

云南松地上生物量模型研究

冉啟香¹, 邓华锋¹, 黄国胜², 王雪军², 陈振雄³

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 国家林业局 调查规划设计院, 北京 100029; 3. 国家林业局 中南林业调查规划设计院, 湖南 长沙 410014)

摘要: 森林生物量作为森林生态系统的最基本数量特征, 是研究许多林业问题和生态问题的基础, 但由于地域的不同, 地上生物量及各分项生物量存在差异。以西藏、云南 2 个省(自治区)的 130 株实测云南松 *Pinus yunnanensis* 生物量数据, 分别用传统回归方法和利用引入地理区域为特征的哑变量方法建立了地上总生物量和地上各分项生物量的一元(胸径为自变量)、二元(胸径和树高为自变量)和三元(胸径、树高、冠幅为自变量)模型。结果表明: 所建生物量模型中, 地上总生物量模型精度最高, 预估精度为 0.930 0~0.960 0, 其次是树干、树皮和干材生物量模型, 预估精度为 0.900 0~0.950 0, 树叶生物量模型的预估精度相对较低, 其值为 0.850 0~0.890 0, 而且所有的模型都满足二元模型的预估精度和确定系数比一元模型高, 与三元模型相差不大。引入哑变量后的模型中, 不管是一元模型、二元模型还是三元模型, 模型的确定系数、预估精度都相应提高, 确定系数为 0.730 0~0.960 0, 预估精度为 0.880 0~0.960 0, 而且估计值的标准误差和平均相对误差都减少了。因此, 构建不同区域地上生物量和和各分项生物量模型时, 建议引入哑变量, 以提高模型精度和适用性, 来解决不同地区模型不相容的问题。表 4 参 23

关键词: 森林经理学; 云南松; 地上生物量模型; 哑变量; 地域

中图分类号: S753.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2016)04-0605-07

An aboveground biomass model for *Pinus yunnanensis*

RAN Qixiang¹, DENG Huafeng¹, HUANG Guosheng², WANG Xuejun², CHEN Zhenxiong³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100029, China; 3. Central South Forest Inventory and Planning Institute, State Forestry Administration, Changsha 410014, Hunan, China)

Abstract: Forest biomass, the most basic quantitative characteristic of forest ecosystems, is the basis of many forestry and ecological problems. Because of regional differences, measurements for aboveground biomass and the biomass of six components, including stems, branches, crowns, foliage, boles, and bark, often differ. To determine if regional biomass characteristics introduced as dummy variables in one, two, and three variable biomass models effectively improved accuracy and R^2 of the models, biomass data from 130 sampled trees of *Pinus yunnanensis* was determined for total aboveground biomass and biomass of components, including diameter alone; diameter and height; and diameter, height, and canopy width, as independent variables. Then traditional regression was used incorporating geographic areas as characteristics of dummy variables to develop one, two, and three variable biomass models in Xizang and Yunnan. Heteroscedasticity for each biomass model was eliminated with weighted regression. Results of total biomass models showed that the model for total aboveground biomass had the highest predicted precision (P) with 0.930 0–0.960 0 followed by models for stem, bark, and bole biomass with a precision of 0.900 0–0.950 0. Predicted precision for the foliage biomass models

收稿日期: 2015-09-16; 修回日期: 2015-11-11

基金项目: 北京市教育委员会科学研究与科研基地建设项目(省部共建重点实验室); 国家林业公益性行业科研专项(201204510)

作者简介: 冉啟香, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: 851912335@qq.com。通信作者: 邓华锋, 教授, 博士, 博士生导师, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: denghuafeng@bjfu.edu.cn

was relatively low, but it was still greater than 0.850 0. The coefficient of determination (R^2) and P for the two variable model compared to the one variable model was more greater, but was no differences in three variable biomass models. With the introduced dummy variable, R^2 maximum reached 0.730 0–0.960 0 and P maximum reached 0.880 0–0.960 0, thereby reducing the standard error and the average prediction error of the estimated value. Therefore, when constructing aboveground biomass models for different regions, the dummy variable model should be used to improve accuracy and generality of the aboveground biomass model, thereby helping to settle incompatibility problems between models of different regions. [Ch, 4 tab. 23 ref.]

