

DOI: 10.5846/stxb201303170438

高慧淋, 李凤日, 贾炜玮, 董利虎. 两种方法预估红松立木含碳量的精度. 生态学报, 2014, 34(24): 7365-7375.

Gao H L, Li F R, Jia W W, Dong L H. Evaluating prediction accuracy of two methods for tree carbon stocks of Korean pine plantation in Heilongjiang province, China. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(24): 7365-7375.

两种方法预估红松立木含碳量的精度

高慧淋, 李凤日*, 贾炜玮, 董利虎

(东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 森林碳储量是评价森林生态系统生态效益的重要指标, 准确估计立木各器官(树干、树枝、树叶和树根)含碳量是其基础。基于黑龙江省 44 株人工红松各器官生物量和含碳量的实测数据, 采用非线性联立方程组构建了相容性立木生物量和含碳量模型, 比较了两种方法(直接法和间接法)估计红松立木含碳量的精度。直接法是通过构建各器官相容性含碳量模型, 直接预估立木各器官含碳量。间接法是由各器官相容性生物量模型, 结合 3 种形式的含碳率(平均含碳率 0.5、林木实测平均含碳率, 各器官实测平均含碳率)来预估树木各器官含碳量。研究结果表明: 相容性生物量和含碳量模型的相关指数 R^2 为 0.76—0.99, 模型的拟合效率(EF)为 0.80—0.98。直接法中树干、树枝、树叶、树根和总量的含碳量预估精度分别为 91.03%、80.02%、70.24%、87.10%、93.08%; 间接法中采用平均含碳率 0.5 的预估精度与直接法相比, 各器官及总量分别下降 1.39%、1.5%、0.13%、1.09% 和 2.2%, 而采用另外两种形式的含碳率其预估精度降幅在 0.3% 以内。依据文中推导的相对误差积累公式可知, 间接法的预估精度主要与 $C_i\%/\bar{C}\%$ ($C_i\%$ 为单木各器官含碳率, $\bar{C}\%$ 为实测平均含碳率)有关。显然, 直接法是预估红松立木含碳量的最佳方法。通常使用的碳含量转换系数 0.5 与实测含碳率有明显差异, 因此间接法中采用 0.5 的含碳率其预估精度最低, 而使用各器官实测的含碳率可以明显提高预估精度。

关键词: 红松; 生物量; 含碳量; 非线性联立方程组; 相容性模型; 预估精度

Evaluating prediction accuracy of two methods for tree carbon stocks of Korean pine plantation in Heilongjiang Province, China

GAO Huilin, LI Fengri*, JIA Weiwei, DONG Lihu

College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: Forest carbon stock is an important indicator for evaluating the ecological benefits of forest ecosystem. Thus, accurately estimating the carbon stocks for the different components (i.e. stem, branches, foliages, and roots) of individual trees is essential and necessary. In this study, a total of 44 Korean pine (*Pinus koraiensis*) trees were sampled from the plantations in Heilongjiang province, China. The biomass and carbon stocks data were collected for different tree components. Based on the theory of non-linear simultaneous equations, the compatible models of the biomass and carbon stocks were developed for the whole tree and each tree component (i.e. stem, branches, foliages, and roots) by using the proc model procedure of SAS9.22 software to estimate the model coefficients. The prediction accuracy of two methods (i.e., direct and indirect methods) for predicting the Korean pine carbon stocks was compared. The direct method directly predicted the carbon stocks of the tree components using the developed compatible models of carbon stocks. The indirect method predicted the carbon stocks in two steps: (1) predicting the biomass of the tree components using the developed compatible models of biomass, and (2) multiplying the estimated biomass by carbon content percentages to obtain the carbon stocks. Three kinds of carbon content percentages were used (a) the carbon content conversion factor 0.5 commonly

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201204320); 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1054)

收稿日期: 2013-03-17; **网络出版日期:** 2014-03-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: fengrili@126.com

used in the literature over the past decades; (b) the average carbon content percentage of individual trees measured from the sampled trees; and (c) the average carbon percentages of tree components measured from the sampled trees. The results indicated that the coefficients of determination (R^2) of both compatible biomass and carbon stocks models ranged 0.76—0.99, and the modeling efficiency (EF) of the two models were 0.80—0.98. The prediction accuracy of carbon stocks by the direct method was 91.03% for stem, 70.24% for foliages, 80.02% for branches, 87.10% for roots, and 93.08% for total, respectively. In comparison, the prediction accuracy of the indirect method using the common carbon content conversion factor 0.5 decreased 1.39% for stem, 0.13% for foliages, 1.5% for branches, 1.09% for roots, and 2.2% for total amount, respectively. On the other hand, the indirect method using the measured carbon content percentages reduced the prediction accuracy within 0.3% for each tree component and the total. We also investigated the error sources for predicting carbon stocks and found that the prediction accuracy was mainly dependent on the factor of $C_i\%/\bar{C}\%$ (where $C_i\%$ represents the carbon content percentage of tree components and $\bar{C}\%$ is the average carbon content percentage of individual trees). It was evident that the direct method was the best for predicting the tree carbon stocks of Korean pine. The commonly used carbon content conversion factor 0.5 was significantly different from the measured carbon content percentages. Thus, the indirect method using the factor 0.5 performed poorly for predicting the carbon stocks, while using the measured carbon content percentages of tree components as the indirect method would greatly improve the prediction accuracy. The results of this study will provide basic models and direct method to predict carbon stocks of stand or large scale forest for Korean pine plantation.

