

DOI:10.12171/j.1000-1522.20200058

东北林区 10 种主要森林类型的蓄积量、 生物量和碳储量模型研建

曾伟生 孙乡楠 王六如 王威 蒲莹

(国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要:【目的】林分水平的蓄积量、生物量和碳储量模型或数表, 是开展森林资源规划设计调查的必备计量工具。研建东北林区 10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型, 既是方法学探索, 也为生产实践提供参考成果。【方法】基于东北林区云冷杉林、落叶松林、红松林、樟子松林、栎树林、桦树林、杨树林、榆树林、椴树林和水胡黄林 10 种主要森林类型的 2 000 个样地的实测数据, 分别利用非线性独立回归估计、非线性误差变量联立方程组和含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法, 建立了林分水平的蓄积量、生物量和碳储量模型。【结果】基于全部样地通过误差变量联立方程组方法建立的蓄积量、生物量和碳储量总体平均模型, 其确定系数分别为 0.945、0.805 和 0.839, 而包含森林类型参数的蓄积量、生物量和碳储量哑变量模型, 其确定系数分别达到 0.959、0.949 和 0.951。10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型, 确定系数(R^2)都在 0.86 以上, 平均预估误差(MPE)都在 3% 以内, 平均百分标准误差(MPSE)大多数在 10% 以内。蓄积量模型的 R^2 在 0.876~0.980 之间, MPE 在 0.90%~1.95% 之间, MPSE 在 5.14%~11.89% 之间; 生物量模型的 R^2 在 0.864~0.988 之间, MPE 在 0.66%~2.07% 之间, MPSE 在 3.61%~11.60% 之间; 碳储量模型的 R^2 在 0.866~0.988 之间, MPE 在 0.67%~1.96% 之间, MPSE 在 3.65%~11.57% 之间。【结论】不同森林类型的蓄积量主要取决于林分断面积和平均高, 生物量主要取决于蓄积量和林分平均高。含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法, 是建立林分水平储量模型系统的可行方法。本研究所建立的东北地区 10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型, 其预估精度达到森林资源规划设计调查技术规定要求, 可以在实践中推广应用。

关键词: 蓄积量; 生物量; 碳储量; 哑变量模型; 误差变量联立方程组

中图分类号: S757.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2021)03-0001-08

引文格式: 曾伟生, 孙乡楠, 王六如, 等. 东北林区 10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型研建 [J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(3): 1-8. Zeng Weisheng, Sun Xiangnan, Wang Liuru, et al. Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(3): 1-8.

Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China

Zeng Weisheng Sun Xiangnan Wang Liuru Wang Wei Pu Ying

(Academy of Inventory and Planning, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: [Objective] Stand-level volume, biomass and carbon stock models or tables are necessary quantitative tools for implementing forest management inventory. Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China is not only an exploration of methodology, but also provides reference results for practice. [Method] Based on the field measurement data of 2 000 sample plots distributed in 10 forest types in northeastern China, i.e. spruce & fir (*Picea* spp. & *Abies* spp.), larch (*Larix* spp.), Mongolian scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*),

收稿日期: 2020-03-06 修回日期: 2020-06-14

基金项目: 中国国土勘测规划院招标项目(GXTC-A-19070081), 国家自然科学基金项目(31770676)。

第一作者: 曾伟生, 博士, 教授级高级工程师。主要研究方向: 森林资源清查与林业数学建模。Email: zengweisheng0928@126.com 地址: 100714 北京市东城区和平里东街 18 号国家林业和草原局调查规划设计院。

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

Korean pine (*Pinus koraiensis*), oak (*Quercus* spp.), birch (*Betula* spp.), poplar (*Populus* spp.), elm (*Ulmus* spp.), linden (*Tilia* spp.), and other three precious broadleaved species (*Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica* & *Phellodendron amurense*), the stand-level volume, biomass and carbon stock models were developed through independent nonlinear regression (INR), simultaneous error-in-variable equations (SEIVE), and SEIVE with dummy variable modeling approach. [Result] The coefficients of determination (R^2) of the population-averaged stand-level volume, biomass and carbon stock models based on all sample plots were 0.945, 0.805 and 0.839, respectively; and those of the models with type-specific parameters were 0.959, 0.949 and 0.951, respectively. The R^2 values of stand-level volume, biomass and carbon stock models for 10 forest types were all more than 0.86, the mean prediction errors (MPE) were all less than 3%, and the mean percent standard errors (MPSE) were almost less than 10%. For the volume stock models, the R^2 values were between 0.876–0.980, MPE were between 0.90%–1.95%, and MPSE were between 5.14%–11.89%; for the biomass stock models, the R^2 values were between 0.864–0.988, MPE were between 0.66%–2.07%, and MPSE were between 3.61%–11.60%; and for carbon stock models, the R^2 values were between 0.866–0.988, MPE were between 0.67%–1.96%, and MPSE were between 3.65%–11.57%. [Conclusion] The volume stock per hectare of different forest types mainly depends upon basal area and mean tree height of forest stands, and the biomass stock mainly relates to volume stock and mean tree height. The SEIVE with dummy variable modeling approach is a feasible method for developing stand-level stock models. The developed volume, biomass and carbon stock models for 10 major forest types in northeastern China in this study meet the need of precision requirements to the regulation on forest management inventory, indicating that the models can be applied in practice.

