

基于度量误差方法的油松林分生长模型

王金池¹, 冉啟香¹, 邓华锋¹, 黄国胜², 王雪军²

(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 100714)

摘要: 为掌握北京地区油松 *Pinus tabulaeformis* 生长过程, 建立相容的断面积和蓄积模型, 通过引入间伐林分与未间伐林分的哑变量, 分别建立林分断面积、林分蓄积生长模型, 然后从相容的角度出发, 建立林分断面积、蓄积量的误差变量联立方程组, 并与不含哑变量的传统生长模型的误差变量联立方程组进行比较。经检验, 传统误差变量联立方程组中林分断面积和林分蓄积生长模型的预测精度都在 92% 以上, 对油松林分断面积的预测精度高达 0.921 5, 决定系数高达 0.900 1, 对油松林分蓄积量的预测精度达到了 0.928 3, 决定系数高达 0.912 3, 而引入哑变量的误差变量联立方程组中, 模型的预测精度和确定系数稍高, 均在 93% 以上, 对油松林分断面积的预测精度高达 0.939 8, 决定系数达到了 0.927 9, 对油松林分蓄积量的预测精度在 0.930 0 以上, 决定系数达 0.932 8。这说明引入哑变量, 一定程度上提高了模型的预测精度, 而且所建模型比较合理, 形式相对简单, 便于应用, 不仅使得林分水平上的林分断面积、蓄积量的预测结果具有相容性, 同时还考虑了间伐措施对林分生长的影响, 达到了林分生长与收获模型整体化研究的目的, 为林分的经营管理提供了可靠依据。表 5 参 21

关键词: 森林测计学; 度量误差方法; 哑变量; 生长模型; 油松

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2018)01-0068-07

Stand growth model for *Pinus tabulaeformis* using measurement error method

WANG Jinchi¹, RAN Qixiang¹, DENG Huafeng¹, HUANG Guosheng², WANG Xuejun²

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: To grasp the growth process of *Pinus tabulaeformis* in Beijing and to establish general and compatible models, stand basal area and volume growth models with dummy variables of thinned and unthinned stands were established. Then from the perspective of compatibility, simultaneous equations with error variables were established for stand basal area and volume. These were compared to simultaneous equations with error variables of the traditional growth model with no dummy variable. Results after inspection showed prediction accuracies of stand basal area and volume were over 92% in the traditional simultaneous equations with error variables. Prediction accuracies of *P. tabulaeformis* for stand basal area reached 0.921 5 with coefficients of determination as high as 0.900 1; whereas, prediction accuracies of stand volume reached 0.928 3 with coefficients of determination of 0.912 3. However, in simultaneous equations with error variables of introduced dummy variables, the prediction accuracies and coefficients of determination of models were slightly higher with over 93%. Prediction accuracy of stand basal area was over 0.939 8 with coefficients of determination reaching 0.927 9. Prediction accuracy of stand volume was over 0.930 0 with coefficients of determination as high as 0.932 8. Thus, to improve prediction accuracies, models using dummy variables were reasonable as the form was rela-

收稿日期: 2016-12-19; 修回日期: 2017-03-15

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: 王金池, 从事森林资源监测与评价研究。E-mail: 2276599635@qq.com。通信作者: 邓华锋, 教授, 博士, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: denghuafeng@bjfu.edu.cn

tively simple, easy to apply, made forecast results of stand basal area and volume predictions consistent, considered the effect of thinning measures on stand growth, and achieved the purpose of stand growth and yield model integrative research, thereby offering a reliable basis for forest management. [Ch, 5 tab. 21 ref.]