Key Words: Korean pine (*Pinus koraiensis*); biomass; carbon stocks; non-linear simultaneous equations; compatible model; prediction accuracy

森林作为陆地生态系统的主体,具有“碳源”和“碳汇”的双重功能,特别是“碳汇”功能在缓解气候变暖方面具有重要作用^[1-2],有效估计立木各器官的含碳量是研究森林“碳汇”的基础。

以往森林“碳汇”的研究主要是通过估算森林生物量并结合平均碳转换系数来进行的。李意德等^[3]以海南岛尖峰岭热带林生态系统定位研究站多年来的研究作为基本数据,分别用两种方法(生物量法和蓄积量法)和用一种方法(蓄积量法)计算了海南岛和云南南部热带森林的C素总量。刘国华等^[2]利用我国第一次至第四次森林资源清查资料,基于平均含碳量转换系数0.5对我国近20年来森林的碳储量进行了推算。孙玉军等^[4]、鲍春生^[5]也做过类似的研究。Návar^[6]基于生物量的估计用含碳量转换系数0.5对墨西哥西北部森林的碳储量进行了研究,Gil等^[7]以及Zabek等^[8]在估算森林碳储量时也采用了平均含碳量转换系数。这些研究主要是利用森林资源清查体系在生物量估计基础之上来预测森林碳储量^[9]。存在的问题是,采用平均含碳量转换系数0.5造成的误差尚不清楚,也没有对单木的含碳量预测进行系统的研究。

关于相容性模型的研究,张会儒等^[10]提出了与材积兼容的生物量相容性模型,唐守正等^[11]建立了以非线性联合估计为基础的生物量相容性模型,相容性模型在预估林木生物量方面已经得到普遍的应用。但是,采用相容性模型预估立木含碳量的研究甚少。

本研究采用直接法和间接法对黑龙江省人工红松各器官含碳量进行估计。直接法是采用非线性联立方程组构建各器官(树干、树枝、树叶、树根)相容性含碳量模型来预估立木各器官的含碳量;间接法是通过建立各器官的生物量相容性模型,并结合3种形式的碳转换系数来估计各器官含碳量。通过分析间接法预估各器官含碳量的误差,比较了直接法和间接法的精度差异,并分析了产生误差的原因。

1 研究地概况与研究方法

1.1 研究地概况

研究地区位于黑龙江省(43°25′—53°33′N, 121°11′—135°05′E)的完达山、小兴安岭北坡、小兴安岭南坡、张广才岭东坡和张广才岭西坡。根据中国第七次森林资源清查报告,黑龙江省森林面积

1927 万 hm^2 , 森林覆盖率达 42.4%。该地区属于中温带到寒温带的大陆性季风气候, 冬季长而寒冷, 夏季短而凉爽, 南北温差大, 北部甚至长冬无夏。年均气温在 $-4\sim 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 气温由东南向西北逐渐降低, 南北温差近 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年降水量平均为 $450\sim 700\text{ mm}$, 无霜期在 $100\sim 160\text{ d}$ 之间, $\geq 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 积温多介于 $2000\sim 2800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。暗棕壤为黑龙江省山地主要土壤。黑龙江省林区森林大多属于由温带湿润针阔叶混交林退化而形成的阔叶混交林和阔叶树种纯林, 针叶林、针叶混交林和阔叶混交林极少。全省红松人工林面积为 $35\text{ 万 }\text{hm}^2$, 占全省人工林总面积的 9%。

红松 (*Pinu koraiensis*) 为我国东北东部地区地带性顶极群落建群种, 主要分布于小兴安岭、张广才岭和完达山一带^[12], 是目前东北各地分布较广的主要造林树种之一。红松不仅具有很好的工业用途, 其果实还具有相当高食用、药用价值。红松分布区土壤为暗棕色森林土, 自然条件符合红松生态学特性的要求^[13]。

1.2 数据收集与处理

本文数据来源于黑龙江省小兴安岭、张广才岭和完达山区域, 数据采集地点为桦南县、庆安县、鸡东县、阿城区和勃利县。2009 年在 5 个县市分别设置 0.27 hm^2 样地 7 块, 对各样地进行每木检尺, 按 2 cm 径阶统计后, 采用等断面积径级标准木法将样地中全部林木分为 5 级, 每级选择 1 株林木, 此外再选取 1 株优势木, 作为树干解析和生物量样木。本研究共获取 44 株人工红松生物量和含碳量测定样木。

每一株样木从根部伐倒后, 将树冠分成 3 层, 称量每层所有活枝鲜重, 每一层分别选取中等大小的 6 枝树枝作为标准枝。将标准枝枝叶分离后, 分别记

录其鲜重; 树干部分按照 1 m 段进行截断, 不足 1 m 部分为梢头, 记录每一段鲜重。在靠近树干每一段下端部分和胸径处截取圆盘。树根采用“全挖法”, 按照大于 5 cm 、 $2\sim 5\text{ cm}$ 和小于 2 cm 分成 3 组, 分别记录鲜重。

以上每一层已经分离枝叶的标准枝的枝、叶和 3 个部分的树根, 分别取 100 g 左右作为样品, 记录鲜重, 胸径处圆盘也取 1 块样品, 记录鲜重。所有样品在烘箱 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干至恒重, 记录干重。每一部分求出干重/鲜重比例, 从而推算立木的树干、树枝、树叶和树根的生物量。将已经烘干的树冠的 3 层树叶、树枝、3 部分根样品和胸径处的干样品用打磨机磨碎, 分别取 50 mg 左右, 进行处理后用 C/N 分析仪测量含碳率, 进而根据比例推算出树干、树枝、树叶和树根的含碳量。

本文各个部分含碳率的处理方法是: 用胸径处样品树皮、边材和心材的平均含碳率作为树干的含碳率, 上枝、中枝和下枝的平均含碳率作为树枝的含碳率, 上叶、中叶和下叶的平均含碳率作为树叶的含碳率, 树根则是分大于 5 cm 、 $2\sim 5\text{ cm}$ 和小于 2 cm 3 个部分分别计算含碳率, 最后平均得到树根的含碳率。计算所有样木各器官的含碳率的平均值即得到该器官的平均含碳率, 单木的含碳率是各个器官的加权平均含碳率, 权数即各个器官的生物量占单木总生物量的百分比, 进而单木的平均含碳率是所有样木含碳率的平均值。

将全部 44 株人工红松样木按 3:1 的比例随机划分为建模数据和检验数据, 其各调查因子统计量详见表 1, 各器官含碳率数据详见表 2。

表 1 人工红松样木生物量和含碳量统计表

Table 1 Descriptive statistics of model fitting and validation data sets for Korean pine plantation

