

北京市主要森林类型蓄积量生物量碳储量模型研建

杨学云, 曾伟生, 陈新云

(国家林业和草原局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要:林分水平的蓄积量、生物量和碳储量模型, 是开展森林资源规划设计调查的计量基础。基于北京市 2016 年森林资源连续清查的 1 425 个乔木林样地数据, 分别利用非线性独立回归估计、误差变量联立方程组和含哑变量的误差变量联立方程组方法, 建立了油松林、侧柏林、栎树林、桦木林、榆树林、刺槐林、杨树林、其他硬阔林、其他软阔林、乔木经济林等 10 种主要森林类型的林分蓄积量、生物量和碳储量模型。结果显示: 10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型的确定系数 (R^2) 都在 0.93 以上, 总体相对误差 (TRE) 和平均系统误差 (ASE) 都在 $\pm 3\%$ 以内且多数趋近于 0, 平均预估误差 (MPE) 都在 5% 以内, 平均百分标准误差 ($MPSE$) 都在 15% 以内。结果表明: 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, 是建立林分水平三储量 (森林蓄积量、生物量和碳储量) 模型系统的可行方法; 所建北京市 10 种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型, 其预估精度达到相关技术规定要求, 可以在实践中推广试用; 为进一步提高模型的准确度, 可采用基于二元模型计算的蓄积量和生物量样地数据对所建模型进行修正。

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:S711 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6622(2021)02-0124-07

DOI:10.13466/j.cnki.lyzygl.2021.02.017

Research on Developing Stand Volume, Biomass and Carbon Stock Models for Major Forest Types in Beijing

YANG Xueyun, ZENG Weisheng, CHEN Xinyun

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

Abstract: Stand-level volume, biomass and carbon stock models are quantitative tools for implementing forest resource management. Based on data of 1 425 permanent plots from forest inventory in 2016 in Beijing, and through approaches including independent nonlinear regression (INR), simultaneous error-in-variable equations (SEIVE), and SEIVE with dummy variable modeling, this study works out the stand-level volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types, including Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*), cypress (*Platycladus orientalis*), oak (*Quercus* spp.), birch (*Betula* spp.), elm (*Ulmus* spp.), locust (*Robinia pseudoacacia*), poplar (*Populus* spp.), other hardwood broadleaved, other softwood broadleaved, and economic arboreal forest. The results show that the coefficients of determination

收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-03-08

基金项目: 国家财政专项“森林资源监测与评价”(2130207)

作者简介: 杨学云(1969-), 女, 山东招远人, 高工, 主要从事全国森林资源清查与统计分析工作。Email: yxy0892@126.com

通讯作者: 曾伟生(1966-), 男, 湖南涟源人, 教授级高工, 博士, 主要从事森林资源清查与林业数学建模方面的研究工作。Email: zengweisheng0928@126.com

(R^2) of the stand-level volume, biomass and carbon stock models for 10 forest types are more than 0.93, the total relative errors (TREs) and average systematic errors (ASEs) are within $\pm 3\%$ and most of them are close to zero. The mean prediction errors (MPEs) are less than 5%, and the mean percent standard errors (MPSEs) are almost less than 15%. The following conclusions can be achieved that the volume stock per hectare of different forest types mainly depend upon basal area and average tree height of the forest stands, and the biomass stock mainly relate to volume stock and average 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 forest types in Beijing in this study meet the need of precision requirements to the relevant regulation and can be applied on trial in practice. For improving the accuracy of the developed models, volume and biomass data of plot samples calculated by two-variable models need be used to further modify the models.

