

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150339

兴安落叶松枝条特征联立方程组模型及树冠形状模拟

姜立春¹ 潘莹¹ 李耀翔²

(1 东北林业大学林学院 2 东北林业大学工程技术学院)

摘要:以大兴安岭松岭林业局 36 株天然兴安落叶松 2 306 个枝条数据为研究对象,采用误差变量联立方程组方法,构建兴安落叶松枝条基径、枝长和角度联立方程组模型系统,同时对比了 4 种参数估计方法。结果表明,似乎不相关回归过程 SUR(Seemingly Unrelated Regression)法能够解释模型间误差相关性和降低参数估计值的标准误。该系统拟合和检验精度都表现较好,本文所建立的枝条特征联立方程组模型系统能较好地描述兴安落叶松枝条特征和冠形的变化规律。此外,利用非线性混合模型技术构建了含有林分密度变量的枝条基径、枝长和角度联立方程组模型系统。基于参数估计值的显著性以及精度的提高都表明林分密度对枝条基径、长度、角度和树冠形状变化有显著影响。

关键词:枝条特征;树冠形状;联立方程组;兴安落叶松

中图分类号:S758.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2016)06-0001-07

JIANG Li-chun¹; PAN Ying¹; LI Yao-xiang². **Model systems of branch characteristics and crown profile simulation for *Larix gmelinii*.** *Journal of Beijing Forestry University* (2016)38(6) 1-7 [Ch, 26 ref.] College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang, 150040, P. R. China.

The objectives of this study were to develop the equation systems of branch diameter, branch length and branch angle for natural Dahurian larch (*Larix gmelinii*) using the error-in-variable simultaneous equation approach, and to compare four parameter estimation approaches. The data were collected from 2 306 branch samples of 36 trees in Songling Forest Bureau in Daxing'anling. The results showed that the Seemingly Unrelated Regression (SUR) approach could explain the correlation of error terms across the equations and decrease standard error of parameter estimation. Equation systems of branch characteristics established in our study show better precision and can better describe variation of branch characteristics and crown profile. In addition, our study also developed equation systems of branch diameter, branch length and branch angle with stand density variables using nonlinear mixed-effects modeling techniques. Stand density has a significant impact on branch diameter, branch length, branch angle and crown profile based on significant parameter estimates and better precision.

Key words branch characteristics; crown profile; equation systems; *Larix gmelinii*

树冠是树木进行光合作用、呼吸作用、蒸腾作用等生理活动的主要场所。树冠形状大小影响生物的多样性^[1]、林火敏感性^[2]、机械稳定性^[3]、局部区域小气候^[4]、树干横断面面积增量分布^[5]以及木材的质量^[6]。

树冠形状模拟是许多生物过程模型的重要组成

部分。国内外专家提出了许多不同形式的树冠形状模型,大致可划分为直接方法和间接方法 2 种。直接方法是把树冠设想为不同的几何形状,利用多元回归构建树冠形状预测模型^[7-9]。间接方法是先预测枝条基径、枝长和着枝角度等变量,然后利用三角关系计算树冠半径^[10-15]。无论是使用直接方法,还

收稿日期:2015-09-13 修回日期:2015-12-15

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD22B0202)、国家自然科学基金项目(31170591、31570624)。

第一作者:姜立春,教授,博士生导师。主要研究方向:森林经理。Email:jlichun@nefu.edu.cn 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学林学院。

责任作者:李耀翔,教授,博士生导师。主要研究方向:森林经理。Email:yaoxiangli@nefu.edu.cn 地址:150040 黑龙江省哈尔滨市和兴路 26 号东北林业大学工程技术学院。

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

是间接方法,以上所提到的树冠形状模型都属于静态模型,模型中未能考虑林分变量(林分密度)。这些因子对冠形变化影响较大。目前,对树冠动态预测模型研究尚少。

由于树冠内枝条特征变量之间存在着一定的相关性,在研究过程中应当考虑这些变量之间的相互关系构建联立方程组模型。据国外文献报道,已有学者对枝条变量之间的相关性开展过研究,指出枝条基径与枝条长度和角度皆有相关性^[16-17]。国内大多数学者只建立了枝条变量的单独模型,却鲜有学者对枝条特征的联立方程组模型进行研究。本文以黑龙江省大兴安岭松岭林业局天然兴安落叶松(*Larix gmelinii*)为研究对象,采用度量误差模型方法构建枝条基径、长度以及角度模型系统,在此基础上利用混合模型技术还构建了含有林分变量的枝条特征联立方程组模型系统,并利用枝条长度和角度的三角关系实现树冠形状模拟。