因子 Attribute	拟合数据 Fitting data ($n=33$)			检验数据 Validation data ($n=11$)		
	最小值	最大值	平均值 $\pm$ 标准差	最小值	最大值	平均值 $\pm$ 标准差
	Min	Max	Mean $\pm$ Std	Min	Max	Mean $\pm$ Std
胸径 Diameter /cm	4.8	47.0	19.70 ± 9.1	9.5	25.0	16.30 ± 4.5
树高 Height/m	4.7	19.6	12.30 ± 3.7	8.2	14.6	12.10 ± 2.1
生物量总量 Total biomass/kg	11.55	1314.28	202.09 ± 241.92	19.7	282.43	104.36 ± 78.27
含碳量总量 Total carbon content/kg	5.67	642.27	98.47 ± 118.70	9.23	134.65	49.85 ± 37.70

1.3 研究方法

1.3.1 相容性生物量和含碳量模型的构建

相对生长 (CAR) 模型^[14-20]具有结构简单、稳定

性好的特点。因此, 本研究采用 CAR 模型为基础构建一元相容性生物量和含碳量预估模型, 其形式为:

$$y = aD^b \quad (1)$$

表2 人工红松各器官含碳率统计表

Table 2 Descriptive statistics of carbon content percentages for tree components of Korean pine plantation ($n=44$)

各分量 Components	树干 Stem	树枝 Branch	树叶 Foliage	树根 Root	全树 Total
最小值 Min/%	44.42	45.32	44.24	43.18	43.18
最大值 Max/%	55.78	53.85	52.22	62.43	62.43
平均值 Mean/%	47.70	49.04	49.33	48.27	48.11
标准差 Std	2.03	1.79	1.69	2.80	1.80
95%置信区间下限 Lower 95% C.I./%	47.38	48.51	48.81	47.42	47.56
95%置信区间上限 Upper 95% C.I./%	48.32	49.59	49.84	49.12	48.66

式中, y 为树木各器官的生物量和含碳量; D 为胸径; a 和 b 为参数。

依据唐守正等^[21-23]和李凤日等^[24]研究成果,本

文构建的红松各器官(树干、树枝、树叶和树根)相容性生物量模型的具体形式即为(2)式:

$$\begin{cases} W_s = c_{w0} D^{b_{w0}} / (1 + r_{w1} D^{k_{w1}} + r_{w2} D^{k_{w2}} + r_{w3} D^{k_{w3}}) \\ W_b = c_{w0} r_{w1} D^{k_{w1} + b_{w0}} / (1 + r_{w1} D^{k_{w1}} + r_{w2} D^{k_{w2}} + r_{w3} D^{k_{w3}}) \\ W_l = c_{w0} r_{w2} D^{k_{w2} + b_{w0}} / (1 + r_{w1} D^{k_{w1}} + r_{w2} D^{k_{w2}} + r_{w3} D^{k_{w3}}) \\ W_r = c_{w0} r_{w3} D^{k_{w3} + b_{w0}} / (1 + r_{w1} D^{k_{w1}} + r_{w2} D^{k_{w2}} + r_{w3} D^{k_{w3}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中,单木生物量总量的表达式为

$$W_t = W_s + W_b + W_l + W_r = c_{w0} D^{b_{w0}}$$

式中, W_s 、 W_b 、 W_l 、 W_r 、 W_t 分别代表林木树干、树

枝、树叶、树根和总量的生物量; b_{w0} 、 c_{w0} 、 r_{w1} 、 r_{w2} 、 r_{w3} 、 k_{w1} 、 k_{w2} 、 k_{w3} 为待估参数, D 为胸径。

同理,相容性含碳量模型的具体形式为(3)式。

$$\begin{cases} C_s = c_{c0} D^{b_{c0}} / (1 + r_{c1} D^{k_{c1}} + r_{c2} D^{k_{c2}} + r_{c3} D^{k_{c3}}) \\ C_b = c_{c0} r_{c1} D^{k_{c1} + b_{c0}} / (1 + r_{c1} D^{k_{c1}} + r_{c2} D^{k_{c2}} + r_{c3} D^{k_{c3}}) \\ C_l = c_{c0} r_{c2} D^{k_{c2} + b_{c0}} / (1 + r_{c1} D^{k_{c1}} + r_{c2} D^{k_{c2}} + r_{c3} D^{k_{c3}}) \\ C_r = c_{c0} r_{c3} D^{k_{c3} + b_{c0}} / (1 + r_{c1} D^{k_{c1}} + r_{c2} D^{k_{c2}} + r_{c3} D^{k_{c3}}) \end{cases} \quad (3)$$

式中,单木生物量总量的表达式为

$$C_t = C_s + C_b + C_l + C_r = c_{c0} D^{b_{c0}}$$

式中, C_s 、 C_b 、 C_l 、 C_r 、 C_t 分别代表树干、树枝、树叶、树根和总量的含碳量, b_{c0} 、 c_{c0} 、 r_{c1} 、 r_{c2} 、 r_{c3} 、 k_{c1} 、 k_{c2} 、 k_{c3} 为待估参数,其它符号与上相同。

采用 SAS 9.22 中的 GMM (general moment of method) 方法对模型(2)和(3)的参数

进行联合估计。

1.3.2 异方差消除

生物量数据普遍存在异方差,同理含碳量数据也是如此。目前针对异方差的消除,已经取得了许多成果^[12,15]。对于非线性方程当前很多学者普遍采用的方法是进行对数变换和加权回归。由于(2)、(3)式的复杂性,无法通过对数变换转化成线性形式,因此本文采用方程两边同时乘以权函数的方法。本文权函数主要是参考通用权函数 $W=1/f(x)$ 的形

式,依据每一个模型的残差结构而确定。即方程的两边同时乘以权函数 $W=1/D^x$,即给予胸径较大的样木以较小的权重,胸径较小的样木以较大的权重。

1.3.3 模型评价指标

本文采用 5 个指标对模型拟合和检验评价,即均方根误差 (RMSE)、平均相对偏差 (ME%)、平均相对偏差绝对值 (MAE%)、拟合效率 (EF)、预估精度 (P)。具体见文献^[25-26]。

1.3.4 间接法预估单木各器官含碳量的误差来源

间接法是由各器官相容性生物量模型(2式),结合 3 种形式的含碳率(平均含碳率取 0.5;林木实测平均含碳率;各器官实测平均含碳率)来预估树木各器官含碳量。根据间接法的计算过程,进行误差积累的公式推导,并以此为依据研究与直接建立的含碳量模型的预测精度的差别。