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,是反映森林生态系统质量和生产力的重要参数,也是森林资源调查监测评价的重要指标^[1-3]。森林蓄积量和生物量可通过建立的单木或林分水平的蓄积量和生物量模型来估计^[4-6],而森林碳储量可通过森林生物量及其平均含碳系数得到^[2]。

20世纪70年代末,我国建立了主要树种(组)的56个立木材积模型,并以部颁标准颁布实施^[7];1978—2013年,我国发表了近200个树种的5924个单木水平的生物量模型^[8];2014年以来,我国发布实施了主要树种的立木生物量模型系列行业标准^[9-21]。但是,不论是国外^[6,22-31]还是国内^[5,32-42]学者,发表的林分蓄积量和生物量模型都要显著少于单木水平的模型,且我国尚未见到以国家标准或行业标准发布的林分蓄积量和生物量模型。从建模方法来讲,国内外已有研究成果中,从建立蓄积量模型^[5,22-24,35,38]到建立生物量模型^[6,26-34,36,37,39-43],都是针对单一类模型,而未考虑联合构建两类模型。另外,对森林碳储量计算来说,即使有了各个主要树种的含碳系数^[9-21,44],但由于林分生物量通常都不是由单一树种组成,因此,估计每个森林类型的平均含碳系数,也是非常必要的。

本研究利用北京市10种主要森林类型的1425个森林资源连续清查样地数据,分别利用非线性独立回归估计、误差变量联立方程组和含哑变量的误差变量联立方程组方法,建立林分蓄积量、生物量和碳储量模型,以期为北京市森林资源调查监测评

价提供计量依据,为规范森林蓄积量和生物量联合建模与评价方法提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据资料

本研究所用数据为北京市2016年森林资源连续清查样地数据,涉及油松(*Pinus tabulaeformis*)林、侧柏(*Platycladus orientalis*)林、栎树(*Quercus* spp.)林、桦木(*Betula* spp.)林、榆树(*Ulmus* spp.)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、杨树(*Populus* spp.)林、其他硬阔林、其他软阔林和乔木经济林等10种主要森林类型,共计1444个样地。样地为667m²的方形样地,基于每株样木胸径,由一元材积表计算蓄积量;并依据生物量模型及碳计量参数系列行业标准和相关文献^[9-21,32,44],计算生物量和碳储量,从而得到样地的每公顷蓄积量、生物量和碳储量,以此来作为建模的目标变量。根据目标变量与主要解释变量(断面积、平均高)的残差图,剔除19个数据异常的样地,最后参与建模的样地数为1425个。表1为10种主要森林类型参与建模样地的每公顷蓄积量的特征值。

1.2 建模方法

将基于表1中10个森林类型1425个样地的蓄积量、生物量和碳储量(以下简称三储量)数据,先按非线性回归估计建立三储量的独立模型;再用误差变量联立方程组方法建立模型系统;最后采用含哑变量的误差变量联立方程组方法,联合建立10种森林类型的三储量模型。

表1 建模样地每公顷蓄积量的特征值
Tab. 1 Statistics of stand volume for modeling plots

森林类型	样地数/ 个	平均值/ (m^3/hm^2)	最小值/ (m^3/hm^2)	最大值/ (m^3/hm^2)	标准差/ (m^3/hm^2)	变动系数/ %
油松林	171	41.45	0.12	141.83	36.22	87.39
侧柏林	132	15.27	0.06	80.87	15.14	99.14
栎树林	248	47.68	1.95	187.63	36.33	76.20
桦木林	54	58.16	0.84	198.73	48.96	84.19
榆树林	77	25.07	0.57	114.57	23.15	92.33
刺槐林	93	27.45	0.15	138.02	30.03	109.40
杨树林	172	22.87	0.21	124.00	25.80	112.77
其他硬阔林	154	81.65	0.85	372.49	63.39	77.64
其他软阔林	152	39.64	0.12	176.37	39.82	110.47
乔木经济林	172	28.27	0.24	157.90	24.65	87.20

注:油松含落叶松(*Larix* spp.)和其他松;侧柏含桧柏(*Sabina chinensis*)和柏木(*Cupressus funebris*)等;其他硬阔含胡桃楸(*Juglans mandshurica*);其他软阔含椴树(*Tilia* spp.)、柳树(*Salix* spp.)、泡桐(*Paulownia fortunei*)等;经济林含白蜡(*Fraxinus chinensis*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、板栗(*Castanea mollissima*)、核桃(*Juglans regia*)和柿子(*Diospyros kaki*)等。