Key words: volume; biomass; carbon stock; dummy variable model; simultaneous error-in-variable equations

森林蓄积量、生物量和碳储量,既是各级森林资源监测的重要变量,也是反映森林生态系统质量和生产力的重要参数^[1-3]。对森林蓄积量和生物量的估计,可以通过建立单木或林分水平的蓄积量和生物量模型来获得^[4-6];而森林碳储量的估计,可通过森林生物量乘以森林的平均含碳系数得到^[2]。

我国早在 20 世纪 70 年代末就建立了各个主要树种的单木水平蓄积量模型,并以部颁标准颁布实施^[7]。根据 Luo 等^[8]所做的文献调研,从 1978—2013 年间,我国已发表了近 200 个树种的 5 924 个单木水平的生物量模型。从 2014 年以来,我国也有计划地编制了主要树种的立木生物量模型,并发布了系列行业标准^[9-14]。但是,林分水平的蓄积量和生物量模型,不论是国外^[6,15-24]还是国内^[5,25-34],发表的研究成果都要显著少于单木水平的模型,而且我国还尚未见到以国家或行业标准形式发布的林分水平蓄积量和生物量模型。

在已有的林分水平模型中,影响最大的是方精云等^[25-26]发表的 21 种森林类型的源于蓄积量的生物量模型,该模型在很多研究中得到了引用^[33,35-38]。此外,王斌等^[29]利用 1 266 个不同森林类型的样地资料,建立了我国 16 种森林类型的生物量与蓄积量之间的双曲线模型。由于这些模型大部分都是基于

小样本建立的(方精云等^[26]建立的 21 个模型有 19 个的建模样地数在 50 以下,王斌等^[29]建立的 16 个模型有 10 个的建模样地数在 50 以下),而且仅提供了确定系数 R^2 这一项评价指标,未提供其他误差方面的指标,在应用中具有很大的不确定性。从建模方法来讲,已有国内外研究成果中,从蓄积量模型建立^[5,15-17,27,30]到生物量模型建立^[6,19-26,28-29,31-34,39],都是针对单一类型的模型,而没有考虑联合构建两类模型。另外,即使我们有了各个主要树种的含碳系数^[9-13,40],但由于林分水平的生物量在很多情况下都不是由单一的树种组成,因此,对每种森林类型的平均含碳系数进行估计也是非常必要的。

本研究将利用东北林区 10 种主要森林类型的 2 000 个样地的地面实测数据,分别利用非线性独立回归估计、非线性误差变量联立方程组和含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法,联合建立林分水平的蓄积量模型、生物量模型和碳储量模型系统,既为森林资源调查提供计量依据,也为规范森林蓄积量和生物量联合建模与评价方法提供科学参考。

1 研究数据与研究方法

1.1 数据资料

本研究所用数据为地面样地调查资料,涉及东

北林区的云冷杉(*Picea* spp. & *Abies* spp.)林、落叶松(*Larix* spp.)林、樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)林、红松(*Pinus koraiensis*)林、栎树(*Quercus* spp.)林、桦树(*Betula* spp.)林、杨树(*Populus* spp.)林、榆树(*Ulmus* spp.)林、椴树(*Tilia* spp.)林和水胡黄(*Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica* & *Phellodendron amurense*)林等 10 种主要森林类型, 共计 2 020 个样地。调查范围覆盖内蒙古大兴安岭、黑龙江大兴安岭、伊春、松花江、牡丹江、长白山等 6 个林区的 12 个区域, 调查时间为 2019 年 9—11 月。样地为 600 m² 圆形样地, 除每株样木测量胸径以外, 还测量了 15 株不同径阶的样木树高, 以此为基础建立树高—胸径回归模型, 推算每株样木的树高, 并依据部颁二元立木材积表^[7]、生物量模型及碳计量参数^[9-14,40], 计算样木材积、生物量和碳储量, 从而得到样地的每公顷蓄积量、生物量和碳储量(可简称“三储量”), 作为建模的目标变量。根据目标变量与主要解释变量的残差图, 剔除了 20 个数据异常的样地, 最后参与建模的样地数为 2 000 个。除栎树林、桦树林、榆树林、椴树林和水胡黄林全部为天然林样地外, 其他 5 种森林类型共计有 133 个人工林样地。因为立木材积表未分起源, 这里拟建的林分蓄积量等储量模型也不考虑起源。表 1 为 10 种主要森林类型参与建模样地的每公顷蓄积量、生物量、断面积及平均高的变化范围。

1.2 建模方法

本研究将基于前述 10 种森林类型 2 000 个样地的蓄积量、生物量、碳储量实测数据, 首先用非线性回归方法建立“三储量”的独立回归模型, 再用非线性误差变量联立方程组方法建立模型系统; 最后用