下面以树干含碳量为例进行推导。依据模型预

估精度公式可知,相对误差为:

$$\varepsilon = \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{n(n-p)}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

式中, ε 表示为预测相对误差, n 为检验样本数, y_i 为树干的含碳量实测值, $\hat{y}_i$ 为树干含碳量的估计值, $\hat{y}$ 为含碳量估计值的平均值, t 为双尾检验时的 t 值, p 为变量个数。

所以,由(4)式可将含碳量的误差公式可以写成

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{n(n-p)}} \sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{W}_i \times \bar{C}\%)^2} = t_{\alpha/2} \times \frac{n}{\sqrt{n(n-p)}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{C_i - \hat{W}_i \times \bar{C}\%}{\bar{C}\%} \right)^2} \times \frac{1}{\sum_{i=1}^n \hat{W}_i} \\ &= \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{n(n-p)}} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(W_i \times \frac{C_i\%}{\bar{C}\%} - \hat{W}_i \right)^2} \times \frac{1}{\hat{W}} \end{aligned} \quad (6)$$

式中, C_i 为树干含碳量实测值; $\hat{C}_i$ 为树干含碳量预估值; $\hat{C}$ 为树干含碳量预估值值的平均值; $C_i\%$ 为树干的实测含碳率; $\bar{C}\%$ 为树干的实测平均含碳率; W_i 为树干生物量的实测值 ($i=1, \dots, n$, 下同); $\hat{W}_i$ 为树干生物量的预估值; $\hat{W}$ 为树干生物量预估值值的平均值。

由(6)式可知,间接法含碳量的预估误差的来源与生物量的估计和各器官各自的平均含碳率有关。

直接法中影响含碳量预估精度取决于模型拟合优度。而间接法有两个过程,首先是建立各器官的相容性生物量模型,这个过程中模型会有误差,第二个过程用估算出的生物量乘以平均含碳率来估计含碳量也可能会有误差。间接法中误差公式(6)很明

如下形式:

$$\varepsilon = \frac{t_{\alpha/2}}{\sqrt{n(n-p)}} \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (C_i - \hat{C}_i)^2}}{\hat{C}} \quad (5)$$

根据间接法计算过程,各个器官的含碳量预测值等于生物量的估计值乘以相应的实测平均含碳率。由(5)式可得,由各器官相容性生物量模型和含碳率间接估计各器官含碳量的相对误差公式为:

确的表达出了误差传递的过程。不妨定义 $C_i\%/\bar{C}\%$ 间接法第二个过程误差积累的影响因子。如果去掉该因子,那么误差公式(6)就变成了生物量模型的预估误差。

2 结果分析

2.1 红松人工林相容性生物量和含碳量模型的建立

利用模型(2)和(3)分别对人工红松各器官生物量与含碳量进行拟合,模型参数的估计结果见表3和表4。

分别利用人工红松林木生物量和含碳量独立检验样本对相容性生物量和含碳量模型进行检验,两模型的拟合优度和检验结果见表5。

表3 人工红松立木相容性生物量模型(2)参数估计结果

Table 3 Model coefficient estimates of compatible models (eq. (2)) of tree biomass for Korean pine plantation ($n=33$)

模型参数 Model Coefficients	c_{w0}	b_{w0}	r_{w1}	r_{w2}	r_{w3}	k_{w1}	k_{w2}	k_{w3}
参数估计值 Coefficient estimate	0.101476	2.444062	0.081341	0.29581	0.178589	0.367342	-0.24807	0.248521
标准误 Standard error	0.0256	0.0735	0.0639	0.1723	0.1705	0.0559	0.1814	0.0941
t 检验 t -test	3.97	33.27	1.97	1.72	1.05	1.94	-1.37	2.85
P	0.0004	<.0001	0.0127	0.0959	0.3029	0.0412	0.1814	0.0045

c_{w0} , b_{w0} , r_{w1} , r_{w2} , r_{w3} , k_{w1} , k_{w2} , k_{w3} 分别代表人工红松立木相容性生物量模型(2)的各个参数,其中参数的下标 w 代表生物量模型

表 4 人工红松立木相容性含碳量模型 (3) 参数估计结果

Table 4 Model coefficient estimates of compatible models (eq. (3)) of tree carbon stocks for Korean pine plantation (n=33)								
模型参数 Model Coefficients	c_{c0}	b_{c0}	r_{c1}	r_{c2}	r_{c3}	k_{c1}	k_{c2}	k_{c3}
参数估计值 Coefficient estimate	0.046166	2.46484	0.079578	0.306026	0.159188	0.382041	-0.24832	0.293501
标准误 Standard error	0.0116	0.0728	0.0411	0.1801	0.1485	0.2494	0.1836	0.0864
t 检验 t-test	3.99	33.86	1.99	1.7	1.07	1.98	-1.35	3.02
P	0.0004	<.0001	0.0106	0.0993	0.292	0.0357	0.186	0.0033

c_{c0} , b_{c0} , r_{c1} , r_{c2} , r_{c3} , k_{c1} , k_{c2} , k_{c3} 分别代表人工红松立木相容性含碳量模型的各个参数,其中参数的下角标 c 代表含碳量模型

表 5 人工红松立木生物量和含碳量相容性模型拟合优度和检验结果

Table 5 Model fitting and validation statistics of biomass and carbon stocks for Korean pine plantation							
模型 Model	器官 Organ	拟合优度 Goodness of fit		检验结果 Validation result			
		相关指数 Coefficient of determination R^2	均方根误差 Root of mean square error RMSE/kg	拟合效率 Modeling efficiency EF	平均相对误差绝对值 Mean Absolute Percent Error MAE/%	平均相对误差 Mean Percent Error ME/%	精度 Precision P/%
相容性生物量模型 Compatible biomass model	树干	0.869	10.14	0.96	14.47	-2.69	91.04
	树枝	0.766	3.23	0.82	20.71	-15.32	80.01
	树叶	0.763	1.17	0.80	20.90	-14.72	71.06
	树根	0.823	1.34	0.94	28.01	-13.72	87.08
	总量	0.987	-	0.98	11.61	-5.82	93.10
相容性含碳量模型 Compatible carbon content model	树干	0.882	4.70	0.96	14.77	-4.47	91.03
	树枝	0.768	1.60	0.82	22.12	-14.25	80.02
	树叶	0.757	0.59	0.80	21.21	-15.02	70.24
	树根	0.825	0.68	0.95	28.24	-13.77	87.10
	总量	0.984	-	0.98	11.83	-7.24	93.08