表1 兴安落叶松样木和枝条特征因子统计

Tab.1 Statistics of sampling tree and branch attributes of *Larix gmelinii*

因子 Attribute	建模数据 Fitting data				检验数据 Validation data			
	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 Std	平均值 Mean	最小值 Min.	最大值 Max.	标准差 SD
样木数 Sample tree	<i>n</i> = 27				<i>n</i> = 9			
胸径 DBH/cm	13.55	5.60	21.50	5.47	15.14	6.10	21.30	4.95
树高 THT/m	13.11	5.90	17.60	3.08	14.45	6.00	17.20	2.78
枝条总数 Total branch	<i>n</i> = 1 776				<i>n</i> = 530			
总着枝深度 Depth into crown/m	2.45	0.01	9.33	1.92	2.20	0.01	9.19	1.74
方位角 Azimuth angle/(°)	171.88	0.00	355.00	103.27	173.48	5.00	355.00	102.18
着枝角度 Branch angle/(°)	65.86	10.00	140.00	19.72	74.85	10.00	89.00	12.01
基径 Branch diameter/cm	1.14	0.10	5.19	0.80	1.11	0.18	3.84	0.73
枝长 Branch length/cm	108.93	3.00	361.00	71.93	114.32	8.00	353.00	75.05
弦长 Branch chord length/cm	102.66	3.00	352.00	67.97	109.03	7.90	332.00	71.86

1.2 方法

1.2.1 度量误差模型

通常的回归模型是假定因变量观测值含有误差,而自变量观测值不含有误差。当自变量观测值含有误差时,这类模型通常称为度量误差模型^[18]。非线性度量误差模型的一般表达式为:

$$\begin{cases} f(\mathbf{y}_i, \mathbf{x}_i, b) = 0 \\ \mathbf{Y}_i = \mathbf{y}_i + \mathbf{e}_i \quad i = 1, 2, \dots, m \\ E(\mathbf{e}_i) = 0, \quad \text{var}(\mathbf{e}_i) = \sigma^2 \mathbf{R} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_i 是 $(1 \times q)$ 维无误差变量, \mathbf{y}_i 是 $(1 \times p)$ 维含误差变量, b 是模型参数, \mathbf{Y}_i 是观测值 \mathbf{y}_i 的真值, \mathbf{e}_i 指模型误差, σ^2 指模型的残差方差值, \mathbf{R} 是误差结

1 数据与方法

1.1 数据

于2013年在黑龙江省大兴安岭松岭林业局选择不同密度的天然兴安落叶松林分,设置固定标准地12块。在每块标准地选取无病虫害、冠形良好的优势木、平均木、被压木各1株,树木被伐倒后,测量树高、第一活枝高、树冠高度和冠幅。将解析木的树干按1m区分段进行区分,并在每个区分段的中央位置锯取树干解析圆盘。树冠部分也按1m区分段进行区分,在每个树冠区分段内分别对轮枝逐枝进行编号,对每轮枝内的全部枝条进行枝条因子的测定,包括总着枝深度、着枝角度、基径、枝长和弦长、弓高等。36株样木总共测量了2306个活枝条,其中作为拟合数据(27株样木)的枝条有1776个,检验数据(9株样木)的枝条530个。兴安落叶松天然林各样木测树因子的统计量见表1。

构矩阵。

1.2.2 参数估计方法

本研究要构建枝条基径、长度和角度3个方程。初步研究表明基径变量在枝条基径方程中为因变量,而在枝条长度和角度方程中为自变量,根据定义这类模型称为度量误差模型。目前,获得非线性度量误差模型参数估计的方法有4种。方法1:单独估计,即用最小二乘法单独拟合每一个方程;方法2:将因变量观测值不含有误差的模型代入其他模型,即将枝条基径方程代入枝条长度和角度方程,然后用最小二乘法拟合枝条长度和角度方程得到参数估计;方法3:用最小二乘法拟合因变量观测值不含有误差的模型,即拟合枝条基径方程得到参数估计,

然后将该枝条基径方程(含参数估计值)代入枝条长度和角度方程,继续使用最小二乘法得到这2个方程的参数估计;方法4:采用似乎不相关回归过程(Seemingly Unrelated Regression, SUR)同时拟合联立方程组模型得到参数估计^[19]。

