

# 杉木不同龄组树冠形态模拟模型研究

郭艳荣<sup>1</sup> 吴保国<sup>1</sup> 郑小贤<sup>2</sup> 郑德祥<sup>3</sup> 刘洋<sup>4</sup> 董晨<sup>1</sup> 张慕博<sup>5</sup>

(1 北京林业大学信息学院 2 北京林业大学国家林业局森林资源与环境管理重点实验室

3 福建农林大学林学院 4 内蒙古农业大学林学院 5 中国林业科学研究院林业科技信息研究所)

**摘要:**为了对杉木不同龄组树冠形态进行数学模拟,运用非线性回归筛选有效变量的方法将相对树冠半径( $RCR_j$ )和相对树冠长度( $RCL_j$ )确立为树冠形态模型的因变量和自变量。选取福建省顺昌县297株杉木标准木的1485个树冠半径测量值,基于8大类模型分别建立不同龄组的树冠最优模型。对最优模型进行误差和残差分析、模型检验、生物学意义评估,结果表明:幼龄林、中龄林和近成熟林时期拟合效果最优的模型分别是Cubic、Poly4和GaussAmp。使用本文建立的树冠轮廓模型预估树冠形态时,只需测量全树高、最大树冠半径和最大树冠长度。树冠轮廓模型是生长和收获模型的重要组成部分,同时对于评价林木间的竞争、森林小气候和生物多样性也至关重要。

**关键词:**人工林;树冠轮廓;树冠长度;模型模拟

中图分类号:S718.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2015)02-0040-08

GUO Yan-rong<sup>1</sup>; WU Bao-guo<sup>1</sup>; ZHENG Xiao-xian<sup>2</sup>; ZHENG De-xiang<sup>3</sup>; LIU Yang<sup>4</sup>; DONG Chen<sup>1</sup>; ZHANG Mu-bo<sup>5</sup>. **Simulation model of crown profile for Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in different age groups.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(2) 40-47 [Ch, 32 ref.]

1 School of Information Science and Technology of Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

2 Key Laboratory for Forest Resources and Environmental Management of State Forestry Administration, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China;

3 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian, 350002, P. R. China;

4 College of Forestry, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia, 010019, P. R. China;

5 Research Institute of Forestry Policy and Information, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China.

In order to model the crown profile by mathematical simulation for Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in different age groups, this study utilized the nonlinear regression method to select the effective variables, i. e. the relative crown radius ( $RCR_j$ ) as the dependent variable and relative crown length ( $RCL_j$ ) as the independent variable for the crown profile model. Using data from 1485 measurements of crown radius with 297 sample trees of Chinese fir at Shunchang County of Fujian Province, the optimal crown profile models in the different age groups were established based on 8 kinds of foundation models. The analysis of error and residual, model test and biological evaluation were carried out for the optimal crown profile models. Results showed that the optimal crown profile models of the young growth, half-mature, and near-mature and mature forests were the Cubic, Poly4 and GaussAmp,

收稿日期:2013-12-04 修回日期:2014-03-28

基金项目:国家自然科学基金项目(31170513)、“863”国家高技术研究发展计划项目(2012AA102003)。

第一作者:郭艳荣,博士生。主要研究方向:森林可持续经营。Email:yanronguo@163.com 地址:100083北京市清华东路35号北京林业大学信息学院。

责任作者:吴保国,教授,博士生导师。主要研究方向:森林可持续经营与林业信息化。Email:wubg@bjfu.edu.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

respectively. The crown profile models developed can be used to estimate the crown profile which only requires to measure the total tree height, the largest crown radius and length. Such models are important components of growth and yield models, and are also crucial for assessing the level of competition, forest microclimate and biodiversity.

**Key words** plantations; crown profile; crown length; models fitting

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方特有的重要用材树种,具有生长快、产量高、材质好、经济价值显著和运销范围广等特点<sup>[1]</sup>。在我国杉木已有 1 000 多年的种植历史,目前其分布面积达 911 万  $\text{hm}^2$ <sup>[2]</sup>。了解杉木单株林木和林分的生长动态对于当地森林的保护和经营起着重要的作用。

作为树木重要组成部分的树冠,是树木进行光合、呼吸和蒸腾作用的重要场所,是反映树木长期竞争水平的重要指标。树冠的形态结构直观反映了树木的生长发育状况,可以预测林木的生长<sup>[3]</sup>、健康<sup>[4]</sup>、地上生物量<sup>[5]</sup>和树冠的光截获量<sup>[6]</sup>。然而,树冠测量耗时耗力,在实际生产中不可能对每株林木的树冠进行测量,因此构建高精度树冠轮廓模型非常有必要。