由表 5 可知,相容性生物量和含碳量模型各个器官的 R^2 值都在 0.75 以上,其中总量、树干、树根的 R^2 值均在 0.82 以上。相容性生物量和含碳量模型经过异方差处理后(图 1 和图 2),均方根误差(RMSE)都较小,但以树干的比较大,树叶和树根的都比较小。两模型的各器官的平均相对误差绝对值(MAE%)都在±30%之内,树干和总量在±15%以内。平均相对误差(ME%)都在±15%以内,树干和总量均在±8%之内。各器官和总量拟合效率 EF 都在 0.8 以上。总体来说,所构建的相容性生物量和含

碳量模型能够较好的估计人工红松各器官及总量的生物量和含碳量。此外,从预估精度来看,生物量模型和含碳量模型之间几乎没有差别,这就说明间接法第一阶段即生物量模型的拟合过程所产生的误差与直接法的误差基本相同。同时说明,如果间接法较直接法产生较大的误差,那么误差来源于间接法的第二阶段即乘以平均的含碳率。

2.2 直接法与间接法精度对比

直接法和间接法的含碳量预估精度详见表 6。

表 6 直接法和间接法预估含碳量精度对照表

Table 6 Prediction accuracy of tree carbon stocks by the direct and indirect methods						
方法 Method	间接法采用含碳率形式 Carbon stock percentage type used in indirect method	树干 Stem/%	树枝 Branch/%	树叶 Foliage/%	树根 Root/%	总量 Total/%
直接法 Direct method		91.03	80.02	70.24	87.10	93.08
间接法 Indirect method	a	89.64	78.52	70.11	86.01	90.88
	b	90.79	78.94	70.11	87.08	92.67
	c	90.85	79.96	70.14	87.04	92.69