1.2.1 非线性独立回归估计

林分水平的单位面积蓄积量主要与断面积和平均高有关^[5,23-24,35];单位面积生物量除与林分蓄积量有关外,还与林分的断面积、平均高、株数、年龄等因子有关^[6,26-30,34,37,40,42];单位面积碳储量主要与生物量和含碳系数有关^[2,34]。三个储量的回归模型分别表述如下:

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

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

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

式中: M 为单位面积蓄积量(m^3/hm^2), B 为单位面积生物量(t/hm^2), C 为单位面积碳储量(t/hm^2), G 为林分断面积(m^2/hm^2), H 为林分平均高(m); a_i, b_i, c_i 为模型参数,其相应的 t 值一般应大于2或 p 值小于0.05,否则视为无统计学意义,应从模型中剔除; $\varepsilon_M, \varepsilon_B, \varepsilon_C$ 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。因为三储量数据都具有异方差性,应该采用对数回归或加权回归估计方法^[42,45]。

1.2.2 误差变量联立方程组

(1)一(3)式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 M ,再根据蓄积量估计值及生物量转换因子(也与 G, H 等林分特征因子相关)估计生物量 B ,最后根据生物量估计值

及含碳系数估计碳储量 C 。这样,3个模型就构成一个具有递进关系的联立方程组,即:

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

式中: $\hat{M}, \hat{B}, \hat{C}$ 分别为单位面积蓄积量、生物量和碳储量的估计值, G 为林分断面积(m^2/hm^2), H 为林分平均高(m); a_i, b_i, c_i 为模型参数。

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),作为无误差变量; M, 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)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^[46]。

1.2.3 含哑变量的误差变量联立方程组

模型(4)是不考虑森林类型差异的总模型,在此基础上,可以通过引入哑变量代表不同的森林类型,采用哑变量建模方法^[47-48],建立三储量模型系统,即:

$$\begin{cases} \hat{M} = (\sum a_{0i} x_i) \times G^{(\sum a_{1i} x_i)} \times H^{(\sum a_{2i} x_i)} \\ \hat{B} = (\sum b_{0i} x_i) \times G^{(\sum b_{1i} x_i)} \times H^{(\sum b_{2i} x_i)} \times \hat{M} \\ \hat{C} = (\sum c_{0i} x_i) \times \hat{B} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\hat{M}, \hat{B}, \hat{C}$ 分别为单位面积蓄积量、生物量和碳储量的估计值, G 为林分断面积 (m^2/hm^2), H 为林分平均高 (m); x_i 为反映不同森林类型的哑变量 ($i=1, 2, \cdots, 10$); $a_{0i}, a_{1i}, a_{2i}, b_{0i}, b_{1i}, b_{2i}, c_{0i}$ 为不同森林类型的参数。

模型(5)的参数求解方法同模型(4)。哑变量的赋值方法为:

对于油松林样地, $x_1 = 1, x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于侧柏林样地, $x_2 = 1, x_1 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于栎树林样地, $x_3 = 1, x_1 = x_2 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于桦木林样地, $x_4 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于榆树林样地, $x_5 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于刺槐林样地, $x_6 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_7 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于杨树林样地, $x_7 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_8 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于其他硬阔林样地, $x_8 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_9 = x_{10} = 0$;

对于其他软阔林样地, $x_9 = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 =$

$x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_{10} = 0$;
对于乔木经济林样地, $x_{10} = 1, x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_6 = x_7 = x_8 = x_9 = 0$ 。

1.2.4 模型评价

采用确定系数 (R^2)、估计值的标准差 (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 ($MPSE$)^[49-51] 等6项指标对模型进行评价。其中, MPE 和 $MPSE$ 的计算公式如下:

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

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

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。

对所建回归模型, 计算以上6项指标, 根据指标值大小进行模型评价。从实用性角度考虑, 一般要求模型的 TRE 和 ASE 均在 $\pm 5\%$ 以内, MPE 小于 5% , $MPSE$ 小于 15% 。

2 结果与分析

利用10种森林类型全部1425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)和联立模型系统(4), 其拟合结果和评价指标如表2所示。

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 evaluation indices of independent and simultaneous stock models