目前的树冠模型常常采用枝解析方法,通过建立一级枝条的直径、数量、角度和枝条的相对直径生长模型<sup>[7-8]</sup>以及冠长率模型<sup>[8]</sup>、冠幅模型<sup>[9-10]</sup>等多个模型共同组成树冠形态模型。这种方法虽然能够模拟树冠形状,但数据获取复杂,成本较高,应用不够简捷和不利于推广,不能满足实际需要。若仅以树冠半径为因变量,以胸径、冠长、相对冠高、冠幅对应的树高等为自变量建立树冠轮廓曲线(树冠轮廓曲线是以树冠半径为因变量,以距树干顶端的距离为自变量描述树冠二维空间的曲线方程<sup>[11-12]</sup>),可以很好地描述树冠形态同时还能极大地降低数据采集成本。例如,Gill 等<sup>[13]</sup>以时间序列模型为基础建立加利福尼亚地区 2 种阔叶树的树冠轮廓模型;Biging 等<sup>[14]</sup>以简单的几何形状(圆锥体、椭圆形体、抛物线体和伞状)模型模拟了加利福尼亚 6 种针叶树的树冠轮廓模型;随后,不规则的几何体形状也被应用到树冠模型的评价中<sup>[15]</sup>。Marshall 等<sup>[16]</sup>在分析俄勒冈州西北部铁杉 (*Tsuga heterophylla*) 树冠形态时以冠幅为基点分为冠幅上部 and 下部 2 部分进行模拟;类似分层建立树冠模型研究的有 Crecente-Campo 等<sup>[17]</sup>。Baldwin 等<sup>[18]</sup>将火炬松 (*Pinus taeda*) 的树冠分为内、外 2 层分别进行模型的预测;Crecente-Campo 等<sup>[19]</sup>分树种建立了西班牙西北部沙地海岸松 (*Pinus pinaster*) 和欧洲赤松 (*Pinus sylvestris*) 2 个树种的树冠轮廓模型;Hann<sup>[20]</sup>于

1999 年、Rautiainen 等<sup>[21]</sup>于 2005 年分别使用可变指数生长模型通过改变参数值获得不同树种树冠模型。

然而,树冠的结构是动态变化的,树冠生长受树木年龄的影响较大,只有考虑年龄的影响才能准确建立树冠形态模型。目前国内分龄组建立树冠轮廓模型的研究还未见报道。基于此,本文利用生长模型和统计分析方法分别幼龄林、中龄林和近成熟林 3 个龄组建立描述杉木树冠形态的预估模型,为进一步研究杉木树冠结构规律及动态生长模拟提供依据。

## 1 研究区概况与研究数据

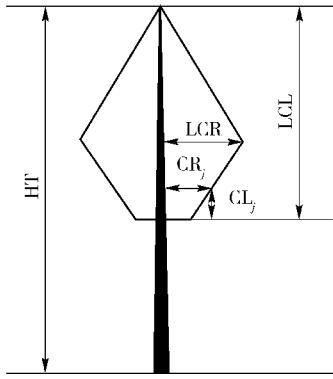
### 1.1 研究区概况

研究区选在具有“中国杉木之乡”之称的顺昌县。顺昌县位于福建省西北部,地理坐标  $26^{\circ}39' \sim 27^{\circ}12'N$ ,  $117^{\circ}30' \sim 118^{\circ}14'E$ 。属中亚热带海洋性季风气候,同时又在一定程度上受大陆性气候的影响。该区年平均气温  $18.5^{\circ}C$ ,年平均降水量 1 756 mm,降水多集中在 5—6 月,全年平均蒸发量 1 374 mm,年平均日照时数 1 740.7 h,无霜期 305 d,年平均相对湿度 80%~83%。主要土壤类型有红壤、黄红壤、黄壤。植物种类繁多,以杉木人工林为主,其面积为 4.67 万  $\text{hm}^2$ ,年产杉木 30 万  $\text{m}^3$ ,也有马尾松 (*Pinus massoniana*)、毛竹 (*phyllostachys pubescens*)、木荷 (*Schima superba*) 等树种。

### 1.2 研究数据

根据 2013 年森林档案信息,在幼龄林、中龄林、近熟林和成熟林均有林木分布的顺昌县大历林场和岚下林场共设置 98 块  $30\text{ m} \times 30\text{ m}$  的样地,样地所在的林分均未经过间伐。对各样地中胸径 5 cm 以上的乔木进行每木检尺,记录每株杉木的直径、树高、枝下高、东西和南北冠幅,并计算各样地的相应平均直径、平均高、株数密度和断面积。依据各样地平均直径和平均高选取生长没有偏冠的标准木 297 株,每株活立木分别测量 5 个不同树冠长度位置处对应的树冠半径(图 1),共计 1 485 个测量值。

模型拟合数据与检验数据相互独立,并依据 8:2 的原则进行分配<sup>[22]</sup>,其中用于模型拟合的标准木有 237 株,用于模型检验的标准木 60 株。模型拟



HT. 全树高 Height of tree; LCR. 最大树冠半径 Largest crown radius;  $CR_j$ . 任意一处树冠半径 Crown radius at each measurement point; LCL. 最大树冠长度 Largest crown length;  $CL_j$ . 任意一处树冠长度 Crown length at each measurement point;  $j=1, 2, 3, 4, 5$ , 分别表示最大树冠长度的 1/10、1/4、1/2、3/4、9/10 位置。  $j=1, 2, 3, 4, 5$ , represents 1/10, 1/4, 1/2, 3/4, 9/10 locations of LCL, respectively.