Key words: forest management; *Pinus yunnanensis*; aboveground biomass; dummy variable; region

森林生物量作为森林生态系统的最基本的数量特征,是研究许多林业问题和生态问题的基础,对研究生态系统物质和能量的固定、消耗、分配、积累和转化都有着非常重要的意义^[1],但针对在较大范围内调查测定森林生物量有很大的难度,而且要耗费很大的时间和精力,因此,建立生物量模型是目前生物量估测的主要手段^[2],可以大大减少调查工作量。利用该方法来对全国生物量进行估测已经成为一种趋势^[3-4]。为了开展全国森林生物量监测和评估,如何建立适合较大区域范围的通用性立木生物量模型是一项基础工作,而分析森林生物量受不同地域的影响并保证不同尺度范围森林生物量估计值的可靠性下尽量简化所建模型,是值得研究的一个问题^[5-6]。哑变量模型方法为解决这一问题提供了可能途径。近年来,一些学者对哑变量的应用主要是集中在对森林生物量模型参数估计和模型通用性上。李忠国等^[7]利用哑变量方法研究了北亚热带高山区和暖温带中山区日本落叶松 *Larix kaempferi* 的生长模型;郑冬梅等^[8]利用哑变量方法构建东北落叶松 *Larix* spp. 和栎类 *Quercus* spp. 分段地上生物量模型;高东启等^[9]利用哑变量方法将间伐林分和未间伐林分合并建立林分断面积和蓄积量生长模型;符利勇等^[10]利用哑变量方法构建了东北地区兴安落叶松 *Larix gmelinii* 和长白落叶松 *Larix olgensis* 等 2 个树种地上生物量通用模型,但是针叶树种生物量受不同地域的影响研究相对较少,实际中不同地域相同树种的生物量可能差别较大,所以建立全国树种生物量通用模型及经营管理森林时,考虑地域因子对生物量的影响是十分必要的。本研究以西藏自治区和云南省 2 个不同地区的云南松 *Pinus yunnanensis* 实测地上生物量调查数据为基础,利用已知的地理区域信息,在生物量模型的研究中引入地理区域为特征的哑变量,来解决不同地区建模不相容的问题。

1 数据来源

本研究共调查 130 株云南松样木,采集时间为 2009 年,采集地点为西藏、云南(表 1)。样本单元数的选取基本按各省(自治区)资源多少进行分配,并把样木按 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 26, 32, >38 cm 等共 10 个径阶均匀分布。每个径阶样木数按树高级也基本均匀分配,因此,样本在大尺度范围内具有广泛代表性。全部样木都实测胸径、地径和冠幅。将样木伐倒后,测量树高(树干长度)和冠长(活树冠长度),分干材、干皮、树枝和树叶称鲜质量、干质量作为研究的基础数据。根据样品鲜质量和干质量分别推算出样木各部分干质量,并汇总得到地上部分干质量。样木按地域分布情况见表 1。

2 方法

林木生物量包括地上生物量和地下生物量,涉及干材、干皮、树枝、树叶、树根等各个分项,但作为大尺度森林生物量监测,关注的主要是总生物量尤其是地上生物量^[11-13]。本研究主要是运用地上生物量数据为基础,对地上总生物量、树冠生物量、树干生物量、叶生物量、干材生物量、树枝生物量,树皮生物量分别用常规的方法和引入哑变量模型的方法建模,并对两者的拟合精度和预估精度进行比较和评价。

2.1 模型的选择

国内外学者对生物量模型做了大量研究,并得到多种经验模型^[14-17]。一些常用的林木大小变量包括胸径(D),树高(H), D^2H , 年龄,活冠长,冠幅活冠基部直径等;不同的学者根据生物量建模对象不同,方程的结构形式就可能不同^[18-19]。本研究主要研究地上总生物量以及地上各分段生物量包括(树干、