表中 a 表示间接法各器官均采用含碳率 0.5, b 表示采用单木的实测平均含碳率, c 表示采用各器官各自的实测平均含碳率

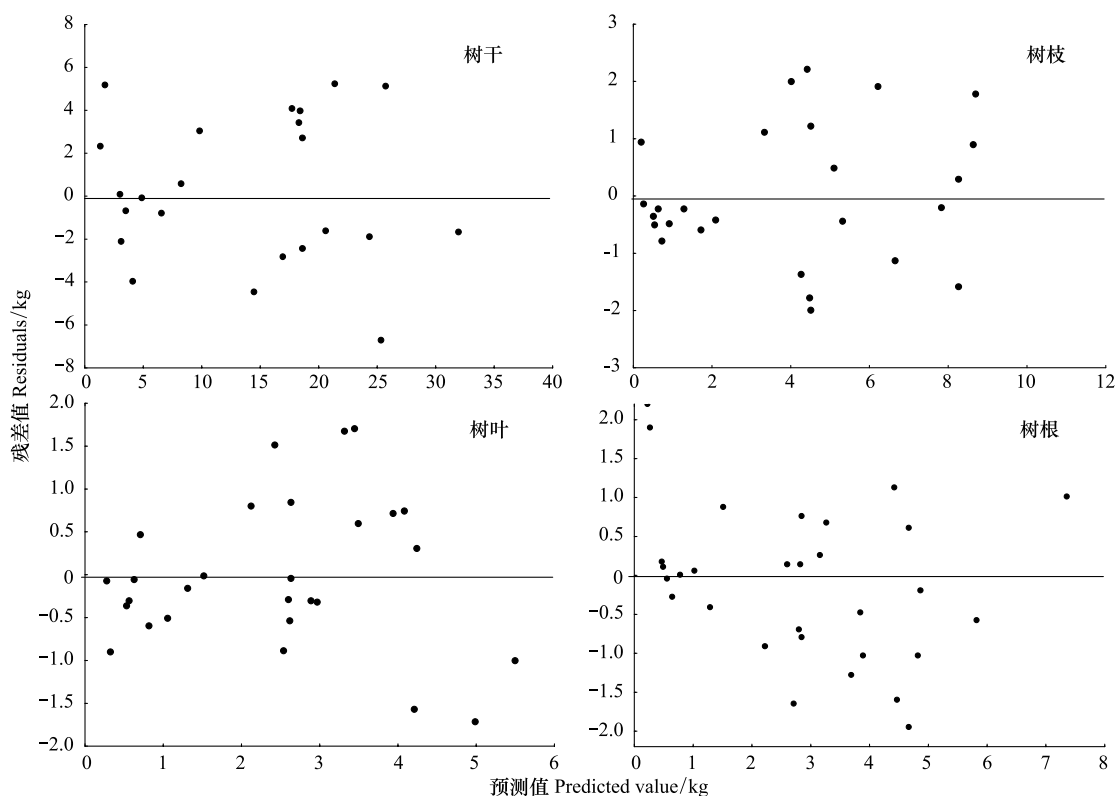


图1 生物量相容性模型各个器官残差分布图

Fig.1 Residual plots of the compatible biomass model for each tree component

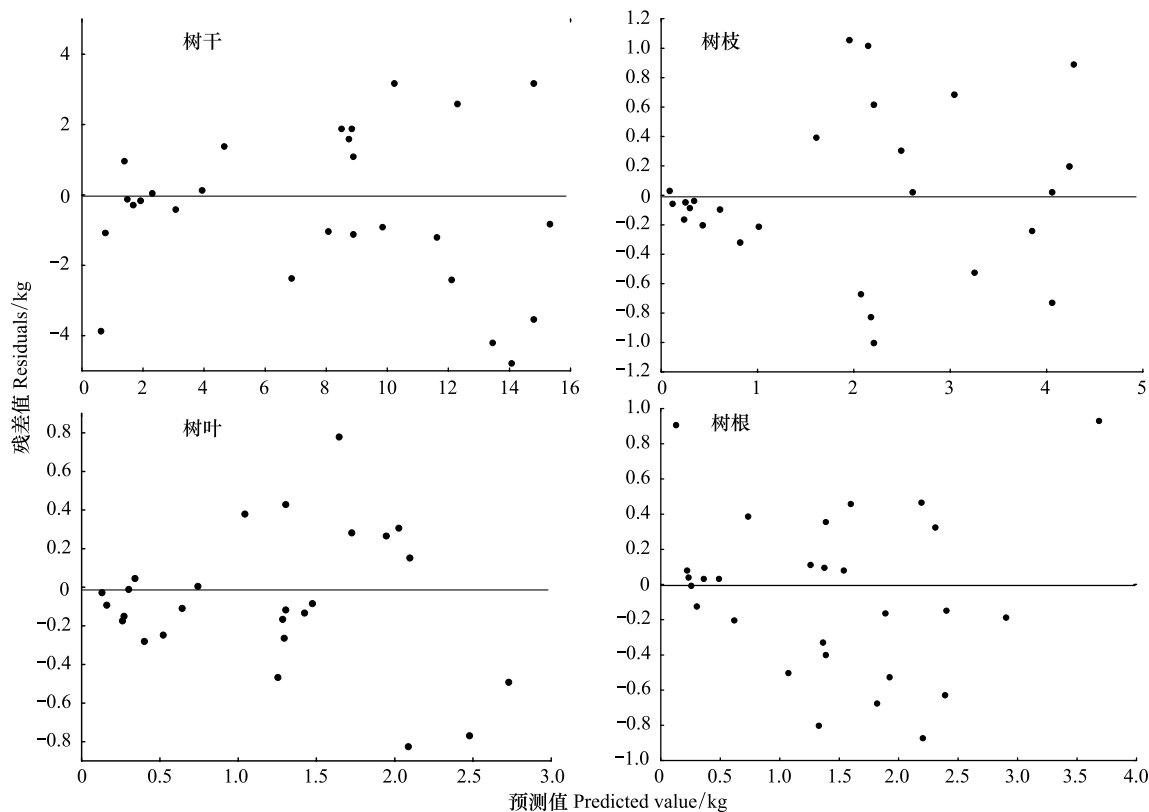


图2 含碳量相容性模型各器官残差分布图

Fig.2 Residual plots of the compatible carbon stocks model for each tree component

由表 6 可知,直接法中树干、树枝、树叶、树根、总量的预估精度分别为 91.03%、80.02%、70.24%、87.10%、93.08%,间接法各器官均采用平均含碳率 0.5 的精度分别为 89.64%、78.52%、70.11%、86.01%、90.88%,精度较直接法分别下降了 1.39%、1.5%、0.13%、1.09% 和 2.2%,由此可见,利用生物量模型结合含碳率 0.5 来进行含碳量预估会对单木水平上各器官及总量造成较大的偏差。间接法中使用的另外两种形式的含碳率与直接法相比降低的幅度很小,在 0.3 个百分点以内。总体上看,以上预估红松单木含碳量的 4 种方法中,从预估精度高低看,顺序为直接法>间接法 c>间接法 b>间接法 a。

3 讨论

3.1 相容性生物量和含碳量模型

本研究利用非线性联立方程组理论构建了相容性生物量和含碳量模型,应用 SAS 9.22 对参数进行联合估计,方法是利用 SAS/ETS 模块 proc model 中的 GMM (general moment of method)。分别对两模型中各个非线性方程进行加权来消除异方差,通过各项检验指标来看,两模型均无系统误差,两模型分别对生物量数据和含碳量数据都具有比较好的切合度。两模型中各个器官及总量的 R^2 值都在 0.75 以上,而拟合效率 (EF) 都在 0.8 以上,而模型的预估精度除树叶外均在 80% 以上。这就说明相容性生物量和含碳量模型都能够对单木各器官生物量和含碳量进行很好的估计,这就为下一步分析间接法中的误差来源提供了很好的基础条件。

3.2 间接法各器官均采用平均含碳率 0.5 对预估精度的影响

由表 6 可知,间接法中各器官均采用平均含碳率 0.5 会对各器官及总量的含碳量预估造成很大的误差,其中树干、树枝、树叶、树根和总量的预估精度较直接法分别下降了 1.39%、1.5%、0.13%、1.09% 和 2.2%,而这仅仅是单木水平上的平均下降幅度,如果推广到单位面积上的林分中,根据单木的平均累积误差结合林分的密度可以推算出单位面积林分的误差累积,从而造成了间接法中单木水平上的误差向林分中的积累。但从相容性生物量和含碳量模型的检验结果可知(表 5),两模型的误差基本相同,也就是说造成间接法精度较直接法下降的原因主要是来

自间接法的第二个过程。由表 2 可知,红松树干、树枝、树叶、树根和单木的平均含碳率分别为 47.70%、49.04%、49.33%、48.27%、48.11%,由此可见,各器官均采用平均含碳率 0.5 对树干、树根及总量的影响是非常大的,不能非常合理的反映单木各个器官的含碳率。另外根据表 2 中树干、树枝、树叶、树根及总量的平均含碳率 95% 置信区间分别为 47.38%—48.32%、48.51%—49.59%、48.81%—49.84%、47.42%—49.12% 和 47.56%—48.66%,与平均含碳率 0.5 有显著的区别,这也进一步说明,用平均含碳率 0.5 是不合理的,不能充分反映单木各个器官的真实含碳率水平。一般的,树种之间由于生理特性的差别,“固碳”能力是不同的。所以,不建议在预估单木含碳量的过程中使用平均含碳率 0.5,特定树种的含碳率应该根据实测结果而确定。

过去很多学者普遍采用平均含碳率 0.5 可能是由于实测单木各器官含碳率的条件不具备,现在随着 C/N 分析仪的普遍使用,为更加准确的测量单木及各器官的含碳率提供了条件,为更加精确的预估单木及整个森林碳储量提供了物质基础。