图1 单株木树冠特征变量

Fig. 1 Variables used to characterize individual tree crown

合与检验的标准木数据基本概况见表1。

## 2 研究方法

### 2.1 自变量与因变量的筛选

本文在确定模型自变量(树冠长度  $CL_j$ 、相对树冠长度  $RCL_j$ )和因变量(树冠半径  $CR_j$ 、相对树冠半

径  $RCR_j$ )时采用非线性回归筛选有效变量的方法,最终自变量和因变量分别是相对树冠长度 ( $RCL_j = CL_j/HT$ ) 和相对树冠半径 ( $RCR_j = CR_j/LCR$ )。

### 2.2 方差分析

使用单因素方差分析(年龄作为因子)分析年龄对相对树冠半径的影响。方差分析前,使用箱形图和直方图剔除数据的异常值和数据的偏态,组间的多重比较法选用 Tukey HSD(显著性水平  $P = 0.05$ )。本文方差分析选用 SPSS v18 统计软件来完成。

### 2.3 模型选取

依据国内外树冠轮廓文献的报道,存在一些函数能够很好地描述树冠半径和树冠长度之间的相互关系。本文比较了8大类函数(表2)的拟合和预测性能,除第1类外,其余7类函数均为非线性函数模型。文中模型在假设杉木生长通直且没有偏冠的前提下进行拟合。

### 2.4 模型的拟合与检验

#### 2.4.1 模型的拟合

本研究中非线性曲线参数的拟合是在 OriginLab 8.0 软件上实现的。为了科学客观评价拟合效果,依据决定系数  $R^2$ (公式(1))<sup>[27]</sup>和残差平方和 RSS(公式(2))2个指标从8大类模型中选取拟合效果较好的不同龄组树冠轮廓模型,其中  $R^2$  值

表1 杉木树冠轮廓模型拟合与检验数据的基本概况

Tab. 1 Summary of data from fitting and validating the crown profile model for Chinese fir

变量 Variables	拟合数据 Fitting data				检验数据 Testing data			
	平均值 Average values	最小值 Minimum values	最大值 Maximum values	标准差 Standard deviation	平均值 Average values	最小值 Minimum values	最大值 Maximum values	标准差 Standard deviation
胸径 Diameter at breast height (DBH)/cm	16.0	6.1	31.3	5.6	16.5	6.4	30.0	6.3
全树高 Height of tree (HT)/m	12.4	3.0	22.8	3.9	12.6	3.6	21.9	4.4
最大树冠半径 Largest crown radius (LCR)/m	3.3	1.4	5.1	0.8	3.5	1.4	5.4	0.9
任意一处树冠半径 Crown radius at each measurement point (CR)/m	2.1	0.1	5.1	1.4	2.2	0.2	5.2	1.5
最大树冠长度 Largest crown length (LCL)/m	6.1	1.1	15.3	2.4	6.0	1.6	15.0	2.1
任意一处树冠长度 Crown length at each measurement point (CL)/m	3.0	0.1	13.8	2.3	3.0	0.1	13.4	2.0
年龄 Age (t)/a	16	5	35	6.8	19	7	32	7.7
株数密度 Density of individuals (N) /hm <sup>-2</sup>	1 549	300	2 697	671.2	1 503	395	2 550	618.5
林分断面积 Basal area (G)/(m <sup>2</sup> ·hm <sup>-2</sup> )	23.7	8.6	34.9	6.5	23.6	9.3	33.4	6.0

表2 杉木树冠轮廓模型拟合方程

Tab.2 Fitting equations for the crown profile of Chinese fir

模型编号 Model number	模型类别 Model categories	模型来源 Model source
1	线性函数 (Linear function)	参考文献 [18] Reference[18]
2	指数函数 (Exponential function)	参考文献 [20-21] Reference[20-21]
3	生长函数 (Growth function)	参考文献 [23] Reference[23]
4	多项式 (Polynomial function)	参考文献 [18-19] Reference[18-19]
5	对数函数 (Logarithm function)	参考文献 [24-25] Reference[24-25]
6	双曲线 (Hyperbola function)	参考文献 [21] Reference[21]
7	幂函数 (Power function)	参考文献 [26] Reference[26]
8	峰值函数 (Peak value function)	参考文献 [26] Reference[26]

大、RSS 值小的模型拟合效果好。

#### 2.4.2 模型的基本检验

将检验数据分别代入拟合效果较好的模型,依据均方根误差 RMSE(公式(3))、变异系数 CV(公式(4))<sup>[28]</sup> 2类检验指标确定不同龄组最优树冠轮廓模型,其中 RMSE 与 CV 值小的模型的误差与变异小,说明该模型适合模拟树冠轮廓,模型适用性强。用于模型拟合与检验指标的具体表达式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (RCR_i - \hat{RCR}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (RCR_i - \overline{RCR})^2} \quad (1)$$

$$RSS = \sum_{i=1}^n (RCR_i - \hat{RCR}_i)^2 \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (RCR_i - \hat{RCR}_i)^2} \quad (3)$$

$$CV = (\overline{RMSE}/\overline{RCR}) \times 100 \quad (4)$$

式中:  $RCR_i$  为相对树冠半径实际测量值,  $\hat{RCR}_i$  为相对树冠半径理论值,  $\overline{RCR}$  为相对树冠半径的平均值,  $\overline{RCR}$  为最大树冠半径的平均值,  $n$  为所选取的样本个数。