含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法, 联合建立 10 种森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型。

1.2.1 非线性回归估计方法

林分水平的单位面积蓄积量主要与林分断面积和平均高有关^[5,16-17,27]; 单位面积生物量主要与蓄积量有关, 还与林分断面积、平均高、株数、年龄等因子有关^[6,19-23,26,29,32,34]; 单位面积碳储量主要与生物量和含碳系数有关^[2,26]。本研究确定的“三储量”独立回归模型表述如下:

$$V = a_0 G^{a_1} H^{a_2} + \varepsilon_V \quad (1)$$

$$B = b_0 G^{b_1} H^{b_2} V + \varepsilon_B \quad (2)$$

$$C = c_0 B + \varepsilon_C \quad (3)$$

式中: V 为单位面积蓄积量(m³/hm²), B 为单位面积生物量(t/hm²), C 为单位面积碳储量(t/hm²), G 为林分断面积(m²/hm²), H 为林分平均高(m); a_i 、 b_i 、 c_i 为模型参数, 参数的 t 检验值原则上应该大于 2, 否则视为无统计学意义(即与 0 无显著差异), 从模型中剔除; ε_V 、 ε_B 、 ε_C 为误差项, 假定其服从均值为 0 的正态分布。上述模型参数采用非线性回归估计方法求解。因为蓄积量、生物量、碳储量数据都具有异方差性, 应该采用加权回归或对数回归估计方法^[34,41]。

1.2.2 非线性误差变量联立方程组方法

模型(1)、(2)、(3)在逻辑上存在递进关系, 即首先根据林分断面积(G)、平均高(H)、估计蓄积量(V), 再将蓄积量的估计值 V 通过生物量转换因子(也与 G 、 H 等林分特征因子相关)估计生物量(B), 最后再以生物量的估计值 B 为基础得到碳储量(C)的估计值。这样, 3 个模型就构成一个联立方程组:

表 1 建模样地主要林分特征参数变化范围

Tab. 1 Ranges of main forest stand parameters for modeling sample plots

森林类型 Forest type	样地数 Sample plot number	蓄积量/(m ³ ·hm ⁻²) Volume/(m ³ ·ha ⁻¹)		生物量/(t·hm ⁻²) Biomass/(t·ha ⁻¹)		断面积/(m ² ·hm ⁻²) Basal area/(m ² ·ha ⁻¹)		平均高 Mean height/m	
		最小值 Min.	最大值 Max.	最小值 Min.	最大值 Max.	最小值 Min.	最大值 Max.	最小值 Min.	最大值 Max.
		云冷杉林 <i>Picea</i> spp. & <i>Abies</i> spp. forest	198	5.29	491.82	6.72	326.25	1.93	45.22
落叶松林 <i>Larix</i> spp. forest	202	5.94	334.97	6.17	268.10	1.33	34.66	6.37	20.08
樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i> forest	200	11.89	476.58	12.02	328.06	3.19	46.87	5.82	20.68
红松林 <i>Pinus koraiensis</i> forest	200	9.94	669.29	12.30	478.14	3.28	65.43	4.21	19.75
栎树林 <i>Quercus</i> spp. forest	196	6.47	246.64	6.94	301.55	1.59	35.07	3.56	15.07
桦树林 <i>Betula</i> spp. forest	201	4.78	212.50	5.45	184.31	1.37	29.37	6.37	15.88
杨树林 <i>Populus</i> spp. forest	210	2.45	376.62	1.96	284.11	0.58	45.87	5.79	19.85
榆树林 <i>Ulmus</i> spp. forest	199	25.10	306.16	38.03	359.19	5.05	35.26	6.42	16.64
椴树林 <i>Tilia</i> spp. forest	196	65.03	385.31	62.07	529.66	10.68	50.17	6.46	17.49
水胡黄林 <i>Fraxinus mandshurica</i> , <i>Juglans mandshurica</i> & <i>Phellodendron amurense</i> forest	198	35.88	296.93	40.54	251.62	7.84	33.27	8.44	19.54

$$\begin{cases} \hat{V} = a_0 G^{a_1} H^{a_2} \\ \hat{B} = b_0 G^{b_1} H^{b_2} \hat{V} \\ \hat{C} = c_0 \hat{B} \end{cases} \quad (4)$$

式中： \hat{V} 、 \hat{B} 、 \hat{C} 分别为单位面积蓄积量、生物量和碳储量的估计值。

模型(4)属于误差变量联立方程组，其中 G 、 H 为解释变量(也称为外生变量)，视为无误差变量； V 、 B 、 C 为需要估计的目标变量(也称为内生变量)，作为误差变量。模型(4)的参数采用 ForStat 软件“统计分析”模块中的“非线性误差变量联立方程组”进行求解^[42]。