表 1 云南松生物量基本数据的统计

Table 1 Statistics of basic conditions data for <i>Pinus yunnanensis</i>												
地域	样本 量/个	项目	胸径 (<i>D</i>)/cm	树高 (<i>H</i>)/m	冠幅 (<i>C_w</i>)/m	地上生物 量(<i>W</i>)/kg	树干生物 量(<i>W_s</i>)/kg	树冠生物 量(<i>W_c</i>)/kg	树枝生物 量(<i>W_b</i>)/kg	叶生物量 (<i>W_L</i>)/kg	树皮生物 量(<i>W_P</i>)/kg	干材生物 量(<i>W_c</i>)/kg
西藏	50	平均值	16.70	11.30	4.20	140.60	104.60	36.00	25.90	10.20	13.00	91.50
		最小值	1.80	2.00	1.10	0.31	0.21	0.10	0.02	0.03	0.07	0.14
		最大值	46.70	33.30	10.60	850.20	698.90	185.30	141.90	64.80	66.50	632.40
		标准差	12.49	7.32	2.51	255.22	157.52	53.42	39.19	15.39	17.68	140.27
		变异系数/%	74.66	64.70	60.00	181.60	150.60	36.00	151.60	151.70	135.60	153.20
云南	80	平均值	16.70	10.70	4.70	146.70	109.00	37.70	30.50	7.30	11.00	98.10
		最小值	1.90	1.80	0.75	0.40	0.29	0.07	0.03	0.04	0.10	0.19
		最大值	47.10	29.10	12.60	900.60	763.80	212.40	189.60	39.80	66.40	697.50
		标准差	12.21	6.95	2.84	202.60	162.73	48.05	39.92	8.83	14.71	148.35
		变异系数/%	73.23	65.00	60.36	138.09	149.23	127.48	131.30	121.11	134.08	151.26

树冠、树枝、叶、树皮、干材)与胸径、树高和冠幅之间的回归关系^[18-19]。对应的一元、二元和三元生物量模型表达式如下：

$$W=aD^b; \tag{1}$$

$$W=aD^bH^c; \tag{2}$$

$$W=aD^bH^cC_w^e。 \tag{3}$$

模型(1)~模型(3)中：*W* 为地上生物量或者各分段生物量，*D* 为胸径，*H* 为树高，*C_w* 平均冠幅，*a*，*b*，*c*，*e* 为待估参数。

2.2 哑变量的引入

哑变量为虚拟变量，常用于处理定性因子或分类变量，一般取值为 0 或 1^[6]。哑变量的定义为对于等级性(定性)数据 *x*，用变量 $\delta(x, i)$ 表示成：

$$\delta(x, i)=\begin{cases} 1, & \text{当 } x \text{ 取值为 } i \text{ 等级} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}。 \tag{4}$$

这种方法叫做定性因子(0, 1)化展开，变量 $\delta(x, i)$ 就称为哑变量。因定性变量为取 0 或 1 的数值向量，这就便于用数值方法进行处理^[20]。

设第 *i* 个地区样地的编号为 *S_i*，将定性数据 *S_i* 转化为(0, 1)。引入哑变量，可以将不同地区的林分用定性代码来表示，从而整合成一个模型来构建，这样既减少了工作量又使得模型具有相容性。即：

$$S_i=\begin{cases} 1, & \text{当 } S_i \text{ 为第 } i \text{ 个地区的林分时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}。 \tag{5}$$

模型(5)中：*i*= 1, 2, …*n*。本研究包括西藏、云南 2 个区域，故 *n*=2。在本研究中，将地区作为哑变量，使用 Forstat 2.0 软件来进行哑变量的计算。因此，在模型(1)~模型(3)中引入以地理信息为哑变量的模型为：

$$W=(a_1S_1+a_2S_2)D^{(a_3S_1+a_4S_2)}; \tag{6}$$

$$W=(b_1S_1+b_2S_2)D^{(b_3S_1+b_4S_2)}H^{(b_5S_1+b_6S_2)}; \tag{7}$$

$$W=(c_1S_1+c_2S_2)D^{(c_3S_1+c_4S_2)}H^{(c_5S_1+c_6S_2)}C_w^{(c_7S_1+c_8S_2)}。 \tag{8}$$

模型(6)~模型(8)中：*W* 为地上总生物量或者地上各分段生物量，*a₁*，*a₂*，*b₁*，*b₂*，*c₁*，*c₂*，*e₁*，*e₂* 分别为哑变量 *S₁*，*S₂* 作用在参数 *a*~*e* 上的固定效应。

2.3 异方差的消除

生物量数据普遍存在着异方差性，在拟合地上生物量模型(1)~模型(3)和模型(6)~模型(8)时，要采取措施消除异方差^[21]。常用方法是采用对数回归或加权回归。本研究采用非线性加权回归方法，权函数根据普通回归方程残差平方确定，选用原基础方程本身作为权函数形式对残差进行拟合。公式如下：

$$W=1/f(X)^2。 \tag{9}$$

2.4 参数估计及模型评价

本研究综合应用 ForStat 和 Excel 进行数据处理、参数估计和评价指标的计算。为了对不同方法的模型进行对比分析,本研究采用 R^2 (确定系数), E_{SEE} (估计值的标准误差), E_{TRE} (总相对误差)和 P (模型预估精度)等 4 项统计指标来对模型进行评价和对比。其模型为^[22]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (W_i - \bar{W}_i)^2}; \quad (10)$$

$$E_{\text{SEE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}{(n-p)}}; \quad (11)$$

$$E_{\text{TRE}} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}{\sum_{i=1}^n \hat{W}_i} \right) 100\%; \quad (12)$$

$$P = \left(1 - \frac{t_{\alpha} \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}}{\bar{W}_i \sqrt{n(n-T)}} \right) \times 100\%。 \quad (13)$$