Key words: forest mensuration; measurement error method; dummy variable; growth model; *Pinus tabulaeformis*

研究林分生长与收获预估模型可以了解森林的生长变化规律和预估林分生长量、收获量^[1]。在林分生长与收获预估模型的研究中,林分断面积是林分生长收获模型系统的核心部分^[2],而林分蓄积量的大小又标志着林地生产力的高低及经营措施的效果^[3]。在目前的研究中,许多学者都是分别建立林分断面积与蓄积生长模型的^[2-6],但理论上,林分断面积与林分蓄积量的大小密切相关,是一个常用的林分密度指标,有学者认为选用林分断面积作为密度指标来建立林分蓄积模型时,模型的预估效果会更好^[7]。在林分生长与收获模拟预测体系中林分断面积既可以作为重要的自变量来预估蓄积,又可以作为因变量被模拟预测。通常我们认为只有因变量的观测值含有误差,但实际上,无论是自变量还是因变量都会存在来自抽样或测量等方面的误差。我们把这些误差都称为度量误差^[8]。当自变量和因变量都有误差时,传统模型方法就不再适用于模型的拟合,因此需要采用度量误差模型来建立误差联立方程组,使模型之间具有相容性。最近几年,度量误差模型在林业上的应用研究越来越深入。李际平等^[9]利用非线性度量误差模型建立了南方马尾松 *Pinus massoniana* 地上生物量与树干、树冠的相容性联立方程组模型;陈振雄等^[10]利用度量误差模型方法建立了海南省桉树 *Eucalyptus* spp.,木麻黄 *Casuarina equisetifolia*,马占相思 *Acacia mangium* 的树干去皮材积与质量相容性联立方程组;高东启等^[11]以 Richards 方程为基础模型,利采用度量误差模型对蒙古栎 *Quercus mongolica* 建立了林分相容性树高曲线方程组;蒋益等^[8]也用该方法建立了油松 *Pinus tabulaeformis* 林分相容性树高曲线方程组。但目前,利用度量误差模型方法建立林分蓄积、断面积的误差联立方程组的研究尚鲜有报道。油松根系发达,有较强的适应性和抗逆性,是中国北方温带针叶林中分布最广的群落^[12],因此,本研究在前人研究的基础上,利用北京市油松一类清查数据,在保证各因子之间既相容又能预测精度的前提下,用传统方法和引入以间伐措施为特征的哑变量方法为基础模型来建立相容性的林分断面积、蓄积联立方程组,使断面积、蓄积 2 个因子预测时保持相容性和一致性,达到在优化模型结构的同时减少外业调查误差对预测结果影响的目的,使模型更具生物学意义和解释性。

1 材料与方 法

1.1 数据来源与整理

本研究所用数据为国家林业局调查规划设计院 1996, 2001, 2006 年的北京市油松一类清查数据,各个样地面积为 0.066 7 hm²。记录林木胸径、林分平均高、林分年龄、林分蓄积、采伐蓄积、郁闭度、海拔高度等林分调查因子。调查期内对部分林分进行了抚育间伐。剔除数据缺失、记录不详及有明显误的样地及疏林地样地,最终选出 133 块油松人工林样地用以建模和检验,包括 65 块间伐样地(共 4 299 株样木)和 68 块未间伐样地(共 4 330 株样木)。对 133 块样地进行随机抽样,其中 80 块样地用于建模,剩余 53 块样地用于检验。统计样地基本情况及随机抽样的样地、样木分布情况分别如表 1 和表 2 所示。

1.2 基于传统方法的蓄积、断面积生长模型

近年来,对林分断面积、蓄积生长模型的研究越来越多,但其中以 Richards 和 Schumacher 模型 2 种应用较为广泛^[13-14]。本研究在初步的试验以及前人研究的基础上发现 Richard 方程能够较好地拟合油松的蓄积、断面积生长模型。利用地位指数来反映林分的立地质量^[15-16],选取林分密度指数和林分断面积作为密度指标来拟合林分断面积和蓄积生长模型,采用 Richard 方程对油松的蓄积和断面积生长模型进行拟合。公式如下:

$$G=a_1I_s^{a_2}\{1-\exp[-a_3(I_{SD}/1\ 000)^{a_4}A]\}^{a_5}; \quad (1)$$

$$M=b_1I_s^{b_2}[1-\exp(-b_3G^{b_4}A)]^{b_5}。 \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: G 和 M 分别为林分的断面积和蓄积, I_s 为地位指数^[17], I_{SD} 为林分密度指数^[17](根据公式 $I_{SD}=N(D_g/D_0)^b$ 获得,其中 N 为单位面积株数, D_g 为林分平均胸径, D_0 为 20 cm, b 为自稀疏率