1.2.3 含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法

在模型(4)的基础上，可以采用哑变量建模方法^[43-44]，通过引入哑变量代表不同的森林类型，建立基于相同解释变量和不同森林类型参数的储量模型系统，其表达式如下：

$$\begin{cases} \hat{V} = \left(\sum a_{0i} S_i \right) \cdot G^{(\sum a_{1i} S_i)} \cdot H^{(\sum a_{2i} S_i)} \\ \hat{B} = \left(\sum b_{0i} S_i \right) \cdot G^{(\sum b_{1i} S_i)} \cdot H^{(\sum b_{2i} S_i)} \cdot \hat{V} \\ \hat{C} = \left(\sum c_{0i} S_i \right) \cdot \hat{B} \end{cases} \quad (5)$$

式中： S_i 为反映不同森林类型的哑变量($i = 1, 2, \dots, 10$)； a_i 、 b_i 、 c_i 为不同森林类型的参数；其他符号同前。模型(5)的参数求解方法同模型(4)。哑变量的赋值方法为：

对于云冷杉林样地， $S_1 = 1, S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于落叶松林样地， $S_2 = 1, S_1 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于樟子松林样地， $S_3 = 1, S_1 = S_2 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于红松林样地， $S_4 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于栎树林样地， $S_5 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_6 =$

$S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于桦树林样地， $S_6 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 =$

$S_7 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于杨树林样地， $S_7 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 =$

$S_6 = S_8 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于榆树林样地， $S_8 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_9 = S_{10} = 0$ ；

对于椴树林样地， $S_9 = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_{10} = 0$ ；

对于水胡黄林样地， $S_{10} = 1, S_1 = S_2 = S_3 = S_4 = S_5 = S_6 = S_7 = S_8 = S_9 = 0$ 。

1.2.4 模型评价

用于模型评价的指标包括以下 6 项：确定系数 (R^2)、估计值的标准差(也称剩余标准差, SEE)、总体相对误差(TRE)、平均系统误差(ASE)、平均预估误差(MPE)和平均百分标准误差(MPSE)^[44-45]。其中 MPE 和 MPSE 的计算公式如下：

$$MPE = t_\alpha \cdot (SEE/\bar{y}) / \sqrt{n} \times 100\% \quad (6)$$

$$MPSE = \sum |y_i - \hat{y}_i| / \hat{y}_i / n \times 100\% \quad (7)$$

式中： y_i 为实际调查值， \hat{y}_i 为模型预估值， \bar{y} 为样本平均值， n 为样地数， t_α 为置信水平 α 时的 t 值。

对建立的回归模型，计算以上 6 项指标值，根据指标大小进行模型评价。从实用性角度考虑，一般要求模型的 TRE 和 ASE 均在 $\pm 3\%$ 以内，MPE 小于 3%，MPSE 小于 15%。另外，残差图也是评价模型的重要参考依据。一个好的模型，残差应当呈随机分布。

2 结果与分析

利用 10 种森林类型全部 2 000 个样地的蓄积量、生物量和碳储量数据，分别拟合独立的非线性模型(1)~(3)和联立的非线性模型系统(4)，其拟合结果和评价指标见表 2。

表 2 独立和联立储量模型的参数估计值和模型评价指标

Tab. 2 Parameter estimates and model evaluation indices of independent and simultaneous stock models

模型 Model	目标变量 Target variable	参数估计值 Parameter estimate			评价指标 Evaluation index					
		$a_0/b_0/c_0$	a_1/b_1	a_2/b_2	R^2	SEE	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
独立 Independent	V	0.831 56 (0.024 34)	1.100 79 (0.007 00)	0.746 32 (0.013 71)	0.945	22.65	0.21	0.00	0.61	9.75
	B	3.599 24 (0.170 57)	0.043 00 (0.011 40)	-0.617 75 (0.023 75)	0.812	32.19	0.63	1.23	0.99	14.30
	C	0.477 52 (0.000 31)			0.845	14.01	1.22	1.66	0.89	13.01
联立 Simultaneous	V	0.840 83 (0.026 22)	1.103 15 (0.007 50)	0.738 86 (0.014 52)	0.945	22.61	0.22	0.00	0.61	9.76
	B	3.147 67 (0.129 90)	0.029 72 (0.009 10)	-0.541 02 (0.018 69)	0.805	32.81	-0.90	-0.08	1.01	14.29
	C	0.479 45 (0.003 59)			0.839	14.28	-0.72	-0.05	0.91	12.91

注：括号内数据为标准差。V. 单位面积蓄积量；B. 单位面积生物量；C. 单位面积碳储量；SEE. 估计值的标准差；TRE. 总体相对误差；ASE. 平均系统误差；MPE. 平均预估误差；MPSE. 平均百分标准误差。下同。Notes: data in brackets is SD. V, volume per unit area; B, biomass per unit area; C, carbon stock per unit area; SEE, standard error of estimate; TRE, total relative error; ASE, average system error; MPE, mean prediction error; MPSE, mean percentage standard error. The same below.