3.3 间接法各器官均采用单木的实测平均含碳率对预估精度的影响

单木的实测平均含碳率即树根、树枝、树叶、树根的实测含碳率的加权平均值。间接法采用这种形式的含碳率预估单木各器官含碳量,预估精度与直接法相比仍有所下降,但降幅相对与采用平均含碳率 0.5 较小。原因是单木的平均含碳率从总体上反映了所有样木各器官的含碳率信息,但从误差积累公式(6)可以看出,间接法中的误差积累的程度不仅与含碳率的平均值有关,而且还与单个样木的含碳率密切相关。此方法忽略了单个样木的含碳率信息,用含碳率的平均值代替所有个体的变化情况,这样会高估某些器官的含碳率,同时也会低估某些器官的含碳率,故预估精度较直接法仍然会下降。

所以,如果研究者已经了解某一树种在某一地区的平均含碳率,在能获得比较详实的生物量数据的前提下,为了减低研究成本结合该树种的平均含碳率能够比较精确的估计其单木的含碳量。但是对各个器官的估计就会出现一定程度的偏差,因为很多学者已经发现各器官之间的含碳率是存在差异的。所以如果需要特别精确的掌握各个器官的含碳

量,间接法中采用各个器官的实测含碳率会更好。总体上看,因为影响因子在间接法的第二个过程中的随机性,直接法仍然是比较好的选择。

3.4 间接法各器官均采用各自的实测平均含碳率对预估精度的影响

根据表 6 可知,间接法中采用树干、树枝、树叶和树根的实测平均含碳率预估其含碳量,精度较直接法略有下降,但下降幅度非常小,树干和总量在 0.3 个百分点左右,树根、树枝、树叶在 0.1 个百分点左右。该方法与间接法中采用其它两种形式的含碳率相比,精度是最高的。总体上来说间接法各器官采用实测平均含碳率较 0.5 精度显著提高。误差传递公式(6)中影响因子 $C_i\%/\bar{C}\%$ 对间接法中第二个过程有一定的作用,造成误差积累,但是总体影响效果不是很大。下降幅度不是很大的原因可以解释为:由于影响因子的分子都是单木各器官含碳率的实测值,而分母也是实测值的平均值,平均含碳率包含了所有样木各个器官的含碳率信息,影响因子没有人为估计的因素,因而也就能更加接近单木及各器官的真实含碳率水平。此外,从公式中还可以得出,如果影响因子的值很接近 1,且值波动范围比较小,那么间接法中第二个过程误差积累的程度就一定会很小,反之影响因子的波动幅度比较大却不一定导致预估误差的大幅度积累,因为还存在正负相互抵消的问题。

间接法中相容性生物量模型出现误差,是因为生物量的预测值与实测值之间出现了偏差,预测值在实测值的两侧波动。而从误差积累的公式(6)可以看出,影响因子在误差积累的过程中仅仅是影响了生物量的实测值,本质上还是因为变化后的实测值与预估值之间的差异造成了误差的积累。红松样木各器官的实测含碳率随着样木胸径的增大始终在相同的范围内波动,没有出现增大或者减小的趋势,即各器官的 $C_i\%/\bar{C}\%$ 值随胸径的增大没有出现增大或减小的趋势,所以,影响因子对生物量的影响与单木胸径没有明显的关系。如果某一点的生物量实测值变化后更加接近预测值,那么显然会减小误差,如果变化后远离预测值,显然会增加误差。因此,最终含碳量的预估精度就是所有点综合在一起后的效果。而在本研究中,显然误差是很小的,所以导致间接法采用这种形式的含碳率较直接法精度下降不

明显。

经过讨论间接法第二个过程,由于影响因子的作用,生物量实测值出现了小范围的波动。由于波动的不确定性造成了误差的积累的可能性,尽管误差积累程度不是很大,但对精度仍然会有影响。所以,在研究者取得一定数量样木的实测含碳率的情况下,直接建立相容性含碳量模型无疑是最好的选择,从而影响最终精度的因素只有含碳量模型本身。只要所用模型对数据的具有非常好的拟合度,那么模型精度一般来说都很高,也能够符合森林碳储量预估的精度要求。而间接法中,尽管本次研究精度较直接法只有小幅度下降,但是影响因子对生物量实测值影响的不确定性,有时会造成很大的误差积累。

4 结论

本文依据 44 株红松含碳量和生物量实测数据,采用了直接法建立了红松单木各器官含碳量的相容性模型,同时建立了生物量的相容性模型,通过 3 种形式的含碳率间接预估单木各器官的含碳量。其中,直接法建立的相容性含碳量模型中,树干、树枝、树叶、树根和总量的预估精度分别为 91.03%、80.02%、70.24%、87.10%、93.08%,间接法 a 中含碳量预估精度分别为 89.64%、78.52%、70.11%、86.01%、90.88%,间接法 b 中含碳量预估精度分别为 90.79%、78.94%、70.11%、87.08%、92.67%,间接法 c 的含碳量预估精度分别为 90.85%、79.96%、70.14%、87.04%、92.69%。

预估单木含碳量采用平均含碳率 0.5 会对单木各器官及总量造成很大的偏差,对红松单木而言,树干、树枝、树叶、树根和总量的预估精度较直接法分别下降了 1.39%、1.5%、0.13%、1.09%和 2.2%。间接法中产生误差积累主要是发生在第二个过程中,平均含碳率 0.5 没有真实反映单木各器官的含碳率水平。间接法中利用其它两种形式的含碳率,其精度较直接法也略有下降,但是幅度不是很大,最大幅度为 0.3 个百分点。如果在一般类型的调查中,对精度要求不是很高的前提下,为计算过程方便可以使用单木实测平均含碳率。总体上,预估单木含碳量精度的高低的顺序为直接法>间接法 c>间接法 b>间接法 a。

环境中温室气体的变化目前是研究的热点,森林生态系统是调节大气中 CO₂ 含量的杠杆,因此非常精确的估算森林的碳储量也具有重要意义。随着测定单木含碳率精密仪器的出现,准确的掌握单木含碳量已成为可能,也为进一步估算林分乃至更大尺度森林碳储量提供基础。所以,直接建立单木含碳量模型相对于间接法是具有优势的,在将来碳储量的估算中也会成为一种趋势,为更加准确的掌握森林的“碳源”“碳汇”功能提供条件。另外,本研究只建立了一元的相容性生物量模型和相容性含碳量模型,有关二元相容性模型和间接法中误差由单木向林分的积累将在下一步进行研究。

