

# 辽东山区日本落叶松生物量相容性模型的研究

黄兴召, 孙晓梅, 张守攻, 陈东升\*

(中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

**摘要:**基于 60 株辽东山区日本落叶松样木生物量的实测数据, 分析不同林龄条件下立木各部分生物量的变化情况, 并应用度量误差方法建立立木相容性生物量模型。结果表明: 树叶、树枝、树皮生物量占总生物量的比值随林龄增长呈下降趋势, 干材占总生物量的比值随林龄增长呈上升趋势。在筛选出总生物量与各分量最优独立模型的基础上, 应用三级控制的方法建立生物量相容性模型, 并采用加权回归方法消除总量和各分量模型的异方差。建立的总量、地上部分、树干、干材、树皮生物量模型, 其  $R^2$  均大于 0.9; 树根、树冠、树叶和树枝生物量的  $R^2$  略低, 介于 0.7~0.9 之间。通过独立样本对模型的相容性和预测精度进行检验, 各分量预测值所占总生物量的百分比之和为 1, 模型完全相容; 根、冠、叶和枝的模型预测精度略低于 90%, 其他部位模型的预测精度都在 95% 以上, 模型的预测精度较高。

**关键词:** 日本落叶松; 生物量; 度量误差模型; 相容性

中图分类号: S791.223

文献标识码: A

## Compatible Biomass Models for *Larix kaempferi* in Mountainous Area of Eastern Liaoning

HUANG Xing-zhao, SUN Xiao-mei, ZHANG Shou-gong, CHEN Dong-sheng

(Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

**Abstract:** Based on the biomass data of 60 sampling trees of *Larix kaempferi* in mountainous area of eastern Liaoning Province, the biomass of each component with different ages was analyzed. The compatible models for the biomass of whole tree and each component were established using non-linear error-in-variable modeling method. The results showed that the biomass ratio of needle, branch and bark dropped with stand age growth, but that of stem rose up with stand age growth. Based on the optimal model, the compatible models for whole tree, biomass and each component were established by three-step control programs, and the heteroscedasticity of the models for whole tree and components was eliminated with weighted regression. The determination coefficients of whole tree, above-ground, trunk, stem and bark biomass were higher than 0.9. The determination coefficients of root, crown, foliage and branch ranged from 0.7 to 0.9. From the model tested by independent samples, the sum of each component ratio was 1 and the model was totally compatible. The prediction precisions of root, crown, needle and branch were less than 90%, but the others were higher than 95%.

**Key words:** *Larix kaempferi*; biomass; error-in-variable model; compatibility

森林在减缓全球气候变化中发挥独特作用, 世界各国越来越重视对森林生物量的监测<sup>[1-2]</sup>, 即将在第八次全国森林资源清查中, 把“积极推进全国主

要树种生物量调查建模, 逐步构建全国森林生物量、碳储量监测的计量体系”作为一项主要任务。森林生物量是整个森林生态系统运行的能量基础和营养

收稿日期: 2013-03-27

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201104027)