表1 样地基本情况

Table 1 The condition of plots

样地类型	项目	年龄/a	平均胸径/cm	平均树高/m	林木株数/(株·hm ²)	林分断面积/(m ² ·hm ²)	林分蓄积/(m ³ ·hm ²)
间伐样地	最大值	56	20.0	16.5	2 054	32.925 9	12.701 6
	最小值	19	8.4	5.4	180	1.292 7	4.287 9
	平均值	38	12.9	9.5	992	13.394 4	52.360 3
未间伐样地	最大值	62	22.4	15.7	2 339	46.139 5	200.689 7
	最小值	15	7.0	4.2	225	0.710 2	5.082 5
	平均值	35	12.2	8.9	955	12.480 7	49.293 6
全部样地	最大值	62	22.4	16.5	2 339	46.139 5	200.689 7
	最小值	15	7.0	4.2	180	0.710 2	4.287 9
	平均值	36	12.6	9.2	973	12.927 2	50.792 3

表2 建模及检验数据样地、样木分布情况

Table 2 Distribution of plots and tree of fit data and validation data

项目	间伐林分		未间伐林分		合计	
	样地/个	样木/株	样地/个	样木/株	样地/个	样木/株
建模数据	41	2 876	39	2 504	80	5 380
检验数据	24	1 423	29	1 826	53	3 249
全部样地	65	4 299	68	4 330	133	8 629

1.384), A 为林分年龄, $a_1 \sim a_5$ 和 $b_1 \sim b_5$ 为模型的预估参数。

1.3 基于哑变量方法的蓄积、断面积生长模型

间伐是最重要的营林技术措施之一^[18]。现实中的林分由于抚育间伐的影响, 间伐与未间伐林分在生态环境、林分结构和生长规律上可能存在差异。一般来说, 需要分开建模, 但间伐和未间伐林分之间又存在一些联系^[19], 因此如何把不同的林分结合起来建立统一的模型并在保证模型预测值可靠性下使模型简化, 是值得研究的问题。哑变量模型方法为解决这一问题提供了可能途径^[20]。本研究在前人研究的基础上, 在模型中引入哑变量, 用定性代码来表示间伐和未间伐林分, 以整合构建具有相容性的统一模型。具体过程是将第 i 个类型的林分编号为 S_i , 将定性数据 S_i 转化为 0 和 1, 即:

$$S_i = \begin{cases} 1, & \text{当 } S_i \text{ 为第 } i \text{ 个类型的林分时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}。$$

其中: $i=1, 2$, S_1 和 S_2 分别为间伐林分和未间伐林分的定性代码。其形式如下:

$$G = (a_0 S_1 + a_1 S_2) I_s^{a_2} \{1 - \exp[-a_3 (I_{SD}/1\ 000)^{a_4} A]\}^{a_5}; \quad (3)$$

$$M = (b_0 S_1 + b_1 S_2) I_s^{b_2} [1 - \exp(-b_3 G^{b_4} A)]^{b_5}。 \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: G 和 M 分别为林分的断面积和蓄积, I_s 为地位指数, I_{SD} 为林分密度指数, A 为林分年龄, S_1 和 S_2 为间伐林分和未间伐林分的定性代码, $a_0 \sim a_5$, $b_0 \sim b_5$ 为模型的预估参数。

1.4 非线性度量误差联立方程组的建立

野外调查中, 无论是自变量还是因变量都存在一定误差, 且误差来源于许多方面, 如抽样误差、测量误差等。这些随机误差都被称为度量误差^[8]。采用度量误差模型来建立误差联立方程组, 使模型之间更具有相容性。公式如下^[21]:

$$\begin{cases} f(y_i, x_i, c) = 0 \\ Y_i = y_i + e_i, i = 1, 2, \dots, n \\ E(e_i) = 0, \text{cov}(e_i) = \sigma^2 \psi \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: x_i 是 q 维无误差变量的观测数据, y_i 是 p 维误差变量的观测数据, f 是 m 维向量函数, Y_i 是 y_i 的未知真值, 误差的协方差矩阵记为 $\Phi = \sigma^2 \psi$, ψ 是 e_i 的误差结构矩阵, σ^2 为估计误差。