#### 2.4.3 最优模型的假定性检验

为了证实模型假定的正确性,对选出的不同龄

组最优树冠轮廓模型进行残差分析和  $\chi^2$  检验。如果某一观测值的标准化残差小于  $-2$  或大于  $+2$ , 那么就可将它识别为异常值,  $[-2, 2]$  为标准误允许范围<sup>[29]</sup>。考虑到模型自变量对于因变量的影响很重要,因此本文绘制关于 RCL 的残差分布图证实模型假定,即将样本点  $(RCL, RCR - \hat{RCR})$  描绘在以横轴表示 RCL, 以纵轴表示  $RCR - \hat{RCR}$  的直角坐标系中。另外,利用  $\chi^2$  检验对模型进行假设检验,如果  $P(\chi^2 < \chi_{1-\alpha/2}^2) = P(\chi^2 > \chi_{1-\alpha/2}^2) > 0.05$ , 则表示模型有好的适应性,反之亦然。

## 3 结果与分析

### 3.1 方差分析

依据国家森林资源连续清查技术规定中杉木龄级和龄组的划分标准,将标准木划分为幼龄林( $\leq 10$ 年)、中龄林(11~20年)、近熟林(21~25年)和成熟林(26~35年)<sup>[30]</sup>。对各龄组间标准木的相对树冠半径作方差分析(表3),结果表明幼龄林、中龄林、近龄林和成熟林在相对树冠半径方面存在显著性差异( $F = 24.166, P < 0.001$ ),即年龄对树冠形态有显著影响。幼龄林、中龄林均与近熟林和成熟林有显著差异,而近、成熟林之间无显著差异。因此,本文分别构建杉木幼龄林、中龄林和近成熟林3个龄组的树冠轮廓模型。

表3 不同龄组杉木相对树冠半径的方差分析

Tab.3 ANOVA of relative crown radius for Chinese fir in different age groups

龄组 Age group	幼龄林 Young growth forests	中龄林 Half-mature forests	近熟林 Near-mature forests	成熟林 Mature forests	F	P
相对树冠半径 Relative crown radius	0.396 ± 0.018 <sup>a</sup>	0.515 ± 0.013 <sup>b</sup>	0.588 ± 0.021 <sup>c</sup>	0.634 ± 0.026 <sup>c</sup>	24.166	<0.001

注:表中数据为均值 ± 标准误;不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。Notes: values in Tab.3 are average values ± standard deviation; different small letters mean significant difference (Tukey HSD,  $P < 0.05$ ).

### 3.2 模型拟合、检验与最优模型选取

利用统计分析方法,从8大类模型中初步筛选

出  $R^2$  相对高、RSS 相对小,能够描述幼龄林、中龄林和近成熟林的树冠轮廓模型共20个,模型的具体参



数估计值、拟合与检验指标值见表4~6。

在幼龄林拟合结果(表4)中,Cubic模型的 $R^2$ 为0.78,RSS为2.403,拟合精度较高;检验结果中,Cubic模型的RMSE为0.1145,低于其他5个模型,CV也比其他5个模型小。因此,确定使用Cubic模型模拟杉木幼龄林树冠轮廓。

中龄林拟合结果(表5)中,Poly4模型的 $R^2$ 为

0.85,高于其他6个模型,RSS为1.631,低于其他6个模型,此模型拟合效果较好,Poly4模型的RMSE和CV均较其他模型检验效果好。Poly4模型拟合和检验性能均优于其他模型,因此,选取Poly4模型模拟杉木中龄林树冠轮廓。

近成熟林拟合结果(表6)中,GaussAmp模型的 $R^2$ 为0.76,RSS为1.514,此模型拟合效果较好。

表4 杉木幼龄林各模型参数和模型统计指标值

Tab.4 Models parameters and statistics from crown profile prediction equation for Chinese fir in young growth forest

模型名称 Model name	模型表达式 Model expression	参数 Parameters				拟合指标 Fitting indicator		检验指标 Testing indicator	
		$a$	$b$	$c/w$	$a_3/a_4$	$R^2$	RSS	RMSE	CV/%
Exp3P2	$y = \exp(a + bx + cx^2)$	-0.018 0	-0.366 8	-4.247 2		0.74	2.423	0.154 9	5.845
DoseResp	$y = a + \frac{b-a}{1+10^{(c-x)a_3}}$	-0.160 3	1.297 8	0.319 6	-1.967 1	0.74	2.413	0.155 8	5.879
Log3P1	$y = a - b \ln(x + c)$	4.527 9	4.010 9	2.368 4		0.74	2.432	0.155 2	5.857
GCAS	$f(z) = a + \frac{b}{w\sqrt{2\pi}} \left( 1 + \left  \sum_{i=3}^4 \frac{a_i}{i!} H_i(z) \right  \right) \exp(-z^2/2)$ $z = \frac{x-c}{w}$ $H_3 = z^3 - 3z$ $H_4 = z^4 - 6z^3 + 3$	1.150 8	-0.773 2	0.929 3/ 0.315 9	0.601 45/ 1.194 7	0.74	2.414	0.155 4	5.864
Cubic	$y = a + bx + cx^2 + a_3x^3$	1.022 0	-1.007 0	-1.923 5	1.994 6	0.78	2.403	0.114 5	4.321
Allometric2	$y = a + bx^c$	1.080 6	-1.464 5	0.913 1		0.74	2.436	0.155 3	5.860