模型(11)~模型(13)中: W_i , $\hat{W}_i$ 分别为第 i 株样木的地上生物量实测值和估计值, $\bar{W}_i$ 为全部样木实测值的平均值, n 为样木总数, T 为模型参数个数。 t_{α} 为自由度 $n-T$, 置信水平 α ($\alpha=0.05$) 时的 t 分布值。

3 结果与分析

3.1 地上生物量数据拟合结果

利用西藏、云南 130 株样木的地上生物量以及各分段生物量与胸径、树高、冠幅的成对数据, 引入包含地域的哑变量, 采用 ForStat 软件分别拟合对应的一元、二元和三元模型, 并通过模型评价指标对其进行分析比较。其地上生物量模型的评价指标如表 2 所示。

表 2 云南松地上生物量常规模型与哑变量模型的拟合结果

Table 2 Fitting results of conventional and dummy model for *Pinus yunnanensis* aboveground biomass

评价指标	常规回归模型			哑变量模型		
	模型 1	模型 2	模型 3	模型 6	模型 7	模型 8
R^2	0.925 5	0.950 1	0.954 6	0.925 6	0.951 6	0.961 2
E_{SEE}	56.114 7	46.133 7	44.180 7	54.633 4	44.246 3	36.871 8
E_{TRE}	-0.003 8	-0.004 5	-0.004 5	0.001 9	0.000 2	0.001 7
P	0.932 8	0.944 8	0.947 1	0.933 9	0.945 7	0.955 6

由表 2 结果来看, 对于地上总生物量模型来说, 传统生物量模型和考虑地域的生物量模型拟合效果都较好, 预估精度都在 0.930 0 以上, 最高达 0.955 6, 确定系数在 0.920 0 以上, 最高达 0.961 2。通过对一元、二元和三元模型的对比分析, 结果显示: 都是三元生物量模型预估精度最高, 其次是二元生物量模型, 而一元生物量模型最低。另外, 通过对传统生物量模型和考虑地域的生物量模型对比分析, 结果显示: 考虑引入地域的哑变量对生物量模型的预估精度和确定系数都有相对的提高, 而估计值的标准误差和总相对误差也都有所减小。这说明在一定程度上引入地域的哑变量可以相对提高模型的精度。

3.2 云南松各分项生物量数据拟合结果

由表 3~4 结果看, 对于地上各分项生物量模型来说, 2 种模型方法所建立的预估精度和确定系数都比较高, 但总的来说, 对于每一个分项生物量, 哑变量模型的确定系数和预估精度都比传统模型有相应的提高, 而且估计值的标准误差和总相对误差也都有所减小, 其中除了树干和干材的一元模型的 E_{SEE} 在 50% 左右外, 其他各个模型的 E_{SEE} 都在 30% 左右, 而 E_{TRE} 都在 10% 以下。这说明引入哑变量有助于提高模型的精度。在所有分项生物量中, 树叶的确定系数最低, 在 0.670 0 以上, 最高达 0.784 5, 但预估精度都在 0.850 0 以上, 最高为 0.898 0, 所以所建模型还是比较合理的, 树叶确定系数较低的原因可能是由于树叶不易测定, 于其他生物量模型来说, 测定的误差相对来说较大一些。从一元、二元和三元模型的对比分析表明: 三元生物量模型预估精度最高, 其次是二元生物量模型, 一元生物量模型最低。另

外，通过对传统生物量模型和哑变量模型对比分析，结果显示：不管是一元、二元还是三元生物量模型，哑变量模型的预估精度和确定系数都有相对提高，其中，对树叶的生物量模型影响最大，确定系数提高了 7 个百分点，预估精度提高了 3 个百分点，其次是树干、树冠和树枝的生物量模型，模型 6，模型 7，模型 8 都提高了 1 个百分点，模型 8 对干材的生物量模型提高较多，而且所有有哑变量模型的标准误差和总相对误差也都比常规模型较低，这说明引入地域的哑变量可以相对提高模型的精度。