以传统模型和哑变量模型为基础, 利用非线性度量误差方法分别联立式(1), 式(2)和式(3), 式(4)构成联立方程组, 以保证 $M-G$ 方程之间的相容性和一致性。基于传统方法的联立方程组形式如下:

$$\begin{cases} G=a_1I_S^{a_2}\{1-\exp[-a_3(I_{SD}/1\ 000)^{a_4}A]\}^{a_5} \\ M=b_1I_S^{b_2}[1-\exp(-b_3G^{b_4}A)]^{b_5} \end{cases} \quad (6)$$

基于哑变量方法的联立方程组如下：

$$\begin{cases} G=(a_0S_1+a_1S_2)I_S^{a_2}\{1-\exp[-a_3(I_{SD}/1\ 000)^{a_4}A]\}^{a_5} \\ M=(b_0S_1+b_1S_2)I_S^{b_2}[1-\exp(-b_3G^{b_4}A)]^{b_5} \end{cases} \quad (7)$$

1.5 参数估计与模型检验

利用 Forstat 2.0 软件求解参数，采用 Excel，SPSS 进行数据计算和模型检验。对所建传统模型和哑变量模型进行 t 检验，并通过平均绝对偏差(D_{MA})，均方根误差(E_{RMS})，决定系数(R^2)和预估精度(P)等几个指标对模型进行检验和比较。计算表达式如下：

$$D_{MA}=\sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i-\hat{y}_i}{n} \right|; \quad (8)$$

$$E_{RMS}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2}{n}}; \quad (9)$$

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

$$P=\left(\frac{t_{0.05} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i-\hat{y}_i)^2}{n(n-p)}}}{\hat{y}} \right) \times 100\% \quad (11)$$

式(8)~式(11)中： y_i 为断面积、蓄积的实测值， \hat{y}_i 为模型预估值， \hat{y} 为模型预估值的平均值， n 为样本数， p 为模型参数个数， $t_{0.05}$ 为置信水平为 0.05 时的 t 分布值。

2 结果与分析

通过 ForStat 软件中的非线性度量误差联立方程组求解林分蓄积、断面积生长模型的参数如表 3 所示，统计各评价指标结果如表 4 所示。

表 3 联立方程组参数统计

Table 3 Parameter statistics of simultaneous equations

项目	a_0/b_0	a_1/b_1	a_2/b_2	a_3/b_3	a_4/b_4	a_5/b_5
传统方法联立方程组						
林分断面积模型		0.924 0	0.681 0	0.011 2	0.630 6	1.365 9
林分蓄积模型		5.678 6	0.246 0	0.001 0	3.421 9	0.280 8
哑变量方法联立方程组						
林分断面积模型	0.879 8	0.867 9	0.595 7	0.015 3	0.676 0	1.456 2
林分蓄积模型	4.433 4	4.490 5	0.314 1	0.000 2	3.497 9	0.282 9

从表 4 可以看出：在传统方法的联立方程组中，林分断面积模型的决定系数为 0.849 6，林分蓄积模型的决定系数为 0.827 2，两者的预估精度都在 0.940 0 以上，说明 2 个模型的拟合效果均较好；而在含哑变量模型的联立方程组中，林分断面积生长模型的决定系数为 0.852 2，预估精度为 0.956 5，林分

表 4 联立方程组评价指标统计

Table 4 Evaluation indicators statistics of simultaneous equations

项目	R^2	D_{MA}	E_{RMS}	P
传统模型联立方程组				
林分断面积模型	0.849 6	0.160 0	0.204 5	0.945 7
林分蓄积模型	0.827 2	0.737 1	0.284 4	0.942 0
哑变量模型联立方程组				
林分断面积模型	0.852 2	0.142 0	0.200 6	0.956 5
林分蓄积模型	0.831 2	0.706 5	0.280 1	0.959 9