注:模型 Exp3P2、DoseResp、Log3P1、GCAS、Cubic 和 Allometric2 分别属于 Exponential、Growth、Logarithm、Peak function、Polynomial 和 Power 类。 $y$  为相对树冠半径(RCR<sub>*j*</sub>), $x$  为相对冠长(RCL<sub>*j*</sub>); $a$ 、 $a_3$ 、 $a_4$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $w$  为参数。Notes: model Exp3P2, DoseResp, Log3P1, GCAS, Cubic and Allometric2 belong to Exponential, Growth, Logarithm, Peak function, Polynomial and Power, respectively.  $y$  is relative crown radius(RCR<sub>*j*</sub>),  $x$  is relative crown length(RCL<sub>*j*</sub>);  $a$ ,  $a_3$ ,  $a_4$ ,  $b$ ,  $c$  and  $w$  are parameters.

表5 杉木中龄林各模型参数和模型的统计指标值

Tab.5 Model parameters and statistics from crown profile prediction equation for Chinese fir in half-mature forest

模型名称 Model name	模型表达式 Model expression	参数 Parameters				拟合指标 Fitting indicator		检验指标 Testing indicator	
		$a$	$b$	$c/w$	$a_3$	$R^2$	RSS	RMSE	CV/%
Exp3P2	$y = \exp(a + bx + cx^2)$	-0.076 1	0.715 5	-9.452 0		0.80	1.709	0.130 7	3.661
Slogistic1	$y = \frac{a}{1 + \exp(-b(x - c))}$	1.001 5	-10.517	0.300 3		0.81	1.676	0.129 5	3.627
HyperbolaGen	$y = a - \frac{b}{(1 + cx)^{1/a_3}}$	1.063 9	0.005 9	168.867 8	-0.867	0.80	1.717	0.131 0	3.669
Log3P1	$y = a - b \ln(x + c)$	84.123 9	30.812 2	14.791 0		0.80	1.732	0.131 6	3.686
Lorentz	$y = a + \frac{2b}{\pi} \cdot \frac{a_3}{4(x-c)^2 + a_3}$	1.292 1	-1.099 8	0.513 6	0.584 1	0.81	1.644	0.128 2	3.591
Poly4	$y = a + bx + cx^2 + a_3x^3 + wx^4$	1.171 2	-4.576 5	23.605 0/ 71.682 4	-73.439 9	0.85	1.631	0.097 8	2.740
Allometric2	$y = a + bx^c$	1.054 9	-2.187 6	1.150 01		0.80	1.717	0.131 0	3.669

注:模型 Slogistic1、HyperbolaGen、Lorentz 和 Poly4 分别属于 Growth、Hyperbola、Peak function 和 Polynomial 类; $y$  为相对树冠半径(RCR<sub>*j*</sub>); $x$  为相对冠长(RCL<sub>*j*</sub>)。  $a$ 、 $a_3$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $w$  为参数。Notes: model Slogistic1, HyperbolaGen, Lorentz and Poly4 belong to Growth, Hyperbola, Peak function and Polynomial, respectively.  $y$  is relative crown radius(RCR<sub>*j*</sub>),  $x$  is relative crown length(RCL<sub>*j*</sub>);  $a$ ,  $a_3$ ,  $b$ ,  $c$  and  $w$  are parameters.

表6 杉木近成熟林各模型参数和模型的统计指标值

Tab.6 Models parameters and statistics from crown profile prediction equation for Chinese fir in near-mature and mature forests

模型名称 Model name	模型表达式 Model expression	参数 Parameters			拟合指标 Fitting indicator		检验指标 Testing indicator	
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c/a<sub>3</sub></i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	RSS	RMSE	CV/ %
Exponential	$y = a + b \exp(cx)$	1.656 1	-0.623 1	2.333 3	0.70	1.545	0.163 3	4.022
Stirling	$y = a + b \left( \frac{\exp(cx) - 1}{c} \right)$	1.033 0	-1.453 9	2.333 3	0.70	1.545	0.163 3	4.022
Slogistic1	$y = \frac{a}{1 + \exp(-b(x - c))}$	0.920 1	-15.786 4	0.274 1	0.71	1.520	0.161 9	3.988
Log2P2	$y = \ln(a + bx)$	2.811 7	-4.358 2		0.71	1.559	0.163 9	4.037
GaussAmp	$y = a + b \exp\left(\frac{(x - c)^2}{2a_3}\right)$	0.943 0	-0.897 6	0.450 9/ 0.157 3	0.76	1.514	0.141 5	3.485
Parabola	$y = a + bx + cx^2$	1.006 9	-1.056 2	-3.220 5	0.71	1.544	0.163 1	4.017
Allometric2	$y = a + bx^c$	0.975 1	-3.757 7	1.555 7	0.70	1.542	0.163 1	4.017