4 结论和讨论

本研究以西藏、云南 2 个地区的 130 株云南松地上生物量以及各分段生物量实测数据为例，采用了常规回归方法和哑变量模型方法构建了地上总生物量和各分段生物量的一元、二元和三元模型，并采用加权回归的方法进行异方差的消除。根据前面结果，得出以下结论：①绝大多数总生物量与各分项生物量模型的平均相对误差和估计值的标准误差绝对值为 $\pm 10\% \sim \pm 30\%$ ，总体来说各分项生物量和总生物量模型的拟合效果较好，所建模型比较合理。这与董利虎等^[23]对东北林区天然白桦相容性生物量模型的研究结果一致。②从决定系数和预估精度而言，无论是传统生物量模型还是引入哑变量的模型，均为三元生物量模型的预估精度最高，二元生物量模型次之，一元生物量模型最小。对于地上总生物量模型来

表 3 云南松树干和树冠生物量常规模型与哑变量模型拟合结果

Table 3 Fitting results of conventional and dummy model for <i>Pinus yunnanensis</i> stem and crown biomass							
拟合	评价指标	常规回归模型			哑变量模型		
		模型 1	模型 2	模型 3	模型 6	模型 7	模型 8
树干生物量拟合结果	R^2	0.888 1	0.950 1	0.960 4	0.890 8	0.960 3	0.966 3
	E_{SEE}	54.199 2	33.469 9	32.484 6	53.970 4	32.811 3	30.479 4
	E_{TRE}	0.027 8	0.000 0	0.005 6	0.006 7	0.001 1	0.002 7
	P	0.909 9	0.945 9	0.947 2	0.912 1	0.954 1	0.955 6
树冠生物量拟合结果	R^2	0.803 4	0.836 4	0.840 2	0.815 2	0.849 0	0.852 0
	E_{SEE}	22.426 3	20.540 4	20.383 0	21.577 0	19.972 2	19.930 4
	E_{TRE}	-0.007 1	-0.004 6	-0.002 1	-0.004 6	-0.004 4	-0.001 0
	P	0.895 7	0.904 2	0.904 7	0.899 7	0.908 6	0.908 8

表 4 云南松地上各分段生物量常规模型与哑变量模型拟合结果

Table 4 Fitting results of conventional and dummy model for <i>Pinus yunnanensis</i> components biomass							
拟合	评价指标	常规回归模型			哑变量模型		
		模型 1	模型 2	模型 3	模型 6	模型 7	模型 8
树皮生物量拟合结果	R^2	0.895 0	0.930 7	0.932 3	0.895 3	0.932 5	0.938 3
	E_{SEE}	5.207 6	4.246 7	3.888 4	5.141 0	4.140 6	3.088 5
	E_{TRE}	0.019 5	0.017 3	0.002 5	0.017 2	0.016 3	0.008 5
	P	0.921 7	0.936 3	0.937 7	0.928 2	0.944 4	0.949 1
干材生物量拟合结果	R^2	0.880 6	0.953 9	0.957 8	0.884 2	0.956 5	0.963 8
	E_{SEE}	50.619 7	31.561 4	30.316 7	50.229 3	31.021 2	28.526 2
	E_{TRE}	-0.004 5	-0.003 9	-0.003 4	-0.004 1	-0.002 2	-0.000 7
	P	0.908 5	0.942 9	0.945 2	0.909 1	0.951 4	0.958 2
树叶生物量拟合结果	R^2	0.670 8	0.706 8	0.712 6	0.738 0	0.771 8	0.784 5
	E_{SEE}	6.866 8	6.505 5	6.466 9	6.174 3	5.809 0	5.074 3
	E_{TRE}	-0.011 1	0.010 6	0.009 2	-0.010 1	-0.009 0	0.008 3
	P	0.858 1	0.864 0	0.864 9	0.874 8	0.897 1	0.898 0
树枝生物量拟合结果	R^2	0.767 3	0.807 0	0.817 0	0.775 4	0.807 6	0.817 5
	E_{SEE}	18.453 4	17.182 1	15.918 5	18.112 6	16.926 2	15.182 5
	E_{TRE}	-0.004 5	-0.002 8	-0.001 3	-0.003 5	-0.002 0	-0.000 8
	P	0.888 7	0.896 2	0.897 6	0.889 0	0.906 7	0.919 8