作者简介: 黄兴召(1985—), 博士在读, 主要研究方向: 落叶松人工林生物量和碳储量. Email: xingzhaoh@163.com

\* 通讯作者: 博士, 助研, 主要研究方向: 落叶松培育和经营技术. Email: chengds@caf.ac.cn

物质来源,是研究生产力、净生产力、碳循环的基础。如何实现森林生物量的快速、高效估测,已成为全球研究的热点问题<sup>[3]</sup>。以往国内外生物量研究普遍采用总生物量和各分量(干、枝、皮、叶、根)分别单独建模的方法,即总量和各分量的计算都是独立进行,从而造成总生物量和各分量间不相容。近几年来,一些学者通过数学方法来解决此问题。骆期邦等<sup>[4]</sup>采用线性或非线性联立模型来解决分量与总量之间不相容问题;唐守正等<sup>[5]</sup>和胥辉等<sup>[6]</sup>通过比较5种非线性联合估计模型,提出了两级联合控制的方法;Parresol<sup>[7]</sup>采用非线性似乎不相关模型解决了非线性生物量方程的相容性问题;Bi等<sup>[8]</sup>建立了基于对数转换的相容性生物量模型,并采用似乎不相关方法对方程参数和偏差校正因子进行联合估计。落叶松作为我国东北地区的主要用材树种,许多学者对落叶松生物量也开展了大量研究,付尧等<sup>[9]</sup>建立了小兴安岭长白落叶松生物量相容性模型,董利虎等<sup>[10]</sup>建立了黑龙江省落叶松生物量相容性模型,曾伟生等<sup>[11]</sup>建立了东北地区落叶松生物量相容性模型,王宏全等<sup>[12]</sup>建立了北亚热带高山区日本落叶松生物量相容性模型;但是这些研究建立的生物量方程在应用上都有一定的局限性,基本上只适用于所采集数据区域,如果应用到其他地方,方程的预估精度会降低很多。另一方面,落叶松种间(日本落叶松、长白落叶松、兴安落叶松和华北落叶松)的生物量差异也非常明显,如果笼统的建立落叶松生物量方程,应用时将出现明显偏差。

辽宁省的辽东地区是我国日本落叶松的主要生长区域,其日本落叶松的面积达到30万 $\text{hm}^2$ <sup>[13]</sup>,但尚未见关于辽东山区日本落叶松生物量相容性模型的研究,因此,在该区域建立精度较高的生物量模型对于研究该地区的生产力、碳储量等有非常重要的意义。本文分析辽东山区日本落叶松不同林龄各分

量占总生物量比值的变化规律。在筛选出总生物量与各分量最优独立模型的基础上,利用非线性度量误差联立方程组建立以总生物量与地上部分、树根、树干、树冠、干材、树皮、树枝和树叶8个分量间相容性生物量模型,以期为辽东山区日本落叶松生物量的精确计算提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验林设在辽宁省清源县大孤家林场( $42^{\circ}16' \sim 42^{\circ}23' \text{N}$ ,  $124^{\circ}48' \sim 124^{\circ}55' \text{E}$ ),属中温带季风气候区。年均气温 $6^{\circ}\text{C}$ ,最低气温 $-30^{\circ}\text{C}$ ,最高气温 $34^{\circ}\text{C}$ 。全年无霜期128 d左右,年降水量650 mm。林地土壤为棕色森林土,土层厚达50 m, pH值为 $6.2 \sim 6.8$ 。

### 1.2 样地设置与生物量调查

本研究于2011年7—9月份,选择不同年龄序列(幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林)的典型日本落叶松人工林,设置 $0.08 \text{ hm}^2$ 的样地36块(表1)。在样地调查的基础上,各年龄段选取5块标准地,每块标准地选取优势木、标准木和劣势木各1株进行伐倒测量,共计60株样木。在生物量调查中,地上部分采用“分层切割法”测定样木的树干、树皮、树枝、树叶的鲜质量;地下部分采用全根挖掘法,分别测定大根( $\geq 5 \text{ cm}$ )、粗根( $2 \sim 5 \text{ cm}$ )、细根( $\leq 2 \text{ cm}$ )的鲜质量,并分别取样品测定。各器官分别取样后将样品带回实验室,在 $105^{\circ}\text{C}$ 下进行30 min的杀青处理,然后将烘箱的温度调到 $80^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒质量,测出各组分样品的含水率,然后根据样品含水率推算出各组分的生物量。

本文建模数据和检验数据采用3:1的比例,建模数据和检验数据均为随机抽样,其样木实测数据统计见表2。

表1 不同林龄日本落叶松人工林样地信息

林龄/a	样地数量	胸径/cm	树高/m	密度/(株· $\text{hm}^{-2}$ )	郁闭度	坡度/( $^{\circ}$ )	海拔/m
幼龄林(7)	9	$8.9 \pm 0.5$	$8.4 \pm 0.6$	$1771 \pm 322$	$0.6 \sim 0.8$	$5 \sim 18$	$343 \sim 421$
中龄林(16~17)	9	$10.1 \pm 0.5$	$10.7 \pm 0.8$	$1643 \pm 312$	$0.7 \sim 0.9$	$2 \sim 12$	$333 \sim 368$
近熟林(29~30)	9	$20.0 \pm 1.9$	$21.1 \pm 2.2$	$720 \pm 258$	$0.7 \sim 0.9$	$6 \sim 12$	$433 \sim 486$
成熟林(40~43)	9	$24.8 \pm 1.8$	$23.2 \pm 2.9$	$479 \pm 116$	$0.7 \sim 0.9$	$8 \sim 20$	$252 \sim 459$