1.2.3 林分因子引入模型方法

采用混合模型技术,利用SAS软件的NLMIXED模块确定已构建枝条特征模型的随机参数,通过绘制散点图分析随机参数与林分变量的相关趋势。将林分因子替换成具有相关趋势的随机参数。如果在替换随机参数过程中,含有林分变量的参数估计值是显著的,则保留替换,否则就取消替换。

1.2.4 模型评价和检验指标

拟合结果采用均方根误差(RMSE)和调整确定系数(R_a^2)进行评价;检验结果通过平均误差(MAB)、相对均方根误差(RRMSE)和平均相对误差绝对值(MAE)来对比不同模型。其数学表达式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p - 1}}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$R_a^2 = 1 - (1 - R^2) \left(\frac{n-1}{n-p} \right)$$

$$MAB = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n}$$

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n-1)}{\sum_{i=1}^n y_i / n}}}{1} \times 100\%$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \times 100$$

式中: y_i 为实测值; \hat{y}_i 为模型预估值; n 为样本数; p 为参数个数。

2 结果与分析

2.1 基础模型构建

通过绘制散点图分析枝条基径、长度和角度与胸径、树高、冠长、总着枝深度(dinc)等林木变量的关系,研究发现枝条特征变量与枝条的总着枝深度有密切关系,并随着总着枝深度的增加而增加,到达最大值之后有所下降。此外,枝条特征变量之间也表现出了一定的相关性。基于这些变量采用逐步回归技术建立如下枝条特征变量的联立方程组模型:

$$\begin{cases} BD = a_0x + a_1x^2 + a_2dx^2 \\ BL = b_0x^{b_1}e^{b_2x}BD^{b_3} \\ BA = c_0 + c_1BD + c_2cl \end{cases} \quad (2)$$

式中:BD为枝条基径(cm);BL为枝条长度(m);BA为枝条角度($^\circ$); x 为总着枝深度(m); d 为胸径(cm); cl 为树冠长度(m); $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, b_3, c_0, c_1, c_2$ 为模型预估参数。

2.2 模型参数估计

根据参数估计的4种方法,利用SAS软件对模型(2)分别进行拟合,得到参数估计结果(表2)。由表2可以看出:方法1未引入含有误差的变量,即枝条长度和角度模型采用基径观测值,不符合实际应用;方法2是将枝条基径模型分别代入枝条长度和枝条角度模型进行拟合,因此得到2组基径模型的参数估计值(a_0, a_1, a_2)。结果显示2组枝条基径模型参数 a_0, a_1, a_2 估计值不同且相差较大,不具有-致性;方法3虽然得到的估计值与方法4较为相近,但标准误明显大于方法4。综上所述,似乎不相关回归过程方法更适合用来拟合含有误差变量的模型。

表2 模型(2)的不同方法参数估计值和标准误

Tab.2 Parameter estimates and standard error for different methods of Model (2)

参数 Parameter	方法1 Method 1		方法2 Method 2				方法3 Method 3		方法4 Method 4	
	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.
a_0	6.435 8	0.091 1	4.419 5	0.392 8	-2.289 1	2.582 0	6.435 8	0.091 1	6.361 9	0.089 0
a_1	-1.065 5	0.041 8	-1.241 2	0.000 0	-1.022 1	0.000 0	-1.065 5	0.041 8	-1.025 8	0.040 4
a_2	0.035 5	0.001 7	0.053 6	0.004 2	0.035 6	0.007 4	0.035 5	0.001 7	0.034 2	0.001 6
b_0	21.550 3	0.553 1	47.701 3	3.485 1			25.019 0	1.848 6	24.678 9	1.299 5
b_1	0.365 6	0.020 5	0.740 9	0.048 8			0.408 0	0.046 7	0.482 8	0.033 6
b_2	-0.029 5	0.005 3	-0.057 0	0.011 9			-0.022 0	0.008 5	-0.038 3	0.006 0
b_3	0.588 0	0.012 5	0.196 9	0.038 5			0.500 0	0.041 0	0.494 3	0.029 3
c_0	72.338 7	1.448 8			71.544 0	1.752 3	71.886 3	1.420 9	72.009 2	1.406 2
c_1	0.169 3	0.066 0			-0.522 7	0.257 2	0.619 2	0.069 5	0.547 2	0.069 0
c_2	-1.420 1	0.264 4			-1.823 9	0.285 4	-2.185 8	0.258 2	-2.025 5	0.252 5