蓄积生长模型的决定系数为 0.831 2, 预估精度为 0.959 9, 相比较于传统方法而言, 含哑变量方法的林分断面积、蓄积生长模型的决定系数和预估精度都有所提高, 而且各项误差也相应减少了。这在一定程度上说明含哑变量方法的模型拟合效果比传统模型好。

利用检验数据分别对 2 种方法的断面积、蓄积联立方程组进行检验, 检验结果如表 5 所示。从表 5 可以看出: 传统方法与哑变量方法的预测精度都较高, 超过了 0.900 0, 就林分断面积而言, 传统方法的林分断面积模型的平均绝对偏差为 0.205 2, 均方根误差为 0.332 0, 决定系数为 0.900 1, 预测精度为 0.921 5; 含哑变量方法的林分断面积模型的平均绝对偏差为 0.201 2, 均方根误差为 0.288 1, 决定系数为 0.929 7, 预测精度为 0.939 8; 对于林分蓄积, 传统方法的林分蓄积模型的平均绝对偏差为 0.379 3, 均方根误差为 0.688 0, 决定系数为 0.912 3, 预测精度为 0.928 3; 含哑变量方法的林分蓄积模型的平均绝对偏差为 0.269 3, 均方根误差为 0.589 2, 决定系数为 0.932 8, 预测精度为 0.932 6。以上数据表明各项误差较小, 说明所建的林分断面积、蓄积量联立方程组是比较合理的。

表 5 误差变量方程组的检验

Table 5 Inspection of equations with error variables

项目	R^2	D_{MA}	E_{RMS}	P
传统方法的联立方程组 林分断面积模型	0.900 1	0.205 2	0.332 0	0.921 5
林分蓄积模型	0.912 3	0.379 3	0.688 0	0.928 3
含哑变量的联立方程组 林分断面积模型	0.929 7	0.201 2	0.288 1	0.939 8
林分蓄积模型	0.932 8	0.269 3	0.589 2	0.932 6

对模型进行成对 t 检验, 在 0.05 的显著水平上回归效果显著, 实测值与预测值之间无显著差异, 说明林分断面积、蓄积量的联立方程组预测效果较好, 采用度量误差方法建立的林分断面积、蓄积量误差联立方程组是比较合理的。进一步分析传统模型及哑变量模型联立方程组的断面积、蓄积残差可知: 绝大多数残差点都落在各自“残差平均值 \pm 2 倍标准差”之间, 残差分布无明显异质性, 说明模型的拟合效果较好, 而且在一定程度上也说明引入哑变量, 能适当提高模型的精度并能解决模型单独建模模型不相容的问题。

3 结论与讨论

为使林分断面积、蓄积量的预测结果保持一致, 预估精度更高, 本研究从模型相容的角度出发, 以北京地区油松一类清查数据为例, 采用度量误差方法分别建立了基于传统方法的林分断面积与林分蓄积联立方程组和基于哑变量方法的林分断面积、蓄积联立方程组, 并将两者进行对比。经检验, 2 种模型方法的林分断面积、蓄积模型的预测精度都较高, 超过了 90%。在林分断面积联立方程组中, 含哑变量方法的林分断面积模型的决定系数为 0.929 7, 预测精度为 0.939 8; 传统方法的林分断面积模型的决定系数为 0.900 1, 预测精度为 0.921 5。在林分蓄积量联立方程组中, 传统方法的林分蓄积模型的决定系数为 0.912 3, 预测精度为 0.928 3; 含哑变量方法的林分蓄积模型的决定系数为 0.932 8, 预测精度为 0.932 6。

从林分水平生长模型相容的角度出发, 引入间伐林分与未间伐林分的哑变量建立了林分断面积与蓄积的误差变量联立方程组。结果表明: 含哑变量方法的联立方程组的预测精度和确定系数较传统方法都稍高, 各项预测误差均稍小, 说明模型较合理, 使得林分断面积、蓄积量模型具有相容性和一致性。所建模型不仅考虑了抚育间伐措施对林分断面积、蓄积量生长的影响, 同时还考虑了林分断面积和林分蓄积之间的度量误差, 优化了模型结构, 减小了外业调查中的误差对预测结果的影响, 为从林分水平预测油松林分断面积和蓄积生长模型提供了参考和依据。