说, 2种模型所建立的预估精度都比较高, 都在 0.900 0 以上, 确定系数在 0.920 0 以上, 而其他各分项生物量模型的预估精度也都较高, 树干、干材的确定系数在 0.880 0 以上, 预估精度在 0.900 0 以上; 树冠、树枝、树皮的确定系数在 0.800 0 以上, 预估精度在 0.880 0 以上; 树叶拟合效果较差, 确定系数在 0.670 0 以上, 预估精度在 0.850 0 以上。然而在现实野外调查中, 考虑到树高和冠幅的测定工作量大, 耗时耗力, 并且由于林分结构复杂或样地地形险要等因素使得测量的数据存在较大的度量误差等问题^[10], 因此, 对于生物量模型来说, 在应用时, 可根据要求选择考虑地域的一元生物量模型比较适宜。③在传统模型的基础上, 引入以已知区域为特征的哑变量, 结果显示: 每个生物量模型的确定系数和预估精度都相应地提高了。在树叶生物量模型上, 模型 6, 模型 7, 模型 8 的确定系数和预估精度都有较大的提高, 其次是在树干、树冠和树枝上, 最后模型 8 对树皮、干材生物量的影响较大, 而且模型的标准误差和总相对误差也都有所减小, 虽然没有像对树叶的影响那么明显, 但是引入地域的哑变量在一定程度上可以提高模型的精度, 因此, 有必要考虑引入哑变量构建不同地域地上生物量和各分项生物量通用模型。

本研究拟合的树叶生物量模型效果较差, 可能是由于调查误差的存在使数据变动范围变大引起的, 因此, 为了提高生物量模型的精度, 以后应在外业进行枝解析时应尽量避免树枝、树叶部分生物量的损失。在实地进行调查时, 应选取各个径阶的样木, 这样建立的模型具有一定的适用性。本研究只研究了 2 个不同地域的通用性哑变量模型, 对于多个地域, 也可用类似方法构建多地域的通用性哑变量模型。本研究的着重点是地域对地上生物量和各分项生物量建模的影响, 后续研究可考虑利用非线性混合模型和误差变量联立方程组, 建立包含林分起源、地域与各部分生物量、立木材积相容的生物量模型。

5 参考文献

- [1] TOMPPO E, GSCHWANTNER T, LAWRENCE M, *et al.* *National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting* [M]. New York: Springer Verlag, 2010.
- [2] 唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. 林业科学, 2000, **36**(专刊 1): 19 – 27.
TANG Shouzheng, ZHANG Huirui, XU Hui. Study on establish and estimate method of compatible biomass model [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36**(supp 1): 19 – 27.
- [3] 邢艳秋, 王立海. 基于森林调查数据的长白山天然林森林生物量相容性模型[J]. 应用生态学报, 2007, **18**(1): 1 – 8.
XING Yanqiu, WANG Lihai. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory [J]. *J Appl Ecol*, 2007, **18**(1): 1 – 8.
- [4] 王轶夫, 孙玉军. 马尾松生物量模型的对比研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(10): 29 – 33.
WANG Yifu, SUN Yujun. Comparative study on biomass models for *Pinus massoniana* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2012, **32**(10): 29 – 33.
- [5] 曾伟生, 唐守正. 利用度量误差模型方法建立相容性立木生物量方程系统[J]. 林业科学研究, 2010, **23**(6): 797 – 802.
ZENG Weisheng, TANG Shouzheng. Using measurement error modeling method to establish compatible single-tree biomass equations system [J]. *For Res*, 2010, **23**(6): 797 – 802.
- [6] 曾伟生, 唐守正, 夏忠胜, 等. 利用线性混合模型和哑变量模型方法建立贵州省通用性生物量方程[J]. 林业科学研究, 2011, **24**(3): 285 – 291.
ZENG Weisheng, TANG Shouzheng, XIA Zhongsheng, *et al.* Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct generalized single-tree biomass equations in Guizhou [J]. *For Res*, 2011, **24**(3): 285 – 291.
- [7] 李忠国, 孙晓梅, 陈东升, 等. 基于哑变量的日本落叶松生长模型研究[J]. 西北农林科技大学: 自然科学版, 2011, **39**(8): 69 – 74.
LI Zhongguo, SUN Xiaomei, CHEN Dongsheng, *et al.* Dummy variables model of increment of *Larix kaempferi* [J]. *J Northwest A & F Univ Nat Sci Ed*, 2011, **39**(8): 69 – 74.
- [8] 郑冬梅, 曾伟生. 用哑变量方法构建东北落叶松和栎类分段地上生物量模型[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(6): 23 – 27.