiata* D, Don in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(12): 2370-2379.
- [12] Liao C X, Li F R. The Predicting models of crown surface area and crown volume for mongolian *Pine* Plantation. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(4): 478-483.
- [13] Han X J. Discuss the disciplinary of branch growth of *Pinus tabulaeformis*. *Journal of Beijing Forestry College*, 1985, (3):50-59.
- [14] Yang M S, Zhang S X. Studies on the nutrient contents of branches and needles of different crown parts of Armand pine (*Pinus armandi* Franch). *Journal of Northwest Forestry University*, 1987, (2): 24-31.
- [15] Wen Z H. A genetic study on light interception character of crown structure in *Populus deltoids*. *Journal of Nanjing Forestry University*, 1992, 16 (3): 11-17.
- [16] Zhang X C, Gao Z Q, Fu Z F, Fang J H, Li T H. Influences of tree form reconstruction on canopy structure and photosynthesis of Apple. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34(3): 537-542.
- [17] Xu C Y. Response of structural plasticity of *Tilia amurensis* sapling crowns to different light conditions. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(3): 339-343.
- [18] Meng X Y. *Forest Mensuration* (3rd edition). Beijing: Chinese Forestry Press, 2006: 112, 171.
- [19] Sheng W T. A study on stand density management and long-term productive of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation. *Scientia Silvae Sinicae*, 2001, 37(5): 2-9.
- [20] Xie K H. Mapping of stand density control of china fir artificial forest of Guangnan county. *Forest Inventory and Planning*, 2006, 31(3): 37-41.
- [21] Zhang H G. Study on stand density control charts of *Fokienia hodginsii*. *Journal of Fujian Forest Science and Technology*, 2006, 33(4):41-44.
- [22] David W H. Stability and density management in Douglas-fir plantations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(2): 367-368.
- [23] Tong S Z, Sheng W T, Zhang J G. Studies on the density effects of Chinese Fir stands. *Forest Research*, 2002, 15(1): 66-75.
- [24] Xu C Y, Zhang H, Jia Z K, Xu K, Du P Z, Wang J G. Effects of stand density and site types on root characteristics of *Platyclusus orientalis* plantations in Beijing mountainous area. *Journal of Beijing Forest University*, 2007, 29(4): 95-99.
- [25] Diao S Q, Shen H L, Pan J Z, Xu C Y, Han G J. Relationship between Individual Growth Index and Stand Density of Young *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantations. *Journal of Northeast Forestry University*, 2005, 33(6): 4-7, 13.
- [26] Danalatos N G, Archontoulis S V, Mitsios L. Potential growth and biomass productivity of *Miscanthus giganteus* as affected by plant density and N-fertilization in central Greece. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31(2): 145-152.
- [27] Dilek D, Ahmet A, Kadiyri U. Effect of population density on growth, biomass and nickel accumulation capacity of *Lemna gibba* (*Lemnaceae*). *Chemosphere*, 2007, 66(3): 553-557.
- [28] Kang B, Liu S R, Cai D X, Lu L H. Effects of *Pinus massoniana* plantation stand density on understory vegetation and soil properties. *Chinese*