从表 2 的结果看, 由于联立模型受到相互之间的制约, 生物量和碳储量模型的确定系数 R^2 略低于独立模型; 但可能由于模型之间的有机联系, 增强了模型的稳健性, 生物量和碳储量模型的平均系统误差 ASE 和平均百分标准误差 MPSE 要好于独立模型。因此, 从模型本身的特性及评价指标综合考虑, 应当采用非线性联立模型系统(4)的拟合结果。

在模型(4)的基础上, 通过引入代表不同森林类型的哑变量, 进一步拟合含哑变量的非线性误差变量联立方程组(5), 3 个储量模型的确定系数 R^2 分别从 0.945、0.805、0.839 提高到 0.959、0.949、0.951。蓄积量模型的 R^2 提高幅度甚微, 说明不同森林类型之间差异很小; 而生物量和碳储量模型的 R^2 大幅提

高, 说明不同森林类型之间差异很大。由于生物量模型的参数 b_1 绝对值较小、稳定性较差(不同森林类型的 b_1 取值有正有负), 故将生物量转换因子改进为基于林分平均高 H 的一元模型。重新拟合后 3 个储量模型的确定系数 R^2 分别为 0.959、0.949 和 0.951, 与前述结果完全一致(保留 4 位小数才能看出略有减小); 此时的平均预估误差 MPE 分别为 0.53%、0.52% 和 0.50%, 平均百分标准误差 MPSE 分别为 8.00%、7.11% 和 6.93%, 与剔除参数 b_1 前的模型几乎完全一致。

上述模型评价指标是针对 10 种森林类型的总体数据而言的, 在实际应用中应当分别不同森林类型进行森林资源储量的估计和评价。表 3 列出了

表 3 东北林区 10 种森林类型储量模型的参数估计值和模型评价指标

Tab. 3 Parameter estimates and evaluation indices of stock models for 10 forest types in forest region of northeastern China

森林类型 Forest type	目标变量 Target variable	参数估计值 Parameter estimate			评价指标 Evaluation index					
		$a_0/b_0/c_0$	a_1/b_1	a_2/b_2	R^2	SEE	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
云冷杉 <i>Picea</i> spp. & <i>Abies</i> spp.	V	1.110 92	1.108 20	0.654 12	0.968	18.29	-0.32	-0.02	1.40	8.28
	B	2.048 77	0.000 00	-0.399 77	0.936	17.13	-0.04	0.00	1.74	7.72
	C	0.489 02			0.944	7.78	-0.07	-0.01	1.62	7.34
落叶松 <i>Larix</i> spp.	V	1.093 95	1.032 65	0.710 65	0.968	11.66	-0.08	-0.01	1.35	6.70
	B	1.818 69	0.000 00	-0.301 28	0.977	7.85	0.38	-0.02	1.08	4.81
	C	0.488 54			0.977	3.82	0.35	-0.01	1.07	4.79
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	V	1.309 96	1.121 72	0.573 13	0.954	20.40	0.04	0.00	1.37	7.54
	B	1.993 64	0.000 00	-0.427 15	0.958	14.22	0.16	0.00	1.23	6.68
	C	0.497 88			0.958	6.83	0.13	0.00	1.23	6.67
红松 <i>Pinus koraensis</i>	V	1.414 19	1.063 71	0.596 03	0.911	39.76	-0.23	0.00	1.95	11.89
	B	1.391 50	0.000 00	-0.227 46	0.877	27.67	-0.82	-0.08	2.07	11.52
	C	0.483 33			0.892	12.90	-0.68	-0.07	1.94	10.85
栎树 <i>Quercus</i> spp.	V	0.601 32	1.085 50	0.860 68	0.968	8.12	-0.92	0.28	1.37	6.96
	B	2.813 30	0.000 00	-0.394 95	0.969	8.82	0.37	0.00	1.23	5.77
	C	0.481 27			0.971	4.07	0.35	0.00	1.18	5.64
桦树 <i>Betula</i> spp.	V	0.894 57	1.023 98	0.777 91	0.980	5.74	-0.13	-0.01	0.90	5.14
	B	1.904 00	0.000 00	-0.302 37	0.988	3.79	0.03	0.00	0.66	3.61
	C	0.487 10			0.988	1.89	0.02	0.00	0.67	3.65
杨树 <i>Populus</i> spp.	V	1.378 40	1.086 41	0.573 36	0.952	17.31	-0.12	0.09	1.48	7.13
	B	2.832 52	0.000 00	-0.466 15	0.941	13.48	0.69	-0.05	1.55	7.75
	C	0.478 60			0.939	6.49	0.59	-0.05	1.57	8.03
榆树 <i>Ulmus</i> spp.	V	0.938 61	1.033 57	0.768 68	0.924	14.18	0.13	0.01	1.53	8.55
	B	3.473 86	0.000 00	-0.403 54	0.953	12.93	0.00	-0.02	1.06	6.03
	C	0.452 60			0.960	5.34	-0.04	-0.03	0.96	5.48
椴树 <i>Tilia</i> spp.	V	0.966 60	1.223 60	0.513 24	0.876	24.03	-0.85	0.61	1.72	10.01
	B	3.503 66	0.000 00	-0.453 16	0.864	31.94	0.04	0.02	1.98	11.60
	C	0.476 25			0.866	15.07	0.07	0.03	1.96	11.57
水胡黄 <i>F. mandshurica</i> , <i>J. mandshurica</i> & <i>P. amurense</i>	V	0.865 43	1.095 14	0.717 54	0.887	16.67	0.03	-0.03	1.33	7.94
	B	2.225 80	0.000 00	-0.425 17	0.927	9.97	-0.04	0.05	0.94	5.64
	C	0.475 83			0.933	4.53	-0.06	0.05	0.89	5.34