注:模型 Exponential、Stirling、Log2P2、GaussAmp 和 Parabola 分别属于 Exponential、Exponential、Logarithm、Peak function 和 Polynomial 类; *y* 为相对树冠半径(RCR<sub>*j*</sub>), *x* 为相对冠长(RCL<sub>*j*</sub>); *a*、*a*<sub>3</sub>、*b*、*c* 分别为参数。Notes: model Exponential, Stirling, Log2P2, GaussAmp and Parabola belong to Exponential, Exponential, Logarithm, Peak function and Polynomial, respectively; *y* is relative crown radius (RCR<sub>*j*</sub>), *x* is relative crown length (RCL<sub>*j*</sub>); *a*, *a*<sub>3</sub>, *b* and *c* are parameters.

GaussAmp 模型的 RMSE 值 (RMSE = 0.1415) 比其他 6 个模型小, CV 值 (CV = 3.485%) 也优于其他模型。因此, 选择 GaussAmp 模型模拟杉木近成熟林树冠轮廓。

### 3.3 最优模型的假定性检验

#### 3.3.1 残差检验

杉木生长各时期最优模型的残差结果见图 2, 各时期最优模型均达到统计检验规定, 表明各时期最优模型假定均成立, 且分布在横轴上下两侧残差均匀, 表明参数估计无偏, 均可以作为各时期的预估模型。杉木生长各时期, 残差全部分布于 ±0.4 之间, 较统计规定范围小, 因此本文得出各时期最优模型能够充分代表杉木不同龄组的树冠轮廓。

#### 3.3.2 $\chi^2$ 检验

杉木幼龄林、中龄林和近成熟林 3 个时期的树

冠轮廓最优模型分别是 Cubic、Poly4 和 GaussAmp。对 3 个最优模型的理论值和实际测量值进行  $\chi^2$  检验, 均满足  $\chi^2 < \chi^2_{0.05}$  ( $P = 0.31 \sim 0.57 > 0.05$ ), 说明 3 个模型分别能够很好地拟合和预测杉木 3 个时期的树冠轮廓。以相对树冠长度为横坐标, 根据相对树冠半径的实际值与各时期最优模型的理论值分别绘制杉木幼龄林、中龄林和近成熟林 3 个时期的树冠轮廓图 (图 3)。幼龄林时期, 树冠轮廓整体笔直近似圆锥形, 而且是杉木生长整个时期中冠长最长的时期 ( $0 < RCL < 0.8$ ); 中龄林时期, 树冠中下部较突出, 整体形状较饱满近似抛物体形; 近成熟林时期, 下部突出明显, 近似圆台形或近似于伞形, 在整个杉木生长过程中此阶段冠长最短 ( $0 < RCL < 0.5$ )。因此, 本文选取的树冠轮廓模型不仅符合统计检验, 而且可以从生物学意义上给予合理解释。

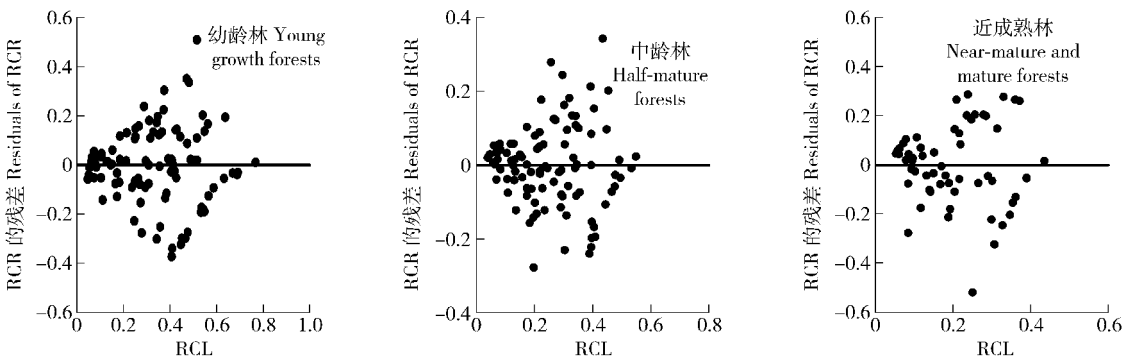


图2 杉木 3 个不同龄组树冠轮廓最优模型的残差

Fig.2 RCR residuals plotted against predicted values for the optimal crown profile model of Chinese fir in three age groups