2.3 含有林分变量的枝条特征模型系统构建

模型(2)不含有林分变量,因此不能反映枝条特征随林分条件的变化,为了描述林分变量对枝条特征的影响,应将林分变量引入到模型(2)中。采用混合模型技术研究随机参数与林分变量之间的关

系。研究发现随机参数 a_0 、 b_1 、 c_0 的值与每公顷株数 (N) 之间有一定的相关性(图1)。由图1可以看出:随机参数 a_0 、 b_1 随着每公顷株数的增加而减少,呈负相关;随机参数 c_0 随着每公顷株数的增加而增大,呈正相关。

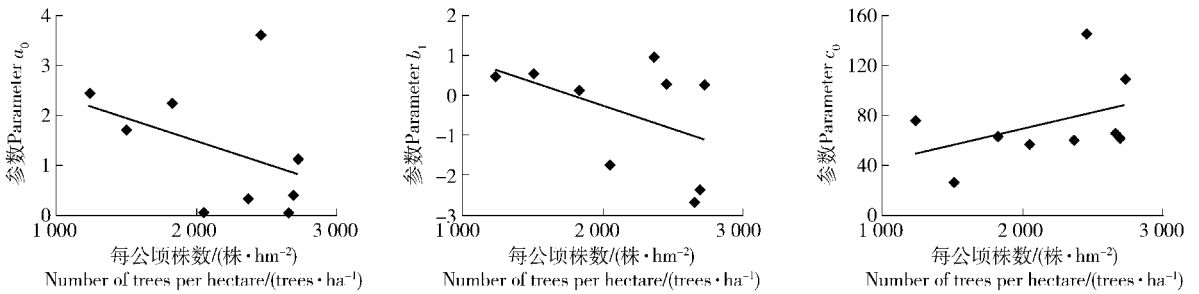


图1 随机参数随每公顷株数的变化

Fig. 1 Changes of random parameters with the number of trees per hectare

基于随机参数随林分密度变量的变化规律(图1),将每公顷株数(N)分别引入到模型(2)中。如果在替换随机参数过程中,含有林分变量的参数估计值是显著的,则保留替换,否则就取消替换。含有林分变量(每公顷株数)模型的具体形式为:

$$\begin{cases} \text{BD} = a_0x + a_1x^2 + a_2dx^2 + a_3N \\ \text{BL} = b_0x^{(b_1+b_4N)} e^{b_2x} \text{BD}^{b_3} \\ \text{BA} = c_0 + c_1\text{BD} + c_2cl + c_3N \end{cases} \quad (3)$$

式中: N 为每公顷株数(株/hm²), a_3 、 b_4 、 c_3 为模型参数。

与模型(2)的参数估计方法相同,模型(3)的参数估计值和统计显著性结果见表3。可以看出,表3与表2的分析结果基本一致,即含有误差变量的模型更适合用似乎不相关回归过程方法得到参数估计。由于所有的参数估计值都是显著的($P < 0.05$),这就说明林分密度变量影响枝条基径、枝长和角度的变化。

表3 模型(3)的不同方法参数估计值和标准误

Tab. 3 Parameter estimates and standard error for different methods of Model (3)