10种森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型的拟合结果和评价指标。

从表3可知,10种森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型,其平均预估误差MPE大都在2%以内(仅红松林生物量模型为2.07%),平均百分标准误差MPSE有8个类型在10%以内,仅红松林和椴树林超过了10%(也都在12%以内);总体相对误差TRE和平均系统误差ASE都在 $\pm 1\%$ 以内且大部分都趋向于0;确定系数 R^2 大部分在0.9以上,最小的也达到0.864,最高的达到0.988。根据残差分析,10种森林类型的储量模型,其残差基本都呈现随机分布。图1为云冷杉林蓄积量、生物量和碳储量的相对残差分布,其他森林类型也类似,为省篇幅,此处从略。

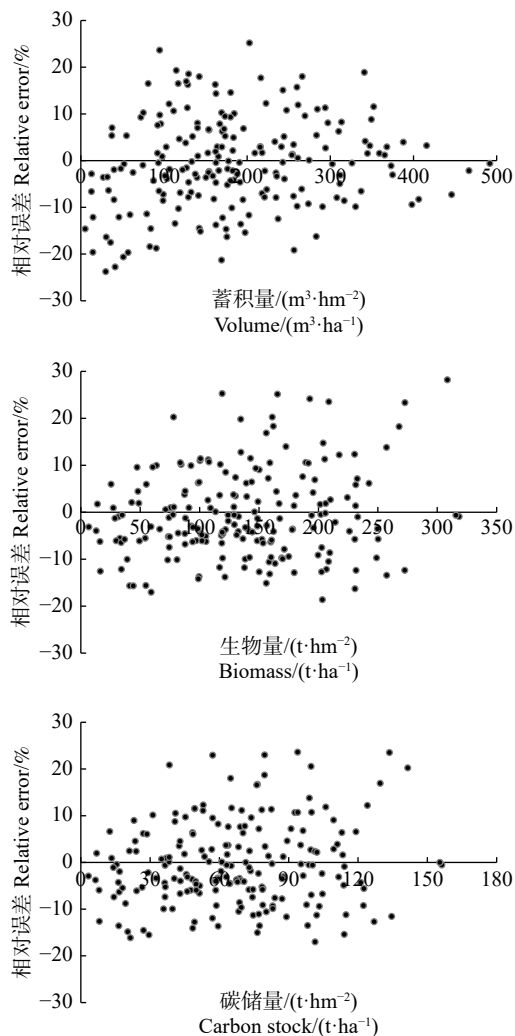


图1 云冷杉林蓄积量、生物量和碳储量的相对残差分布

Fig. 1 Distribution of relative residuals for stand volume, biomass and carbon stock models for *Picea* spp. & *Abies* spp. forest

3 讨论与结论

林分水平的蓄积量和生物量模型,是开展森林资源规划设计调查必不可少的基础计量工具。本文

针对我国在森林蓄积量和生物量建模方面存在的不足,基于2000个样地的地面实测数据,综合利用哑变量建模方法和非线性误差变量联立方程组方法,建立了东北地区10种主要森林类型的单位蓄积量、生物量和碳储量模型系统。其中,蓄积量模型的确定系数 R^2 在0.876~0.980之间,生物量模型的 R^2 在0.864~0.988之间,碳储量模型的 R^2 在0.866~0.988之间。林分单位蓄积量主要与断面积、平均高有关,这与Næsset等^[17]、余松柏等^[27]、曾伟生等^[5]的研究结论是一致的;林分生物量主要与蓄积量、平均高有关,这是Jagodziński等^[6,22-23]、Dong等^[34]的研究结论是一致的。Soares等^[39]认为生物量转换因子主要与优势高有关,与我们的结论也很接近。Jagodziński等^[21]、Usoltsev等^[20]认为生物量转换因子还与林分密度、年龄、平均胸径等因子有关,也是值得参考和借鉴的。

森林蓄积量、生物量、碳储量模型的实用性,主要取决于2项误差指标MPE和MPSE的大小,前者反映对总体估计值的平均误差,后者反映对林分或小班估计值的平均误差。本研究所建10种森林类型的储量模型,MPE在0.88%~2.07%之间,均未超过3%;MPSE在3.61%~11.89%之间,均未超过15%,其中仅红松林、椴树林超过了10%。《森林资源规划设计调查技术规程》^[46]对小班调查蓄积量的精度等级分A、B、C3级,要求相对误差分别不超过15%、20%、25%。因此,10种森林类型的蓄积量等储量模型均满足A级的精度要求,完全可以在森林资源规划设计调查及其他森林资源专项调查中推广应用。