模型	目标变量	参数估计值			评价指标					
		$a_0/b_0/c_0$	a_1/b_1	a_2/b_2	R^2	SEE	$TRE/\%$	$ASE/\%$	$MPE/\%$	$MPSE/\%$
独立模型	M	2.251	1.030	0.3064	0.941	9.97	-0.84	0.01	1.32	14.49
	B	2.030	0	-0.2033	0.943	11.95	-2.44	-2.65	1.24	14.02
	C	0.4886			0.945	5.64	-2.93	-2.74	1.20	13.70
联立模型	M	2.393	1.035	0.2692	0.938	10.22	-0.05	0.07	1.35	14.55
	B	2.059	0	-0.2260	0.940	12.20	1.62	0.19	1.26	14.19
	C	0.4885			0.945	5.64	1.13	0.10	1.20	13.77

注: SEE 的单位, 目标变量为 M 的模型为 m^3/hm^2 , 目标变量为 B, C 的模型为 t/hm^2 。

从表2的结果看, 由于联立模型受到相互之间的制约, 蓄积量和生物量模型的确定系数 (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总体相对误差 (TRE) 和平均系统误差 (ASE) 要明显好于独立模型。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误差变量联立方程组(5),三储量模型的确定系数(R^2)分别从0.938,0.940,0.945提高到0.973,0.971,0.970。此时的平均预估误差(MPE)分别为0.90%,0.88%和0.88%,平均百分标准误差(MPSE)分别为11.09%,9.58%和9.56%。

上述评价指标是针对10种森林类型的总体估

计而言的,在实际应用中应分别不同森林类型,开展森林资源三储量的估计和评价。表3列出了10种森林类型的三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:平均预估误差(MPE)都在5%以内;平均百分标准误差(MPSE)都在15%以内;总体相对误差(TRE)和平均系统误差(ASE)大都在 $\pm 2\%$ 以内(仅刺槐林和其他硬阔林蓄积量模型的TRE超出了2%)且多数趋近于0;确定系数(R^2)在0.93以上,最高的达到了0.991。

表3 北京市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 Beijing

森林类型	目标变量	参数估计值			评价指标					
		$a_0/b_0/c_0$	a_1/b_1	a_2/b_2	R^2	SEE	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
油松林	M	2.636	1.074	0.1317	0.970	6.31	-1.89	-0.18	2.31	11.63
	B	1.362	0	-0.0571	0.983	5.86	-1.56	0.51	1.77	10.87
	C	0.5081			0.984	2.93	-1.25	0.42	1.73	10.40
侧柏林	M	3.112	1.036	-0.0451	0.966	2.81	-1.75	0.06	3.17	13.31
	B	1.627	0	0.1072	0.990	3.17	-0.17	0.13	1.78	7.11
	C	0.4994			0.991	1.51	-0.02	0.10	1.70	6.81
栎树林	M	2.701	1.077	0.1043	0.979	5.26	-0.39	0.10	1.38	8.11
	B	1.573	0	0.0030	0.971	10.38	0.46	0.04	1.71	9.36
	C	0.4807			0.971	4.95	0.38	0.05	1.70	9.35
桦木林	M	2.910	1.080	0.0831	0.978	7.47	-0.44	0.22	3.50	9.19
	B	1.393	0	-0.0262	0.971	11.79	0.80	-0.05	4.15	8.92
	C	0.4856			0.969	5.78	0.66	0.00	4.20	9.09
榆树林	M	2.584	1.009	0.2726	0.949	5.27	0.73	0.03	4.77	11.80
	B	1.524	0	-0.1312	0.975	3.96	-1.02	0.04	3.11	8.14
	C	0.4845			0.973	1.96	-1.12	0.04	3.18	8.24
刺槐林	M	2.342	1.035	0.3050	0.986	3.54	2.19	-0.29	2.66	10.18
	B	2.064	0	-0.1208	0.979	6.46	0.29	0.01	3.12	7.37
	C	0.4844			0.980	3.02	0.31	0.01	3.01	7.20
杨树林	M	2.904	1.055	0.2330	0.959	12.87	0.09	0.26	2.52	11.75
	B	0.891	0	0.0272	0.944	14.69	0.11	0.47	2.98	13.30
	C	0.4745			0.944	6.89	0.07	0.59	2.95	13.44
其他硬阔林	M	2.600	1.024	0.2544	0.979	3.77	2.39	-0.16	2.49	11.01
	B	2.201	0	-0.2397	0.963	5.90	-0.76	0.03	2.94	8.75
	C	0.4851			0.962	2.87	-0.86	0.05	2.95	8.69
其他软阔林	M	2.444	1.041	0.2860	0.954	8.60	0.07	-0.07	3.48	11.48
	B	1.755	0	-0.2406	0.954	9.08	0.74	-0.02	3.40	9.74
	C	0.4867			0.944	4.76	-0.28	0.09	3.71	10.28
乔木经济林	M	2.477	1.077	0.2724	0.937	6.20	-0.92	0.24	3.31	13.10
	B	1.530	0	-0.1303	0.954	6.29	0.30	-0.01	2.80	9.91
	C	0.4942			0.953	3.12	0.28	-0.02	2.81	9.93