参数 Parameter	方法1 Method 1		方法2 Method 2				方法3 Method 3		方法4 Method 4	
	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.	估计值 Estimate	标准误 Std. Err.
a_0	5.723 1*	0.144 6	3.824 3*	0.601 1	-2.611 8*	1.549 2	5.723 135*	0.144 6	5.640 1*	0.144 6
a_1	-0.951 4*	0.045 2	-1.241 2*	0.000 0	-0.925 2*	0.488 5	-0.951 4*	0.045 2	-0.900 2*	0.045 0
a_2	0.033 9*	0.001 7	0.067 3*	0.008 8	0.031 6*	0.018 6	0.033 9*	0.001 7	0.032 0*	0.001 7
a_3	0.000 5*	0.000 1	0.000 5*	0.000 6	0.021 2*	0.000 0	0.000 5*	0.000 1	0.000 5*	0.000 1
b_0	21.767 9*	0.561 9	47.137 6*	4.321 2			22.467 6*	1.752 6	24.067 7*	1.460 0
b_1	0.342 4*	0.022 5	0.687 5*	0.072 2			0.364 4*	0.043 7	0.413 1*	0.032 9
b_2	-0.029 7*	0.005 3	-0.082 0*	0.015 1			-0.042 4*	0.008 2	-0.034 1*	0.006 0
b_3	0.582 7*	0.012 6	0.201 7*	0.041 4			0.545 3*	0.042 1	0.512 0*	0.033 0
b_4	0.000 01*	0.000 005	0.000 05*	0.000 009			0.000 04*	0.000 007	0.000 017*	0.000 0
c_0	97.732 6*	2.485 4			97.028 7	2.615 3	97.733 3*	2.426 3	96.515 3*	2.376 7
c_1	0.221 1*	0.063 5			-0.522 4	0.040 8	0.680 6*	0.069 7	0.648 6*	0.070 6
c_2	-1.804 4*	0.255 7			-2.167 1	0.274 7	-2.546 9*	0.249 6	-2.334 8*	0.244 0
c_3	-0.011 0*	0.000 9			0.000 1	0.000 0	-0.011 4*	0.000 9	-0.011 2*	0.000 9

注:*表示参数估计是显著的($P < 0.05$)。Note:* means that the parameter estimate is significant ($P < 0.05$).

2.4 模型评价与检验

基于表2和表3的参数估计值,采用SAS软件

计算拟合数据的均方根误差(RMSE)和调整确定系数 R_a^2 ,计算检验数据的平均误差(MAB)、相对均方

根误差(RRMSE)和平均相对误差绝对值(MAE)的统计量(表4)。由表4可以看出:无论是拟合数据还是检验数据,模型(3)中枝条基径、长度和角度的

统计量都优于模型(2)的相应统计量。模型(2)和模型(3)对于拟合数据的残差分布图没有显示太大的变化(未给出)。

表4 模型(2)和模型(3)拟合及检验统计量

Tab.4 Goodness-of-fit and validation statistics of Models (2) and (3)

模型 Model	变量 Variables	拟合统计量 Fitting statistics		检验统计量 Validated statistics		
		RMSE	R_a^2	MAB	RRMSE	MAE
模型(2) Model(2)	BD	3.728 8	0.784 4	3.174 4	0.369 1	0.361 3
	BL	29.873 3	0.828 3	33.654 0	0.426 3	3.430 8
	BA	19.212 5	0.054 4	12.600 9	0.198 3	1.990 5
模型(3) Model(3)	BD	3.689 7	0.789 0	3.037 7	0.358 5	0.329 2
	BL	29.499 5	0.832 8	33.142 1	0.424 3	3.287 7
	BA	18.394 0	0.134 4	10.314 2	0.177 3	1.655 4

2.5 枝条特征及冠形曲线模拟

2.5.1 基于模型(2)的枝条特征及冠形模拟

为了更直观地分析落叶松枝条特征及树冠形状的变化,利用模型(2)对枝条基径、枝长、角度进行模拟。树冠形状采用模型(4)进行模拟^[11]。

$$CR = BL[\pi \cdot \sin(BA/180)] \quad (4)$$

式中:CR为树冠半径。

图2给出了利用表2的参数估计值对不同胸径

树木的枝条特征及树冠形状进行的模拟。由图2可以看出:对于同一径阶的林木,枝条基径、长度、角度以及树冠半径都会随着着枝深度的不断增加而增大,但达到一定程度后会有收敛。而对于不同径阶的林木,单木胸径越大,伴随着着枝深度的增加,其枝条基径、长度以及树冠半径会越大,但枝条角度会越小。林木胸径很好地反映了不同大小树木的枝条基径、枝长、角度和冠形的变化。