表2 日本落叶松不同林龄样木的生物量

数据类型	样本	胸径/cm		树高/m		冠幅/m		总生物量/kg	
		均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围
建模数据	45	14.5	$5.7 \sim 28.2$	16.2	$7.5 \sim 28.8$	1.9	$0.9 \sim 3.6$	114.4	$5.2 \sim 457.7$
检验数据	15	14.1	$5.7 \sim 26.6$	16.1	$7.1 \sim 25.8$	1.8	$1.1 \sim 2.3$	111.0	$5.4 \sim 401.1$

### 1.3 研究方法

1.3.1 生物量总量和各分量的最优独立模型 在建立各分量与总量相容性生物量模型之前,需要建立各分量及总量的最优独立模型。生物量模型一般采用非线性结构形式:

$$y = aX_1^b X_2^c X_3^d \varepsilon$$

式中: $y$ 为立木总量与各分项目生物量, $X_1 \sim X_3$ 为自变量(胸径( $D$ )、树高( $H$ )、冠幅( $CW$ )), $a, b, c, d$ 为模型参数, $\varepsilon$ 为误差项。利用模型参数的 $p$ 值、决定系数 $R^2$ 、估计值的标准误差 $SEE$ 并考虑自变量个数以及在实际应用中的可操作性,综合选择来决定最优模型。

1.3.2 非线性度量误差联立方程组 总生物量应为各分量(干材、树皮、树枝、树叶和树根)之和,但由于自变量和因变量的测定值中都含有误差,导致单独建立生物量模型时各分量与总量不相容,与“各分量模型的预测值与总量模型的预测值相容”这一约束条件矛盾。非线性误差变量联立方程组可以很好地解决这一矛盾<sup>[14-18]</sup>。其一般形式如下:

$$\begin{cases} f(y_i, x_i, c) = 0 \\ Y_i = y_i + e_i, \quad i = 1 \rightarrow n \\ E(e_i) = 0, \quad Var(e_i) = \sigma^2 \Psi \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 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 $\sigma^2 \Psi$ , $\Psi$ 是 $e_i$ 的误差结构矩阵, $\sigma^2$ 为估计误差。

1.3.3 分级控制方案 本文采用分级控制方案,将总生物量分成地上、树根生物量进行一级控制。地上生物量再分为树冠和树干进行二级控制,树冠和树干又再分为干材、树皮、树叶、树枝4个分量进行三级控制,确保各级分量之和等于总量。为便于叙述,设 $f_0$ 、 $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 、 $f_5$ 、 $f_6$ 、 $f_7$ 和 $f_8$ 分别表示总量、地上部分、树根、树干、树冠、干材、树皮、树叶和树枝生物量独立模型, $w_0$ 为总生物量独立模型的估计值, $\hat{w}_i (i = 1 \rightarrow 8)$ 是经过联立估计后各个分量的估计值。

一级控制以地上部分和树根生物量的独立最优模型带入到一级控制联立方程组式(2)中:

$$\begin{cases} w_1 = \frac{f_1(x)}{f_1(x) + f_2(x)} \times w_0 \\ w_2 = \frac{f_2(x)}{f_1(x) + f_2(x)} \times w_0 \end{cases} \quad (2)$$

二级控制以 $w_1$ 地上部分生物量联合估计的参数值为基础,将树干和树冠生物量的最优独立模型

带入二级控制联立方程组式(3)中:

$$\begin{cases} w_3 = \frac{f_3(x)}{f_3(x) + f_4(x)} \times w_1 \\ w_4 = \frac{f_4(x)}{f_3(x) + f_4(x)} \times w_1 \end{cases} \quad (3)$$