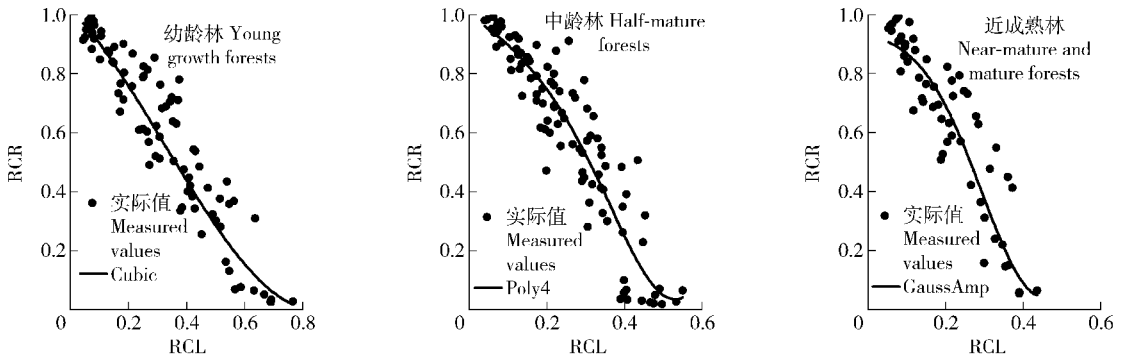


图3 杉木3个不同龄组树冠轮廓的理论值和实际值

Fig.3 Theoretical and actual values of crown profile for Chinese fir in three age groups

## 4 结论与讨论

本研究中构建的杉木树冠形态模型并不是简单、笼统地将所有年龄标准木的树冠数据叠加到一起构建统一的模型。经过方差分析发现,杉木树冠外形在不同年龄时树冠轮廓也不尽相同,林木年龄对树冠外形具有很大的影响,但由于近熟林和成熟林时期,杉木树高均生长缓慢,轮廓无显著差异,因此本文将杉木分成幼龄林、中龄林和近成熟林3个龄组来详细分析杉木的树冠形态。本文采用8大类模型模拟杉木树冠轮廓取得了较好的效果,拟合的决定系数较高,尤其是中龄林时期数据量较其他年龄多,效果更好,今后若想取得更好的拟合效果应再加大幼龄林和近成熟林的数据采集量。

本文构建的幼龄林、中龄林和近成熟林时期杉木树冠轮廓的最优模型分别是 Cubic、Poly4 和 GaussAmp。林木年龄的不同、生长和竞争是导致树冠形状改变的主要原因<sup>[18]</sup>。Cubic、Poly4 属三次和四次多项式模型。本文的结果与 Baldwin 等<sup>[18]</sup>模拟美国路易斯安那州火炬松树冠轮廓的结果相一致,他们将树冠分为内层和外层分别进行模拟,得出多项式模型可以很好地模拟火炬松外层轮廓的结论。同样 Pretzsch 等<sup>[25]</sup>使用不同的几何体模拟德国3个树种的树冠形状,结果发现圆锥体能够很好地模拟挪威云杉(*Picea abies*)的树冠,三次抛物线体能够很好地模拟欧洲山毛榉(*Fagus sylvatica*)的树冠,二次抛物线体适合描述欧洲银冷杉(*Abies alba*)的树冠形状。这一结论表明采用多项式模型模拟树冠轮廓的方法是可行的,结果也是可靠的。

幼龄时期,依据 Cubic 模型所绘图形显示该时期树冠形状近似圆锥形,其原因是此时期树高生长较快,侧枝生长不够发达,因此本研究选取最优模型符合杉木生长的生物学原理。关于树冠呈圆锥的形状,先前的研究也有报道,如 Rautiainen 等<sup>[21]</sup>证明

了欧洲赤松的树冠形状与圆锥体相似是合理的,后来 Rautiainen 等<sup>[31]</sup>使用同样的模型来代替椭圆体模拟树冠形状,并未发现圆锥体模拟树冠的优势。然而,在关于模拟辐射松(*Pinus radiata*)树冠的研究中,利用椭圆体模拟树冠形状时,呈现出高估树冠半径的趋势,而利用圆锥体模拟时,呈现出低估的趋势<sup>[32]</sup>。杉木在中龄林时期,由于林木竞争较大,生长稍缓,侧枝相比幼龄时期发达,形状近似抛物体形,生物学解释与构建的 Poly4 模型一致。对于树高生长缓慢而侧枝生长发达,甚至多数超过主梢的近熟林和成熟林杉木而言,突出的下部树冠以及较短的冠长形似圆台或者伞形,GaussAmp 模型诠释了该时期杉木的树冠轮廓。

本文提出的数据调查方法和选取各龄组最优模型的形式均不复杂,便于今后推广应用。树冠形态模型的数学模拟在森林经营管理中有很大的应用潜力,利用树冠轮廓模型可以精确预估不同年龄树冠形态、树冠体积和表面积、树冠生物量和碳储量以及叶面积指数。同时,对于今后确定造林初值密度、抚育间伐时间与次数、如何使收获量最大等提供了一定的理论基础。

## 参 考 文 献

- [1] ZHAO M, XIANG W, PENG C, et al. Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model [J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(6): 1520-1531.
- [2] MA X, HEAL K V, LIU A, et al. Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in southern China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243(1): 61-74.
- [3] BIGING G S, DOBBERTIN M. Evaluation of competition indices in individual tree growth models [J]. *Forest Science*, 1995, 41(2): 360-377.
- [4] MONSERUD R A, STERBA H. A basal area increment model for individual trees growing in even- and uneven-aged forest stands in Austria [J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, 80(1): 57-