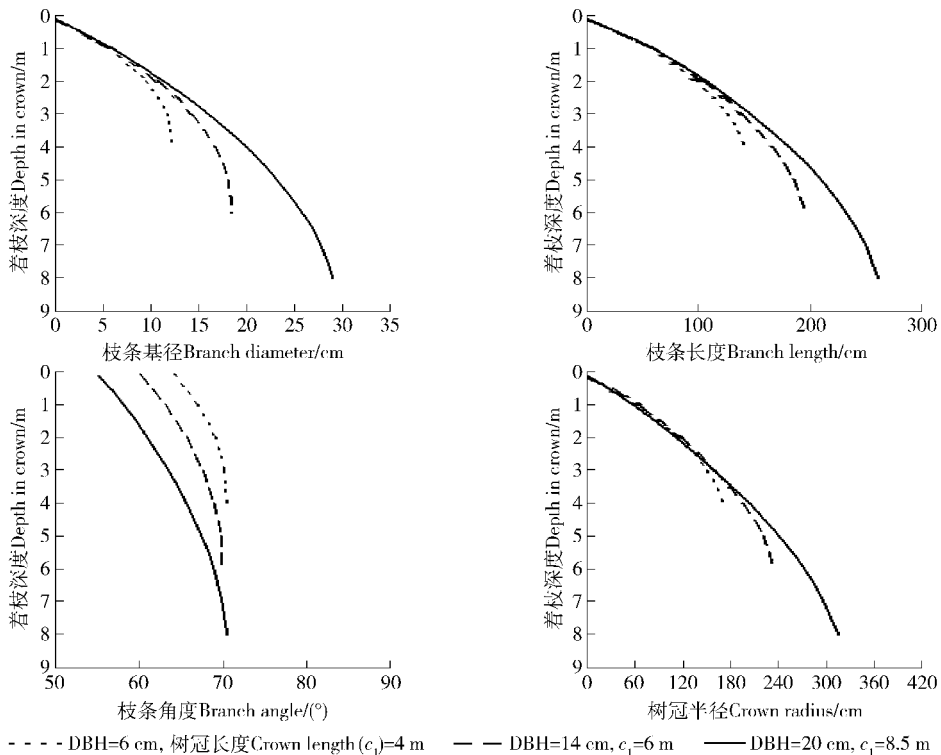


图2 基于模型(2)的枝条基径、枝长、角度及冠形模拟

Fig.2 Branch diameter, length, angle and crown profile simulation based on Model (2)

2.5.2 基于模型(3)的枝条特征及冠形模拟

采用相同的方法,利用模型(3)对枝条基径、长

度、角度以及树冠半径进行模拟。从图3可以看出:在每公顷株数不同的情况下,相同胸径的单木枝条

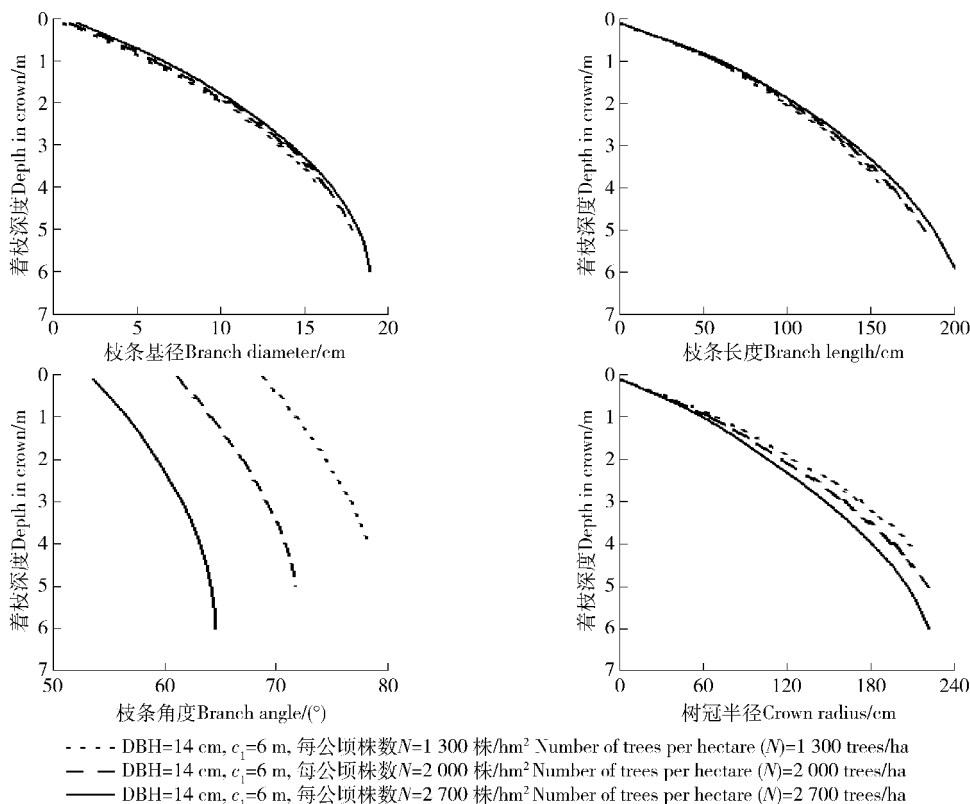


图3 基于模型(3)的枝条基径、枝长、角度及冠形模拟

Fig. 3 Branch diameter, length, angle and crown profile simulation based on Model (3)