三级控制以 $w_3$ 和 $w_4$ 为基础,将选取的干材、树皮、树叶和树枝生物量的最优独立模型分别带入式(4)和式(5):

$$\begin{cases} w_5 = \frac{f_5(x)}{f_5(x) + f_6(x)} \times w_3 \\ w_6 = \frac{f_6(x)}{f_5(x) + f_6(x)} \times w_3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w_7 = \frac{f_7(x)}{f_7(x) + f_8(x)} \times w_4 \\ w_8 = \frac{f_8(x)}{f_7(x) + f_8(x)} \times w_4 \end{cases} \quad (5)$$

生物量数据普遍存在异方差性,在非线形拟合过程中通常采取加权回归来消除异方差的影响<sup>[19-23]</sup>。本文根据最优独立模型的残差平方值和胸径进行回归分析,确定总量和各分量的权函数消除模型异方差。生物量建模及统计分析使用R2.14.0软件完成,其中相容性生物量模型使用其中的systemfit软件包进行拟合。

1.3.4 模型检验的统计评价指标 模型拟合结果采用决定系数( $R^2$ )、估计值的标准误差( $SEE$ )来评价;模型的检验采用预估精度( $PA$ )、平均偏差( $MB$ )和总相对误差( $TRE$ )来评价。各指标计算方法如下:

$$R^2 = 1 - RSS/TSS = 1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (6)$$

$$SEE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)} \quad (7)$$

$$PA = 1 - t_\alpha \times (SSE/\bar{y}) / \sqrt{n} \times 100 \quad (8)$$

$$MB = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (9)$$

$$TRE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \times 100 \quad (10)$$

式(6)~(10)中: $y_i$ 为实际观测值, $\bar{y}_i$ 为样本平均值, $\hat{y}_i$ 为模型预测值, $n$ 为样本数, $p$ 为参数个数, $RSS$ 为总平方和, $TSS$ 为残差平方和。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同林龄立木各分量生物量的变化规律

不同林龄立木的各分量占总生物量的比例为:

幼龄林为干材(37.7%) > 树枝(22.3%) > 树根(17.5%) > 树叶(11.8%) > 树皮(10.7%); 中龄林为干材(60.5%) > 树根(14.4%) > 树枝(10.8%) > 树皮(9.6%) > 树叶(4.7%); 近熟林为干材(67.1%) > 树根(15.7%) > 树皮(8.3%) > 树枝(6.8%) > 叶(2.1%); 成熟林为干材(68.2%) > 树根(17.2%) > 皮(7.2%) > 枝(5.7%) > 叶(1.7%) (图1)。随着林分年龄的增大各分量的生物量呈现不同的变化趋势,叶、枝、皮生物量占总生物量的比值随林龄增长呈下降的趋势;干材与之相反,随林龄增长,其比值呈上升的趋势;树根生物量占总生物量的比值在不同林龄之间变化规律不明显(图1)。

**2.2 日本落叶松总生物量和各分量最优模型的选取**

对日本落叶松总生物量及各分量生物量进行单独拟合,以胸径(*D*)、树高(*H*)、冠幅(*CW*)3个因子

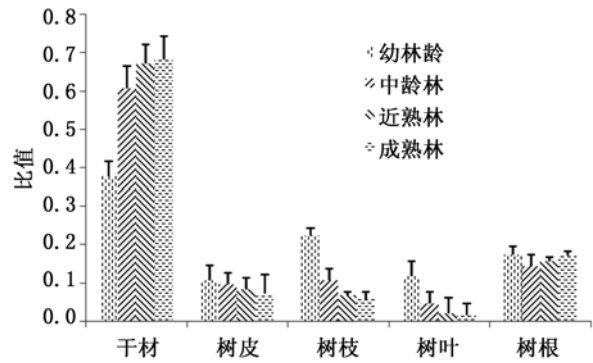


图1 日本落叶松人工林不同林龄立木各分量占总生物量比值的变化

作为自变量,建立预测模型。最终根据拟合结果筛选出总生物量、树根和树皮的最优模型为只包含胸径一个变量的一元方程,即  $y = aD^b$ ; 地上部分、树干、干材、树冠、树叶和树枝的生物量最优模型为胸径和树高的二元方程:  $y = aD^bH^c$  (表3)。