- 80.
- [ 5 ] CARVALHO J P, PARRESOL B R. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.) [J]. Forest Ecology and Management, 2003, 179(1): 269-276.
- [ 6 ] PUKKALA T, BECKER P, KUULUVAINEN T, et al. Predicting spatial distribution of direct radiation below forest canopies [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1991, 55(3): 295-307.
- [ 7 ] WEISKITTEL A R, SEYMOUR R S, HOFMEYER P V, et al. Modelling primary branch frequency and size for five conifer species in Maine, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259(10): 1912-1921.
- [ 8 ] MÄKINEN H, OJANSUU R, SAIRANEN P, et al. Predicting branch characteristics of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) from simple stand and tree measurements [J]. Forestry, 2003, 76(5): 525-546.
- [ 9 ] 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.
- [ 10 ] FU L, SUN H, SHARMA R, et al. Nonlinear mixed-effects crown width models for individual trees of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) in south-central China [J]. Forest Ecology and Management, 2013, 302: 210-220.
- [ 11 ] MITCHELL K J. Dynamics and simulated yield of Douglas-fir [J]. Forest Science, 1975, 21(Suppl. 17): a0001-z0001.
- [ 12 ] OTTORINI J M. Growth and development of individual Douglas-fir in stands for applications to simulation in silviculture [J]. Annals of Forest Science, 1991, 48(6): 651-666.
- [ 13 ] GILL S J, BIGING G S. Autoregressive moving average models of crown profiles for two California hardwood species [J]. Ecological Modeling, 2002, 152(2-3): 213-226.
- [ 14 ] BIGING G S, WENSEL L C. Estimation of crown form for six conifer species of northern California [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1990, 20(8): 1137-1142.
- [ 15 ] ZEIDE B, PFEIFER P. A method for estimation of fractal dimension of tree crowns [J]. Forest Science, 1991, 37(5): 1253-1265.
- [ 16 ] MARSHALL D D, JOHNSON G P, HANN D W. Crown profile equations for stand-grown western hemlock trees in northwestern Oregon [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(11): 2059-2066.
- [ 17 ] CRECENTE-CAMPO F, MARSHALL P, LEMAY V, et al. A crown profile model for *Pinus radiata* D. Don in northwestern Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2009, 257(12): 2370-2379.
- [ 18 ] BALDWIN V C, Jr., PETERSON K D. Predicting the crown shape of loblolly pine trees [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1997, 27(1): 102-107.
- [ 19 ] CRECENTE-CAMPO F, ÁLVAREZ-GONZÁLEZ J G, CASTEDO-DORADO F, et al. Development of crown profile models for *Pinus pinaster* Ait. and *Pinus sylvestris* L. in northwestern Spain [J]. Forestry, 2013, 86(4): 481-491.
- [ 20 ] HANN D W. An adjustable predictor of crown profile for stand-grown Douglas-fir trees [J]. Forest Science, 1999, 45(2): 217-225.
- [ 21 ] RAUTIAINEN M, STENBERG P. Simplified tree crown model using standard forest mensuration data for Scots pine [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 128(1): 123-129.
- [ 22 ] LIU Y, KANG X, GUO Y, et al. A nonlinear-matrix model for the prediction of mixed uneven-aged forests growth with Fortran program in Changbai Mountain, China [J]. International Journal of Advancements in Computing Technology, 2012, 4(22): 163-172.
- [ 23 ] DAVIES O, POMMERENING A. The contribution of structural indices to the modelling of Sitka spruce (*Picea sitchensis*) and birch (*Betula* spp.) crowns [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(1): 68-77.
- [ 24 ] CONDÉS S, STERBA H. Derivation of compatible crown width equations for some important tree species of Spain [J]. Forest Ecology and Management, 2005, 217(2): 203-218.
- [ 25 ] PRETZSCH H, BIBER P, ĎURSÝ J. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 162(1): 3-21.
- [ 26 ] Originlab Corporation. Origin 8 user guide [M]. Northampton: Originlab Corporation, 2007.
- [ 27 ] KVÅLSETH T O. Cautionary note about  $R^2$  [J]. The American Statistician, 1985, 39(4): 279-285.
- [ 28 ] BECHTOLD W A. Largest-crown-width prediction models for 53 species in the western United States [J]. Western Journal of Applied Forestry, 2004, 19(4): 245-251.
- [ 29 ] 冯力. 回归分析方法、原理及 SPSS 实际操作 [M]. 北京: 中国金融出版社, 2004.
- FENG L. Theory of regression analysis and SPSS actual operation [M]. Beijing: China Finance Press, 2004.
- [ 30 ] 国家林业局. 国家森林资源连续清查技术规定 [R]. 北京: 国家林业局, 2004.
- State Forestry Administration. NFI technical regulations [R]. Beijing: State Forestry Administration, 2004.
- [ 31 ] RAUTIAINEN M, MÖTTUS M, STENBERG P, et al. Crown envelope shape measurements and models [J]. Silva Fennica, 2008, 42(1): 19-33.
- [ 32 ] CRECENTE-CAMPO F. Modelo de crecimiento de árbol individual para *Pinus radiata* D. Don en Galicia [D]. Lugo: University of Santiago de Compostela, 2008.

(责任编辑 冯秀兰  
责任编辑 张会儒)