基径、长度、角度以及树冠半径随着着枝深度的增加而增加,到一定程度后收敛;枝条基径和枝条长度随着每公顷株数的增大而增大;枝条角度和树冠半径随着每公顷株数的增大而减小。林分变量很好地反映了林木在不同林分密度下的枝条基径、长度、角度以及树冠半径的变化。

3 结论与讨论

1)以我国大兴安岭地区最重要的针叶树种兴安落叶松为研究对象,采用逐步回归技术构建了枝条基径、长度和角度含误差变量的联立方程组模型。本研究对比了4种联立方程组模型参数估计方法,从参数估计的一致性和标准误可知似乎不相关回归过程方法(Seemingly Unrelated Regression, SUR)在模型拟合过程中表现最优,说明对含有误差变量的联立方程组来说,SUR法能得到较为可靠的参数估计。

2)研究发现兴安落叶松枝条基径与枝条长度和角度都有一定的相关性。这与以往的研究结果基本一致,如 Fernández 等^[20]研究智利辐射松(*Pinus radiata*)时认为枝条基径和长度之间具有线性关系,Beaulieu 等^[21]研究加拿大短叶松(*Pinus banksiana*)时指出枝条角度和枝条基径之间具有很强的相关性等。树木冠形变化是枝条特征多个变量共同作用的

结果,因此在建立枝条特征模型过程中需要引入含有误差的变量。

3)为了深入研究枝条特征的动态变化,利用混合模型中的随机参数与林分因子的关系将林分密度引入到枝条特征联立方程组模型中,构建了含有林分变量(每公顷株数)的枝条特征模型系统。该模型系统参数估计值的显著性以及拟合精度的提高,都充分说明林分变量对兴安落叶松枝条特征及冠形的变化有显著影响。该模型系统的构建具有生物统计学意义。

4)Sattler 等^[19]利用相同的方法构建了加拿大山杨(*Populus tremuloides* Michx.)、黑松(*Pinus contorta* Douglas ex Louden var. *latifolia* Engelm. ex S. Watson)、花旗松(*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *glauca* (Beissn.) Franco)和混合云杉(*Picea engelmannii* Parry ex Engelm. × *P. glauca* (Moench) Voss)的树冠长度和树冠半径模型,但该模型系统只能预测树冠的特征。本研究所构建的模型系统不但能预测树冠内枝条大小,还能通过枝长和着枝角度的三角关系来计算树冠半径,进而实现对树冠形状的预测。

5)影响树冠形状结构的因子有年龄^[22]、树冠等级^[23]、林分密度^[24]、树种组成^[25]和森林经营活动如施肥和间伐^[26]等。因此,本文所构建的兴安落叶松