表3 日本落叶松人工林总量与各分量独立最优生物量模型的选取

组分	模型	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>SEE</i>	<i>P</i> 值			
				<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
总生物量	$y = aD^b$	0.985	15.21	<0.01	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.986	14.67	<0.01	<0.01	<0.05	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.987	12.93	<0.01	<0.01	<0.01	0.991
地上生物量	$y = aD^b$	0.985	11.72	<0.01	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.991	8.94	<0.01	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.991	8.88	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05
根生物量	$y = aD^b$	0.905	6.11	<0.05	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.911	5.89	0.159	<0.01	0.086	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.915	5.79	0.176	<0.01	<0.05	0.206
树干生物量	$y = aD^b$	0.975	13.93	<0.01	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.988	9.76	<0.01	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.988	9.74	<0.01	<0.01	<0.01	0.731
树冠	$y = aD^b$	0.674	5.34	0.136	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.772	4.46	<0.05	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.796	4.22	<0.05	<0.01	<0.05	<0.05
干材	$y = aD^b$	0.973	13.46	<0.01	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.986	9.49	<0.01	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.986	9.48	<0.01	<0.01	<0.01	0.776
树皮	$y = aD^b$	0.933	1.87	<0.01	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.937	1.81	<0.05	<0.01	0.095	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.938	1.81	<0.05	<0.01	0.205	0.571
树叶	$y = aD^b$	0.523	1.86	0.185	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.703	1.47	<0.05	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.777	1.27	<0.05	<0.01	<0.05	<0.01
树枝	$y = aD^b$	0.687	3.86	0.151	<0.01		
	$y = aD^bH^c$	0.753	3.42	<0.05	<0.01	<0.01	
	$y = aD^bH^cCW^d$	0.763	3.35	<0.05	<0.01	<0.05	<0.05

2.3 基于分级控制的相容性生物量方程

基于 45 株辽宁山区日本落叶松生物量的实测数据,将总量与各分量独立最优生物量模型应用分级控制法构建相容性生物量方程,并采用加权回归对总量和各分量的模型消除异方差(总量、地上、树根、树干、树冠、干材、树皮、树枝和树叶的权函数依次为  $1/D^{1.86}$ 、 $1/D^{1.56}$ 、 $1/D^{1.44}$ 、 $1/D^{1.65}$ 、 $1/D^{1.11}$ 、 $1/D^{1.65}$ 、 $1/D^{0.56}$ 、 $1/D^{0.23}$  和  $1/D^{0.96}$ )。结果如表 4 所示:总生物量、地上部分、树

干、干材的决定系数( $R^2$ )均大于 0.9,估计值的标准误差( $SEE$ )较小,介于 10.0~16.0 之间;树根、树冠、树叶和树皮的决定系数介于 0.7~0.94 之间,而且估计值的标准误差介于 1.0~7.0 之间。从相容性生物量模型预测的残差分布来看(图 2):总生物量和树根、干材、树皮、树枝、树叶的残差分布均匀,随着预测值的变化没有明显的规律性。从方程的统计指标和残差分布来看,方程的拟合效果较好。

表 4 日本落叶松总生物量及各分量的相容性生物量模型参数估计结果

分量	模型	参数值			统计指标	
		$r_1$	$r_2$	$r_3$	$R^2$	$SEE$
$W_1$ (地上部分)	$y = W_0 / (1 + r_1 DBH^2 H^3)$	0.473	1.025	-1.321	0.988	10.588
$W_2$ (树根)	$y = W_0 / (1 + 1/r_1 DBH^{-r_2} H^{-r_3})$	0.473	1.025	-1.321	0.889	6.625
$W_3$ (树干)	$y = W_1 / (1 + r_1 DBH^2 H^3)$	26.364	0.417	-2.184	0.986	10.616
$W_4$ (树冠)	$y = W_1 / (1 + 1/r_1 DBH^{-r_2} H^{-r_3})$	26.364	0.417	-2.184	0.756	4.622
$W_5$ (干材)	$y = W_3 / (1 + r_1 DBH^2 H^3)$	1.550	-0.307	-0.581	0.985	10.085
$W_6$ (树皮)	$y = W_3 / (1 + 1/r_1 DBH^{-r_2} H^{-r_3})$	1.550	-0.307	-0.581	0.933	1.891
$W_7$ (树叶)	$y = W_4 / (1 + r_1 DBH^2 H^3)$	0.837	-0.331	0.699	0.701	1.517
$W_8$ (树枝)	$y = W_4 / (1 + 1/r_1 DBH^{-r_2} H^{-r_3})$	0.837	-0.331	0.699	0.739	3.526
$W_0$ (总量)	$y = r_1 DBH^2$	0.178	2.351		0.985	15.469