所建立的林分断面积与蓄积的误差变量联立方程组形式相对简单, 便于在林业实践中具体应用, 可以用来预测北京市油松人工林断面积、蓄积量的生长规律。但是, 本研究所使用的数据来源于 3 期不同时期的数据, 在建模过程中并未考虑时间效应的影响, 而且间伐与未间伐林分的实验数据有限。在后续研究中, 可收集更多实验数据, 同时考虑区域、时间和其他经营管理措施等因素, 采用混合模型的方法建模, 使得建模结构更加合理, 从而为油松林分的经营管理提供参考和依据。

4 参考文献

- [1] 赵俊卉. 长白山云冷杉混交林生长模型的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
ZHAO Junhui. *Growth Modeling for Spruce-Fir Forest in Changbai Mountains* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [2] 段爱国, 张建国, 孙洪刚, 等. 林分断面积生长模拟理论与技术研究[J]. 世界林业研究, 2013, **26**(2): 43 – 47.
DUAN Aiguo, ZHANG Jianguo, SUN Honggang, *et al.* Research progress of growth simulation theories and technologies for stand basal area [J]. *World For Res*, 2013, **26**(2): 43 – 47.
- [3] 张雄清, 张建国, 段爱国. 基于单木水平和林分水平的杉木兼容性林分蓄积量模型[J]. 林业科学, 2014, **50**(1): 82 – 87.
ZHANG Xiongqing, ZHANG Jianguo, DUAN Aiguo. Compatibility of stand volume model for Chinese fir based on tree-level and stand-level [J]. *Sci Silv Sin*, 2014, **50**(1): 82 – 87.
- [4] 邓静, 陈宇拓. 利用增长量分配模型的杉木林分生长预测建模[J]. 浙江农林大学学报, 2014, **31**(6): 898 – 904.
DENG Jing, CHEN Yutuo. Stand growth prediction based on a growth distribution model [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2014, **31**(6): 898 – 904.
- [5] 戎建涛, 刘殿仁, 林召忠, 等. 东北过伐林区主要森林类型林分蓄积量生长模型[J]. 林业科技开发, 2011, **25**(1): 30 – 34.
RONG Jiantao, LIU Dianren, LIN Zhaozhong, *et al.* Volume growth models of main forest types in over-logged forest region, Northeast China [J]. *China For Sci Technol*, 2011, **25**(1): 29 – 33.
- [6] 冉啟香, 邓华锋, 吕常笑, 等. 油松林分断面积与蓄积量生长模型研究[J]. 西北林学院学报, 2016, **31**(5): 217 – 223.
RAN Qixiang, DENG Huafeng, LÜ Changxiao, *et al.* Stand basal area and volume growth for *Pinus tabulaeformis* [J]. *J Northwest For Univ*, 2016, **31**(5): 217 – 223.
- [7] 高东启, 邓华锋, 程志楚, 等. 蒙古栎间伐林分 and 未间伐林分生长模型研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2014, **34**(2): 50 – 54.
GAO Dongqi, DENG Huafeng, CHENG Zhichu, *et al.* Study on growth models for thinned and un-thinned stands of *Quercus mongolica* [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2014, **34**(2): 50 – 54.
- [8] 蒋益, 邓华锋, 高东启, 等. 用度量误差模型方法建立油松树高曲线方程组[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(5): 126 – 129.
JIANG Yi, DENG Huafeng, GAO Dongqi, *et al.* Constructing height-diameter curve equations with measurement error models for Chinese pine stands [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(5): 126 – 129.
- [9] 李际平, 郭文清, 曹小玉. 基于非线性度量误差的马尾松相容性立木生物量模型[J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(6): 22 – 25, 32.
LI Jiping, GUO Wenqing, CAO Xiaoyu. Compatibility single-tree biomass model for *Pinus massoniana* stands based on nonlinear measurement error [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2013, **33**(6): 22 – 25.
- [10] 陈振雄, 贺东北, 丁长春. 利用度量误差模型方法建立海南省桉树、木麻黄、马占相思重量与材积相容性模型[J]. 中南林业调查规划, 2012, **31**(4): 5 – 9.
CHEN Zhenxiong, HE Dongbei, DING Changchun. Using error-in-variable modeling method to establish compatible weight and volume equations system for *Eucalyptus*, *Casuarina equisetifolia* and *Acacia mangium* in Hainan Province [J]. *Cent South For Inv Plann*, 2012, **31**(4): 5 – 9.
- [11] 高东启, 邓华锋, 程志楚, 等. 基于度量误差模型方法建立的林分相容性树高曲线方程组[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, **43**(5): 65 – 70.
GAO Dongqi, DENG Huafeng, CHENG Zhichu, *et al.* Measurement error model based compatible system of equations for height-DBH curve [J]. *J Northwest A&F Univ Nat Sci Ed*, 2015, **43**(5): 65 – 70.
- [12] 高云昌, 张文辉, 何景峰, 等. 黄龙山油松人工林间伐效果的综合评价[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(5): 1313 – 1319.
GAO Yunchang, ZHANG Wenhui, HE Jingfeng, *et al.* Effects of thinning intensity on *Pinus tabulaeformis* plantation