References:

- [1] Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16 (5): 497-508.
- [2] Liu G H, Fu B J, Fang J Y. Carbon dynamics of Chinese forests and its contribution to global carbon balance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(5): 733-740.
- [3] Li Y D, Zeng Q B, Wu Z M, Zhou G Y, Chen B F. Estimation of amount of carbon pool in natural tropical forest of China. *Forest Research*, 1998, 11(2): 156-162.
- [4] Sun Y J, Zhang J, Han A H, Wang X J, Wang X J. Biomass and carbon pool of *Larix gmelini* young and middle age forest in Xing'an Mountains Inner Mongolia. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27 (5): 1756-1762.
- [5] Bao C S, Bai Y, Qing M, Chen G W, Zhang Q L, Wang L M. Study on the *larix gmelinii* natural forest biomass carbon storage. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2010, 31(2): 77-82.
- [6] N  var J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 427-434.
- [7] Gil M V, Blanco D, Carballo M T, Calvo L F. Carbon stock estimates for forests in the Castillay Leo  n region, Spain. A GIS based method for evaluating spatial distribution of residual biomass for bio-energy. *Biomass and Bioenergy*, 2011, 35(1): 243-252.
- [8] Zabek L M, Prescott C E. Biomass equations and carbon content of aboveground leafless biomass of hybrid poplar in Coastal British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223(1-3): 291-302.
- [9] Xing Y Q, Wang L H. Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(1): 1-8.
- [10] Zhang H R, Tang S Z, Wang F Y. Study on establish and estimate method of biomass model compatible with volume. *Forest Research*, 1999, 12(1): 53-59.
- [11] Tang S Z, Zhang H R, Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(Z1): 1-27.
- [12] Ding Z. Study on the Carbon Allocation and Storage of Korean Pine Plantations [D]. Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2010.
- [13] Gu S Y. Study on Soil Fertility of Korean Pine Plantations [D]. Heilongjiang: Northeast Forestry University, 2001.
- [14] Parresol B R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and critical comparisons. *Forest Science*, 1999, 45(4): 573-593.
- [15] Snorrason A, Einarsson S F. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Sciences*, 2006, 19: 15-24.
- [16] Vallet P, Dh  te J F, Le Mogu  dec G, Ravart M, Pignard G. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1-3): 98-110.
- [17] Zhao T S, Guang Z Y, Zhao Y M, Liu G W. Study on biomass and productivity of *Larix kaempferi* plantation. *Journal of He'nan Agricultural University*, 1999, 33(4): 350-353.
- [18] Wang J R, Zhong A L, Kimmins J P. Biomass estimation errors associated with the use of published regression equations of paper Birch and Trembling Aspen. *Northern Journal of applied Forestry*, 2002, 19(3): 128-136.
- [19] Xu H. Studies on Standing Tree Biomass Models and the Corresponding Parameter Estimation [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 1998.
- [20] Zianis D, Mencuccini M. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 2004, 187(2): 311-332.
- [21] Zeng W S, Tang S Z. Using measurement error modeling method to establish compatible single-Tree biomass equations system. *Forest Research*, 2010, 23(6): 797-803.
- [22] Tang S Z, Li Y. The Statistical Basis of Biological Mathematics Model. Beijing: Science Press, 2002.
- [23] Li Y C, Tang S Z. Parameter estimate of the whole stand model with measurement error. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(1): 23-27.
- [24] Li F R, Liu F X, Jia W W. The development of compatible tree biomass models for main species in North-Eastern China. *Advanced Materials Research*, 2011, 183-185: 250-254.
- [25] Li F R. Modeling crown profile of *Larix olgensis* trees. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, 40(5): 16-24.
- [26] Dong L H, Li F R, Jia W W, Liu F X, Wang H Z. Compatible biomass models for main tree species with measurement error in Heilongjiang Province of Northeast China. *Chinese Journal of*

Applied Ecology, 2011, 22(1): 2653-2661.

参考文献:

- [1] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
- [2] 刘国华, 傅伯杰, 方精云. 中国森林碳动态及其对全球碳平衡的贡献. 生态学报, 2000, 20(5): 733-740.
- [3] 李意德, 曾庆波, 吴仲民, 周光益, 陈步峰. 我国热带天然林植被 C 贮存量的估算. 林业科学研究, 1998, 11(2): 156-162.
- [4] 孙玉军, 张俊, 韩爱惠, 王雪军, 王新杰. 兴安落叶松 (*Larix gmelini*) 幼中龄林的生物量与碳汇功能. 生态学报, 2007, 27(5): 1756-1762.
- [5] 鲍春生, 白艳, 青梅, 陈高娃, 张秋良, 王立明. 兴安落叶松天然林生物生产力及碳储量研究. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 77-82.
- [9] 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. 应用生态学报, 2007, 18(1): 1-8.
- [10] 张会儒, 唐守正, 王奉瑜. 与材积兼容的生物量模型的建立及其估计方法研究. 林业科学研究, 1999, 12(1): 53-59.
- [11] 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. 林业科学, 2000, 36(Z1): 1-27.
- [12] 丁壮. 红松人工林碳贮量和碳分配的研究 [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2010.
- [13] 谷思玉. 红松人工林土壤肥力的研究 [D]. 黑龙江: 东北林业大学, 2001.
- [17] 赵体顺, 光增云, 赵义民, 刘国伟. 日本落叶松人工林生物量及生产力的研究. 河南农业大学学报, 1999, 33(4): 350-353.
- [19] 胥辉. 立木生物量模型构建及估计方法的研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 1998.
- [21] 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. 林业科学研究, 2010, 23(6): 797-803.
- [22] 唐守正, 李勇. 生物数学模型的统计学基础. 北京: 科学出版社, 2002.
- [23] 李永慈, 唐守正. 带度量误差的全林整体模型参数估计研究. 北京林业大学学报, 2006, 28(1): 23-27.
- [26] 董利虎, 李凤日, 贾炜玮, 刘福香, 王鹤智. 含度量误差的黑龙江市主要树种生物量相容性模型. 应用生态学报, 2011, 22(1): 2653-2661.