2.4 模型检验

2.4.1 模型的相容性检验 应用随机抽取的 15 株日本落叶松样木对建立的分级控制相容性生物量模

型进行检验,各分量预测值所占总生物量的百分比之和为 1,模型完全相容(表 5)。

表 5 日本落叶松总生物量及各分量相容性模型的相容性检验

样木编号	胸径/cm	树高/m	各分量占总量的比值					总和
			树根	干材	树皮	树叶	树枝	
1	5.7	7.1	0.176	0.361	0.106	0.126	0.231	1
2	11.5	9.4	0.232	0.412	0.082	0.098	0.176	1
3	9.3	9.0	0.205	0.419	0.092	0.100	0.184	1
4	6.9	8.5	0.170	0.427	0.106	0.100	0.197	1
5	6.7	9.2	0.151	0.468	0.112	0.087	0.182	1
6	13.5	12.7	0.192	0.535	0.085	0.061	0.127	1
7	10.0	13.2	0.142	0.588	0.100	0.050	0.120	1
8	15.5	16.3	0.164	0.622	0.082	0.039	0.093	1
9	12.5	14.7	0.153	0.607	0.091	0.044	0.105	1
10	16.6	17.1	0.166	0.631	0.079	0.036	0.088	1
11	15.0	21.0	0.120	0.714	0.082	0.022	0.062	1
12	19.9	24.0	0.133	0.726	0.071	0.018	0.052	1
13	13.9	21.8	0.107	0.732	0.084	0.019	0.058	1
14	22.9	24.9	0.144	0.721	0.066	0.018	0.051	1
15	18.5	25.8	0.114	0.753	0.072	0.015	0.046	1

2.4.2 模型的预测精度检验 应用检验样本对模型预测精度进行检验,结果(6)表明:总生物量、地上部分、树干和干材生物量的预估精度( $PA$ )最高,均大于 96%;其次是树皮生物量预估精度,为 93.3%;树根、树冠、树叶和树皮生物量的预估精度最差,介于 85%~90% 之间。树皮和树叶的平

均偏差( $MB$ )和总相对误差( $TRE$ )为负,而其它分量为正,说明树皮和树叶的模型的预估值小于实际值,而其它分量的预估值大于实际值。总量和各分量的平均偏差和总相对误差均较小,说明模型可精确的预估总量和各分量的生物量(表 6)。