- in Huanglong Mountain Northwest China: a comprehensive evaluation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2013, **24**(5): 1313 – 1319.
- [13] 杜纪山, 唐守正. 林分断面积生长模型研究评述[J]. 林业科学研究, 1997, **10**(6): 599 – 606.
DU Jishan, TANG Shouzheng. The review of studies of stand basal area growth model [J]. *For Res*, 1997, **10**(6): 599 – 606.
- [14] 杜纪山, 唐守正. 杉木林分断面积生长预估模型及其应用[J]. 北京林业大学学报, 1998, **20**(4): 4 – 8.
DU Jishan, TANG Shouzheng. Basal area growth prediction of Chinese fir stands and its application [J]. *J Beijing For Univ*, 1998, **20**(4): 1 – 5.
- [15] 卢军, 张会儒, 李凤日. 大兴安岭天然林林分生长模型研究[J]. 林业资源管理, 2011(3): 33 – 36.
LU Jun, ZHANG Huiru, LI Fengri. Natural forest stand growth models for Daxing'anling Mountains [J]. *For Resour Manage*, 2011(3): 33 – 37.
- [16] 杜纪山, 唐守正, 王洪良. 天然林分生长模型在小班数据更新中的应用[J]. 林业科学, 2000, **36**(3): 52 – 58.
DU Jishan, TANG Shouzheng, WANG Hongliang. Application of natural stand growth models in subcompartment data update [J]. *Sci Silv Sin*, 2000, **36**(3): 52 – 58.
- [17] 贺姗姗. 北京山区油松人工林林分结构与生长模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
HE Shanshan. *Research on Structure and Growth of Pinus tabulaeformis Stands Simulation in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2009.
- [18] 韩文娟, 袁晓青, 张文辉. 油松人工林林窗对幼苗天然更新的影响[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(11): 2940 – 2948.
HAN Wenjuan, YUAN Xiaoqing, ZHANG Wenhui. Effects of gap size on seedling natural regeneration in artificial *Pinus tabulaeformis* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23**(11): 2940 – 2948.
- [19] 高东启. 北京市蒙古栎、油松林分生长预估模型研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
GAO Dongqi. *The Research of Stand Growth Forecast Models for Quercus mongolica and Pinus tabulaeformis in Beijing* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [20] 高东启, 邓华锋, 蒋益, 等. 油松林分断面积生长预估模型研究[J]. 西南林业大学学报, 2015, **35**(1): 42 – 46.
GAO Dongqi, DENG Huafeng, JIANG Yi, et al. Forecast models research of stands basal area growth for *Pinus tabulaeformis* [J]. *J Southwest For Univ*, 2015, **35**(1): 42 – 46.
- [21] 李永慈, 唐守正. 带度量误差的全林整体模型参数估计研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(1): 23 – 27.
LI Yongci, TANG Shouzheng. Parameter estimate of the whole stand model with measurement error [J]. *J Beijing For Univ*, 2006, **28**(1): 23 – 27.