枝条特征模型仅适用于与本研究立地条件相似的地区,立地条件差异较大地区还需考虑其他因素的影响。随着数据的积累,这些方面将有待于进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] TANABE S I, TODA M J, VINOKUROVA A V. Tree shape, forest structure and diversity of drosophilid community: comparison between boreal and temperate birch forests [J]. Ecological Research, 2001, 16:369-385.
- [2] SCOTT J H, REINHARDT E D. Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behavior [Z]. Fort Collins: USDA Forest Service Rocky Mountain Research Station, 2001.
- [3] WILSON J S, OLIVER C D. Stability and density management in Douglas-fir plantations[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2000, 30(6) : 910-920.
- [4] GRACE J C, JARVIS P G, NORMAN J M. Modelling the interception of solar radiant energy in intensively managed stands [J]. New Zealand Journal of Forestry Science, 1987, 17: 193-209.
- [5] KERSHAW A, MAGUIRE A. Influence of vertical foliage structure on the distribution of stem cross-sectional area increment in western hemlock and balsam fir[J]. Forest Science, 2000, 46(1) : 86-94.
- [6] MAGUIRE D A, KERSHAW J A, HANN D W. Predicting the effects of silvicultural regime on branch size and crown wood core in Douglas-fir[J]. Forest Science, 1991, 37(5) : 1409-1428.
- [7] NEPAL S K, SOMERS G L, CAUDILL S B. A stochastic frontier model for fitting tree crown shape in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) [J]. Journal of Agricultural, Biological, and Environmental Statistics, 1996, 1: 336-353.
- [8] DORUSKA P F, MAYS J E. Crown profile modeling of loblolly pine by nonparametric regression analysis [J]. Forest Science, 1998, 44(3) : 445-453.
- [9] HANN D W. An adjustable predictor of crown profile for stand-grown Douglas-fir trees[J]. Forest Science, 1999, 45(2) : 217-225.
- [10] CLUZEAU C, GOFF N L, OTTORINI J M. Development of primary branches and crown profile of *Fraxinus excelsior* [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1994, 24(12) : 2315-2323.
- [11] ROEH R L, MAGUIRE D A. Crown profile models based on branch attributes in coastal Douglas-fir [J]. Forest Ecology and Management, 1997, 96(1) : 77-100.
- [12] MÄKINEN H, SONG T. Evaluation of models for branch characteristics of Scots pine in Finland [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 158(1) : 25-39.
- [13] 李凤日. 长白落叶松人工林树冠形状的模拟 [J]. 林业科学, 2004, 40(5) : 16-24.
- LI F R. Modeling crown profile of *Larix olgensis* tree [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2004, 40(5) : 16-24.
- [14] HEIN S, WEISKITTEL A R, KOHNLE U. Branch characteristics of widely spaced Douglas-fir in south-western Germany: comparisons of modelling approaches and geographic regions [J]. Forest Ecology and Management, 2008, 256(5) : 1064-1079.
- [15] 姜立春, 李凤日, 张锐. 基于线性混合模型的落叶松枝条基径模型 [J]. 林业科学研究, 2012, 25(4) : 464-469.
- JIANG L C, LI F R, ZHANG R. Modeling Branch diameter with linear mixed effects for dahurian larch [J]. Forest Research, 2012, 25(4) : 464-469.
- [16] MÄKINEN H, COLIN F. Predicting branch angle and branch diameter of scots pine from usual tree measurements and stand structural information [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1998, 28(11) : 1686-1696.
- [17] FERNÁNDEZ M P, NORERO A. Relation between length and diameter of *Pinus radiata* branches [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2006, 21(2) : 124-129.
- [18] 李永慈, 唐守正, 徐松. 线性度量误差模型的参数估计法与最小二乘法的关系 [J]. 生物数学学报, 2008, 23(1) : 139-142.
- LI Y C, TANG S Z, XU S. Relationship between the parameter estimation method of linear measurement error model and the least square method [J]. Journal of Biomathematics, 2008, 23(1) : 139-142.
- [19] SATTLER D F, LEMAY V. A system of nonlinear simultaneous equations for crown length and crown radius for the forest dynamics model SORTIE-ND [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(8) : 1567-1576.
- [20] FERNÁNDEZ M P, NORERO A. Relation between length and diameter of *Pinus radiata* branches [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2006, 21(2) : 124-129.
- [21] BEAULIEU E, SCHNEIDER R, BERNINGER F, et al. Modeling jack pine branch characteristics in eastern Canada [J]. Forest Ecology and Management, 2011, 262(9) : 1748-1757.
- [22] ISHII H, MCDOWELL N. Age-related development of crown structure in coastal Douglas-fir trees [J]. Forest Ecology and Management, 2002, 169(3) : 257-270.
- [23] GILMORE D W, SEYMOUR R S. Crown architecture of *Abies balsamea* from four canopy positions [J]. Tree Physiology, 1997, 17(2) : 71-80.
- [24] MÄKINEN H. Effect of intertree competition on branch characteristics of *Pinus sylvestris* families [J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 1996, 11(1-4) : 129-136.
- [25] GARBER S M, MAGUIRE D A. Vertical trends in maximum branch diameter in two mixed-species spacing trials in the central Oregon Cascades [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2005, 35(2) : 295-307.
- [26] WEISKITTEL A R, MAGUIRE D A, MONSERUD R A. Modeling crown structural responses to competing vegetation control, thinning, fertilization, and Swiss needle cast in coastal Douglas-fir of the Pacific Northwest, USA [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 245(1) : 96-109.

(责任编辑 冯秀兰

责任编委 雷相东 黄选瑞)