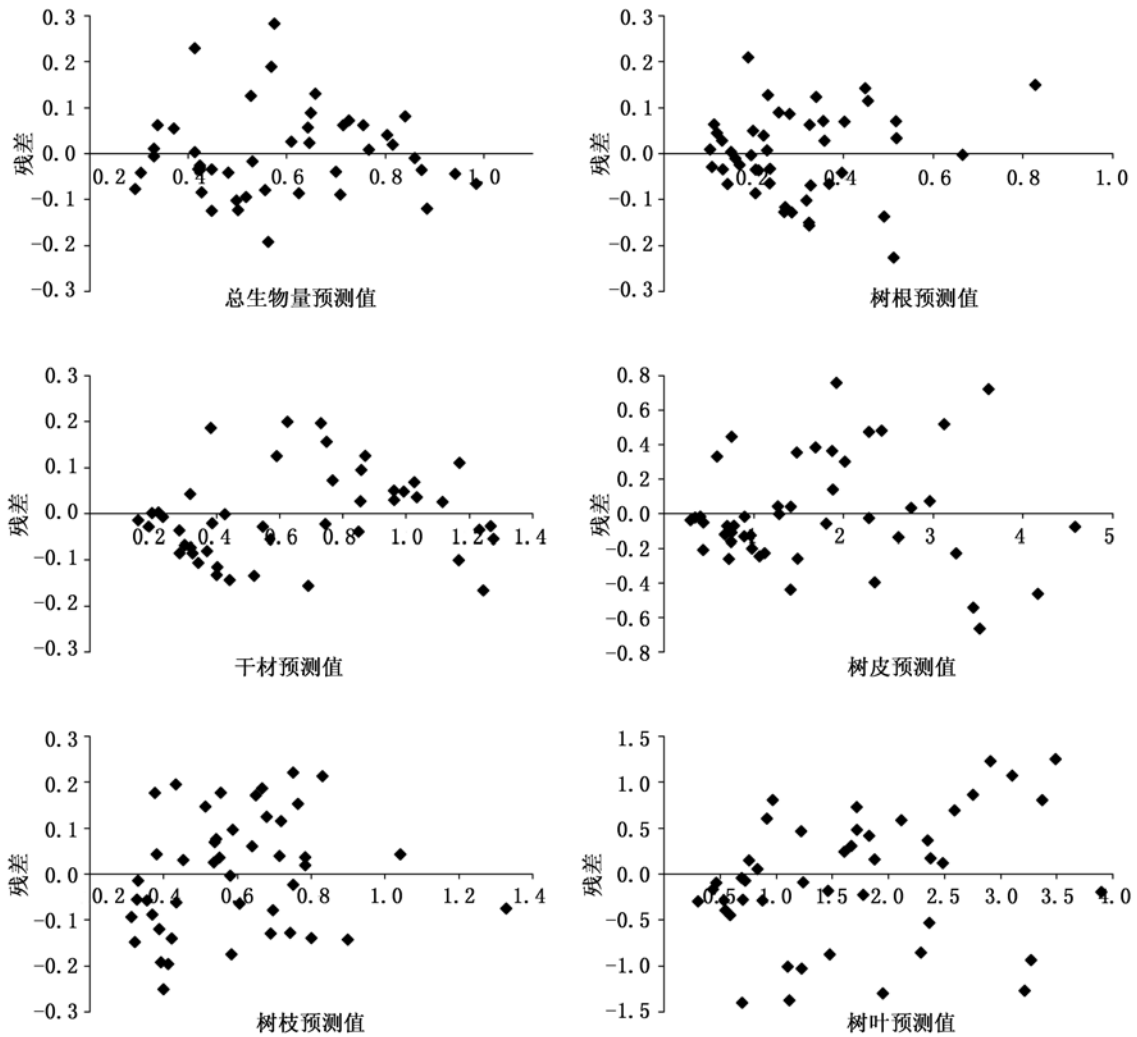


图2 日本落叶松总生物量和各分量的残差分布图

表6 日本落叶松总生物量及各分量相容性模型的预测精度检验

统计指标	总量	地上部分	树根	树干	树冠	干材	树皮	树叶	树枝
预估精度 (PA)/%	96.1	96.8	89.2	96.4	88.5	96.3	93.3	87.2	87.5
平均偏差 (MB)	3.527	4.773	0.675	4.523	0.761	1.525	-0.318	-0.303	0.470
总相对误差 (TRE)/%	3.3	3.6	9.3	3.5	4.1	2.9	-4.0	-9.4	6.1

### 3 结论

辽东山区日本落叶松不同林龄立木的叶、枝、皮生物量占总生物量的比值随林龄的增长呈下降趋势,干材与之相反,其比值随林龄的增长呈上升的趋势。这与王宏全<sup>[24]</sup>对北亚热带高山区日本落叶松及沈亚洲等<sup>[25]</sup>对甘肃小陇山日本落叶松的研究结果一致。