根据本研究的相关结果,可以得出以下结论:(1)森林单位面积蓄积量主要与断面积和平均高相关,而森林生物量主要与蓄积量和平均高相关,或者生物量转换因子主要取决于林分平均高,而与断面积等其他因子无显著相关。(2)基于含哑变量的非线性误差变量联立方程组方法,联合建立森林蓄积量、生物量、碳储量模型,是林业建模实践中值得推广的一种可行做法。(3)本文所建东北地区10个森林类型的蓄积量、生物量、碳储量模型,其预估精度达到《森林资源规划设计调查技术规程》的要求,可以在实践中推广应用。

参考文献

- [1] IUFRO. International guidelines for forest monitoring[R]. Volume 5. Vienna: IUFRO World Series, 1994.
- [2] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory [R/OL]. 2006. [2020-03-11]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
- [3] FAO. Global forest resources assessment 2020: guidelines and

- specifications[R]. Rome: FRA Working Paper, 2018.
- [4] 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 X Q, Zhang J G, Duan A G. Compatibility of stand volume model for Chinese fir based on tree-level and stand-level[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 82-87.
- [5] 曾伟生, 杨学云, 陈新云. 单木和林分水平一元和二元材积模型的预估精度对比[J]. 中南林业调查规划, 2017, 36(4): 1-6.
Zeng W S, Yang X Y, Chen X Y. Comparison on prediction precision of one-variable and two-variable volume models on tree-level and stand-level[J]. Central South Forest Inventory & Planning, 2017, 36(4): 1-6.
- [6] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, et al. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill. aboveground biomass[J]. *Annals of Forest Science*, 2019, 76: 56.
- [7] 中华人民共和国农林部. 立木材积表 (LY208-77)[S]. 北京: 中国标准出版社, 1977.
Agriculture and Forestry Ministry of China. Tree volume tables (LY208-77)[S]. Beijing: China Standard Press, 1977.
- [8] Luo Y J, Wang X K, Ouyang Z Y, et al. A review of biomass equations for China's tree species[J]. *Earth System Science Data*, 2020, 12(1): 21-40.
- [9] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数—落叶松 (LY/T 2654-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Larix* (LY/T 2654-2016)[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [10] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数—云杉 (LY/T 2655-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Abies* (LY/T 2655-2016)[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [11] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数—冷杉 (LY/T 2656-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Picea* (LY/T 2656-2016)[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [12] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数—栎树 (LY/T 2658-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Quercus* (LY/T 2658-2016)[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [13] 国家林业局. 立木生物量模型及碳计量参数—桦树 (LY/T 2659-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Betula* (LY/T 2659-2016)[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.
- [14] Zeng W S. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China[J]. *Forest Research*, 2018, 7: 1-5.
- [15] Shiver B D, Brister G H. Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna*[J]. *Forest Ecology and Management*, 1992, 47(Suppl.1-4): 211-223.
- [16] Næsset E. Stand volume functions for *Picea abies* in western Norway[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1995, 10(1): 42-50.
- [17] Næsset E, Tveite B. Stand volume functions for *Picea abies* in eastern, central and northern Norway[J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1999, 14: 164-174.
- [18] Chamshama S A O, Mugasha A G, Zahabu E. Stand biomass and volume estimation for Miombo woodlands at Kitulungo, Morogoro, Tanzania[J]. *Southern African Forestry Journal*, 2004, 200: 59-69.
- [19] Castedo-Dorado F, Gómez-García E, Diéguez-Aranda U, et al. Aboveground stand-level biomass estimation: a comparison of two methods for major forest species in northwest Spain[J]. *Annals of Forest Science*, 2012, 69: 735-746.
- [20] Usoltsev V A, Shobairi S O R, Chasovskikh V P. Triple harmonization of transcontinental allometric of *Picea* spp. and *Abies* spp. forest stand biomass[J]. *Ecology, Environment and Conservation*, 2018, 24(4): 1966-1972.
- [21] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, et al. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? Allometric equations and biomass conversion and expansion factors[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 409: 74-83.
- [22] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, et al. Tree- and stand-level biomass estimation in a *Larix decidua* Mill. chronosequence[J/OL]. *Forests*, 2018, 9: 587 [2020-01-13]. <https://www.mdpi.com/1999-4907/9/10/587>.
- [23] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, et al. Effects of stand features on aboveground biomass and biomass conversion and expansion factors based on a *Pinus sylvestris* L. chronosequence in western Poland[J]. *European Journal of Forest Research*, 2019, 138: 673-683.
- [24] Burt A, Calders K, Cuni-Sanchez A, et al. Assessment of bias in pan-tropical biomass predictions[J]. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2020, 3: 12.
- [25] 方精云, 刘国华, 徐嵩龄. 我国森林植被的生物量和净生产量[J]. 生态学报, 1996, 16(5): 497-508.
Fang J Y, Liu G H, Xu S L. Biomass and net production of forest vegetation in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(5): 497-508.
- [26] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998[J]. *Science*, 2001, 292: 2320-2322.
- [27] 余松柏, 叶金盛, 王登峰, 等. 编制林分形高表估计林分蓄积量方法的研究[J]. 中南林业调查规划, 2005, 24(3): 5-9.
Yu S B, Ye J S, Wang D F, et al. Study on method of establishing stand form-height table for volume estimation[J]. *Central South Forest Inventory & Planning*, 2005, 24(3): 5-9.
- [28] 侯振宏, 张小全, 徐德应, 等. 杉木人工林生物量和生产力研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(5): 97-103.
Hou Z H, Zhang X Q, Xu D Y, et al. Study on biomass and productivity of Chinese fir plantation[J]. *Chinese Agricultural*