- Journal of Applied Ecology, 2009, (10): 2323-2331.
- [29] Scott D R, Constance A H, Karl R B. Does variable-density thinning increase wind damage in conifer stands on the Olympic peninsula? Western Journal of Applied Forestry, 2007, 22(4): 285-296.
- [30] Timothy W S, Joseph E G. Environment factors causing local variation in density and biomass of the *Snail Leptoxis carinata*, in Fishpond Creek, Virginia. The American Midland Naturalist, 2002, 148(7): 172-180.
- [31] Zhang Z D, Xu C Y, Cai B J, Li C C, Yuan S B, Yang C, Peng Q, Jin G X. Influence of stock density on crown structure of *Prunus davidiana*. Journal of Beijing Forestry University, 2009, 37(6): 187-192.
- [32] Sprinz P T, Burkhart H E. Relationships between tree crown, stem, and stand characteristics in unthinned loblolly pine plantations. Canadian Journal of Forest Research, 1987, 17(6): 534-538.
- [33] Wang X Q. The quality control technology of Chinese pine and Oriental Arborvitae forests in mountain area of Beijing. Beijing Forestry University, 2005: 24.
- [34] Mark R, Uldis S, Victor J L. Crown cover is correlated with relative density, tree slenderness and tree height in Lodgepole pine. Forest Science, 2004, 50(6): 356-363.
- [35] Yu S F, Chambers J L, Tang Z M, Barnett J P. Crown characteristics of juvenile loblolly pine 6 years after application of thinning and fertilization. Forest Ecology and Management, 2003, 180(1): 345-352.
- [36] Vaughn N, Ritchie M W. Estimation of crown cover in interior Ponderosa pine stand: Effects of thinning and prescribed fire. Western Journal of Applied Forestry, 2005, 20(7): 240-246.
- [37] Zarnoch S J, Bechtold W A, Stoke K W. Using crown condition variables as indicators of forest health. Canadian Journal of Forest Research, 2004, 34(5): 1057-1070.
- [38] Burkes E C, Will R E, Barron-Gafford G A, Teskey R O, Shiver B. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. Forest Science, 2003, 49(2): 224-234.
- [39] Knoebel B R, Burkhart H E, Beck D E. A growth and yield model for thinned stands of yellow poplar. Forest Science, 1986, 32(2): 27-62.
- [40] Wu J Y, Long Y Z, Dong Y P. Tentative study on Effects of Intermediate Cutting in *Slash Pine* Plantation. Forest Research, 1995, 8(6): 630-633.
- [41] Krajicek J E, Brinkman K A, Gingrich S F. Crown competition: A measure of density. Forest Science, 1961, 7(1): 35-42.
- [42] Bragg D C. A local basal area adjustment for crown width prediction. Northern Journal of Applied Forestry, 2001, 18(1): 22-28.
- [43] He X Q, Liu W Q. Applied Regression analysis. Beijing: China Renmin University Press, 2007: 176-178.
- [44] Amthor J S. Scaling CO₂ photosynthesis relationships from the leaf to the canopy. Photosynthesis Research, 1994, 39: 321-350.
- [45] Leuning R A. Critical appraisal of a combined stomatal photosynthesis model for C₃ plants. Plant Cell Environment, 1995, 18: 339-355.

参考文献:

- [1] 李火根, 黄敏仁. 杨树新无性系冠层特性与生长关系研究. 林业科学, 1999, 35(5): 34-37.
- [12] 廖彩霞, 李风日. 樟子松人工林树冠表面积及体积预估模型的研究. 植物研究, 2007, 27(4): 478-483.
- [13] 韩兴吉. 油松树冠枝生长规律的探讨. 北京林业学院学报, 1985, (3): 50-59.
- [14] 杨茂生, 张硕新. 华山松树冠不同部位枝叶营养元素含量的研究. 西北林学院学报, 1987, (2): 24-31.
- [15] 温志宏. 美洲黑杨冠层光截获特性的遗传学研究. 南京林业大学学报, 1992, 16(3): 11-17.
- [16] 张显川, 高照全, 付占方, 方建辉, 李天红. 苹果树形改造对树冠结构和冠层光合能力的影响. 园艺学报, 2007, 34(3): 537-542.
- [17] 徐程扬. 不同光环境下紫椴幼树树冠结构的可塑性响应. 应用生态学报, 2001, 12(3): 339-343.
- [18] 孟宪宇. 测树学(第三版). 北京: 中国林业出版社, 2006: 112, 171.
- [19] 盛伟彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究. 林业科学, 2001, 37(5): 2-9.
- [20] 解开宏. 广南县杉木人工林林分密度控制图的编制. 林业调查规划, 2006, 31(3): 37-41.
- [21] 张惠光. 福建柏林分密度控制图的研究. 福建林业科技, 2006, 33(4): 41-44.
- [23] 童书振, 盛伟彤, 张建国. 杉木林分密度效应研究. 林业科学研究, 2002, 15(1): 66-75.
- [24] 徐程扬, 张华, 贾忠奎, 薛康, 杜鹏志, 王京国. 林木密度和立地类型对北京山区侧柏人工林根系的影响. 北京林业大学学报, 2007, 29(4): 95-99.
- [25] 刁淑清, 沈海龙, 潘建中, 徐程扬, 韩国君. 樟子松人工幼林密度与个体生长指标的关系. 东北林业大学学报, 2005, 33(6): 4-7, 13.
- [28] 康冰, 刘世荣, 蔡道雄, 卢立华. 马尾松人工林林分密度对林下植被及土壤性质的影响. 应用生态学报, 2009, (10): 2323-2331.
- [31] 章志都, 徐程扬, 蔡宝军, 李翠翠, 袁士保, 杨程, 金桂香. 林木密度对山桃树冠结构的影响. 北京林业大学学报, 2009, 37(6): 187-192.
- [33] 王希群. 北京山区油松、侧柏林质量调控理论与技术的研究. 北京林业大学, 2005: 24.
- [40] 吴际友, 龙应忠, 董云平. 湿地松人工林间伐效果初步研究. 林业科学研究, 1995, 8(6): 630-633.
- [43] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析. 北京: 中国人民大学出版社, 2007: 176-178.