在利用度量误差方法建立的相容性模型中,总生物量、地上部分、树干、干材和树皮生物量的拟合效果较好,其决定系数均大于 0.9 且预估精度在

90% 以上;树根的决定系数接近 0.9 且预估精度也接近 90%;而树冠、树叶和树枝生物量模型的拟合效果最差,其决定系数介于 0.7~0.9 之间,预估精度介于 85%~90% 之间。这可能是因为外业样本的砍伐中容易造成树枝、树叶部分生物量的损失,且树冠生物量受树冠形状和树木长势的影响较大,因此,树冠、树枝和树叶生物量模型的拟合效果比其它分量差<sup>[9-11,25]</sup>,但从总体上来说,模型的拟合效果较好。应用独立样本数据对建立的模型进行检验,各分量预测值所占总生物量的百分比之和为 1,模型完全相容,且预测精度也在 90% 左右。因此该模型

可以用来精确估计辽东山区日本落叶松的生物量,而且模型只含有胸径和树高 2 个因子,在应用时简单且易于获取测定数据,因此,本文可为辽东山区日本落叶松生物量和碳储量的研究提供理论基础。

### 参考文献:

- [1] Tomppo E, Gschwantner T, Lawrence M, *et al.* National forest inventories: pathways for common reporting [M]. New York, USA: Springer, 2010:21-23
- [2] Bi H, Birk E, Turner J, Lambert M J, *et al.* Converting stem volume to biomass with additivity, bias corrections and confidence bands for two Australian tree species[J]. New Zealand Journal of Forest Research, 2001, 31(3):298-319
- [3] FAO. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress Towards Sustainable Forest Management. FAO Forestry Paper[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2006:12-13
- [4] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 等. 立木地上生物量模型的建立及其应用研究[J]. 自然资源学报, 1999, 14(3):271-277
- [5] 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
- [6] 胥 辉, 刘伟平. 相容性生物量模型的研究[J]. 福建林学院学报, 2001, 21(1):18-23
- [7] Parresol B R. Additivity of nonlinear biomass equations[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2001, 31:865-878
- [8] Bi H, Turner J, Lambert M J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia[J]. Trees, 2004, 18:467-479
- [9] 付 尧, 马 炜, 王新杰, 等. 小兴安岭长白落叶松相容性生物量模型的建立[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(7):42-45
- [10] 董利虎, 李凤日, 贾炜炜, 等. 含度量误差的黑龙江省主要树种生物量相容性模型应用[J]. 生态学报, 2011, 22(10):2653-2661
- [11] 曾伟生, 张会儒, 唐守正. 立木生物量建模方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011:10-12
- [12] 王宏全, 孙晓梅, 张灿明, 等. 北亚热带高山区日本落叶松林相容性生物量模型研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(2):131-138
- [13] 董文字. 辽宁省日本落叶松林分生长收获模型的研究和生长过程表编制的研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006:32-34
- [14] Tang S Z, Li Y, Wang Y H. Simultaneous equations, error-in-variable models, and model integration in systems ecology[J]. Ecological Modelling, 2001, 142(3):285-294
- [15] Tang S Z, Wang Y H. A parameter estimation program for the error-in-variable model[J]. Ecological Modelling, 2002, 156(2):225-236
- [16] 唐守正, 李 勇. 生物数学模型的统计学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002:6-12
- [17] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算 (ForStat 教程)[M]. 北京: 科学出版社, 2008:12-14
- [18] 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
- [19] 胥 辉. 生物量模型方差非齐性研究[J]. 西北林学院学报, 1999, 19(2):73-77
- [20] 张会儒, 唐守正, 胥 辉. 关于生物量模型中的异方差问题[J]. 林业资源管理, 1999(1):46-49
- [21] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 论加权回归与建模[J]. 林业科学, 1999a, 35(5):5-11
- [22] Parresol B R. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons [J]. Forest Science, 1999, 45(4):573-593
- [23] Parresol B R. Additivity of nonlinear biomass equations[J]. Can J For Res, 2001, 31:865-878
- [24] 王宏全. 基于标准地和遥感数据的北亚热带高山区日本落叶松林生物量研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010:36-39
- [25] 沈亚洲, 孙晓梅, 张江涛, 等. 甘肃小陇山林区日本落叶松人工林单木生物量研究[J]. 林业科学研究, 2011, 24(4):517-522