- Science Bulletin, 2009, 25(5): 97–103.
- [29] 王斌, 刘某承, 张彪. 基于森林资源清查资料的森林植被净生产量及其动态变化研究[J]. 林业资源管理, 2009(1): 35–42.
Wang B, Liu M C, Zhang B. Dynamics of net production of China forest vegetation based on forest inventory data[J]. Forest Resources Management, 2009(1): 35–42.
- [30] 王艳婷, 李崇贵, 郝利军. 用岭估计估测以分类为前提的森林蓄积量[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(9): 39–42, 57.
Wang Y T, Li C G, Hao L J. Forest volume estimation on the premise of classification by ridge estimate[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(9): 39–42, 57.
- [31] Hou Y N, Wu H L, Zeng W X, et al. Conversion parameters for stand biomass estimation of four subtropical forests in southern China[C/OL]. Beijing: Proceedings of 2016 International Conference on Environment, Climate Change and Sustainable Development, 2017 [2020–03–18]. DOI: [10.12783/dteecs/eccsd2016/5846](https://doi.org/10.12783/dteecs/eccsd2016/5846).
- [32] Mei G Y, Sun Y J, Saeed S. Models for predicting the biomass of *Cunninghamia lanceolata* trees and stands in southeastern China[J/OL]. PLoS ONE, 2017, 12(1): e0169747 [2020–03–15]. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28095512/>.
- [33] Zhao M M, Yang J L, Zhao N, et al. Estimation of China's forest stand biomass carbon sequestration based on the continuous biomass expansion factor model and seven forest inventories from 1977 to 2013[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 448: 528–534.
- [34] Dong L H, Zhang L J, Li F R. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountain, northeast China[J]. Forests, 2019, 10: 715.
- [35] 曾伟生. 云南省森林生物量与生产力研究[J]. 中南林业调查规划, 2005, 24(4): 1–3, 13.
Zeng W S. Research on forest biomass and productivity in Yunnan[J]. Central South Forest Inventory & Planning, 2005, 24(4): 1–3, 13.
- [36] 欧阳钦. 长沙望城区森林植被生物量及碳储量研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2014.
Ouyang Q. The research on biomass and carbon storage of forest vegetations in Wangcheng District, Changsha[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2014.
- [37] 梁兴军. 济南市森林植被生物量和碳储量调查研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
Liang X J. Research on biomass and carbon storage of forest vegetation in Jinan City[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2015.
- [38] 陈小林. 湖南安仁县森林生态系统生物量和碳储量研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2016.
Chen X L. Biomass and carbon storage of typical forest ecosystem in Anren County of Hunan Province[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2016.
- [39] Soares P, Tome M. Biomass expansion factors for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal[J]. Forest Systems, 2012, 21(1): 141–152.
- [40] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京: 中国林业出版社, 2010.
Li H K, Lei Y C. Estimation and evaluation of forest biomass and carbon storage in China[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010.
- [41] 曾伟生, 唐守正. 非线性模型对数回归的偏差校正及与加权回归的对比分析[J]. 林业科学研究, 2011, 24(2): 137–143.
Zeng W S, Tang S Z. Bias correction in logarithmic regression and comparison with weighted regression for non-linear models[J]. Forest Research, 2011, 24(2): 137–143.
- [42] 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.
Tang S Z, Lang K J, Li H K. Statistics and computation of biomathematical models (ForStat textbook)[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [43] Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales: a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2011, 41(7): 1547–1554.
- [44] Zeng W S. Using nonlinear mixed model and dummy variable model approaches to construct origin-based single tree biomass equations[J]. Trees, 2015, 29(1): 275–283.
- [45] 曾伟生, 唐守正. 立木生物量模型的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, 47(11): 106–113.
Zeng W S, Tang S Z. Goodness evaluation and precision analysis of tree biomass equations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11): 106–113.
- [46] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 森林资源规划设计调查技术规程(GB/T 26424—2010)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine, Standardization Administration of PRC. Technical regulations for inventory for forest management planning and design[S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.

(责任编辑 范娟
责任编辑 张会儒)