注:SEE的单位,目标变量为M的模型为 m^3/hm^2 ;目标变量为B,C的模型为 t/hm^2 。

3 讨论与结论

林分蓄积量和生物量模型,是开展森林资源规划设计调查的必备计量工具。本文基于1 425个连清样地的调查数据,利用带哑变量的非线性误差变量联立方程组方法,建立了北京市10种森林类型的林分蓄积量、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0.937~0.986之间,生物量模型的 R^2 在0.944~0.990之间,碳储量模型的 R^2 在0.944~0.991之间。Næsset等^[24]、余松柏等^[35]、曾伟生等^[5]的研究结果也表明,林分单位蓄积量主要与断面积、平均高有关;Jagodziński等^[6,29-30]、Dong等^[42]的研究结论也与本研究一致,即林分生物量主要与蓄积量、平均高有关;Soares等^[43]认为生物量转换因子主要与优势高有关,与我们的研究结论也很接近。

森林蓄积量、生物量、碳储量模型的实用性,主要取决于MPE和MPSE这2项误差指标的大小。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。本研究所建北京市10种森林类型的三储量模型,MPE在1.38%~4.77%之间,均未超过5%;MPSE在6.81%~13.44%之间,均未超过15%。《森林资源规划设计调查技术规程》^[50]对小班调查蓄积量的精度等级分A、B、C三级,要求相对误差分别不超过15%、20%、25%。因此,10种森林类型的三储量模型均满足A级的精度要求,可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。

但有一点值得注意的是,由于连清样地的蓄积量、生物量都是基于一元模型算出,导致在本研究所建模型中平均高所起的作用较小,这从表2和表3中 a_2 与 b_2 的参数值大小上就能反映出来。其中,油松林、侧柏林、栎树林和桦木林这4种森林类型的蓄积量和生物量模型,平均高的参数值甚至已经接近于0,说明其作用几乎可以忽略。因此,要准确反映林分平均高对蓄积量和生物量的贡献,建模基础数据应该基于二元模型计算得出。连清样地数据都是基于一元模型计算的,不能反映林分平均高变化对蓄积量和生物量的影响,从严格意义上讲并不适用于构建林分水平的蓄积量和生物量模型。

本研究可得出: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,而与林分断面积无显著相关;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、生物量和碳储量模型,是林业建模实践中的一种可行做法;本文所建北京市10种森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型,其预估精度达到相关技术规程要求,可在实践中推广试用;为了提高模型的准确度,应采用基于二元模型计算的蓄积量、生物量和碳储量样地水平数据,对所建模型作进一步修正。

参考文献:

- [1] IUFRO. International guidelines for forest monitoring[R]. Vienna: IUFRO World Series; Volume 5, 1994.
- [2] IPCC. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory[R/OL]. [2021-01-05]. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.
- [3] FAO. Global forest resources assessment 2020: Guidelines and specifications[R]. Rome: FRA working paper 189, 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.
- [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.
- [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. LY208-77, 立木材积表[S]. 北京: 中国标准出版社, 1977.
- [8] Luo Yunjian, Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun, 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. LY/T 2260-2014, 立木生物量模型及碳计量参数—油松[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [10] 国家林业局. LY/T 2261-2014, 立木生物量模型及碳计量参数—湿地松[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [11] 国家林业局. LY/T 2262-2014, 立木生物量模型及碳计量参数—云南松[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [12] 国家林业局. LY/T 2263-2014, 立木生物量模型及碳计量参数—马尾松[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [13] 国家林业局. LY/T 2264-2014, 立木生物量模型及碳计量参数—杉木[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [14] 国家林业局. LY/T 2654-2016, 立木生物量模型及碳计量参数—落叶松[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [15] 国家林业局. LY/T 2655-2016, 立木生物量模型及碳计量参数—云杉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [16] 国家林业局. LY/T 2656-2016, 立木生物量模型及碳计量参数—冷杉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [17] 国家林业局. LY/T 2657-2016, 立木生物量模型及碳计量参数—柳杉[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

- [18] 国家林业局. LY/T 2658 - 2016, 立木生物量模型及碳计量参数—栎树[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [19] 国家林业局. LY/T 2659 - 2016, 立木生物量模型及碳计量参数—桦树[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 国家林业局. LY/T 2660 - 2016, 立木生物量模型及碳计量参数—木荷[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [21] 国家林业局. LY/T 2661 - 2016, 立木生物量模型及碳计量参数—枫香[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [22] Shiver B D, Brister G H. Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna* [J]. *Forest Ecology and Management*, 1992, 47: 211 - 223.
- [23] Næsset E. Stand volume functions for *Picea abies* in western Norway [J]. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1995, 10: 42 - 50.
- [24] 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.
- [25] Chamshama S A O, Mugasha A G, Zahabu E. Stand biomass and volume estimation for Miombo woodlands at Kitulungalo, Morogoro, Tanzania [J]. *Southern African Forestry Journal*, 2004, 200: 59 - 69.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, et al. Tree and stand-level biomass estimation in a *Larix decidua* Mill. chronosequence [J]. *Forests*, 2018, 9: 587.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Zeng Weisheng. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China [J]. *Forest Research: Open Access*, 2018, 7: 1.
- [33] 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.
- [34] Fang Jingyun, Chen Anping, Peng Changhui, et al. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998 [J]. *Science*, 2001, 292: 2320 - 2322.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 王艳婷, 李崇贵, 郝利军. 用岭估计估计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.
- [39] Hou Yannan, Wu Huili, Zeng Weixian, et al. Conversion parameters for stand biomass estimation of four subtropical forests in southern China [C]. // 2016 International Conference on Environment, Climate Change and Sustainable Development. DEStech Publications Incorporated, 2017.
- [40] Mei Guangyi, Sun Yujun, Saeed S. Models for predicting the biomass of *Cunninghamia lanceolata* trees and stands in southeastern China [J]. *PLOS ONE*, 2017, 12(1): e0169747.
- [41] Zhao Miaomiao, Yang Jilin, Zhao Na, 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.
- [42] Dong Lihu, Zhang Lianjun, Li Fengri. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountain, northeast China [J]. *Forests*, 2019, 10: 715.
- [43] Soares P, Tome M. Biomass expansion factors for *Eucalyptus globulus* stands in Portugal [J]. *Forest Systems*, 2012, 21(1): 141 - 152.
- [44] 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.
- [45] 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.
- [46] 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.
- [47] Zeng Weisheng, Zhang Huiru, Tang Shouzheng. 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.
- [48] Zeng Weisheng. Using nonlinear mixed model and dummy variable model approaches to construct origin-based single tree biomass equations [J]. *Trees-Structure and Function*, 2015, 29(1): 275 - 283.
- [49] 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.
- [50] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 26424 - 2010, 森林资源规划设计调查技术规程 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [51] 曾伟生, 孙乡楠, 王六如, 等. 基于激光雷达数据估计林分蓄积量及平均高和断面积 [J]. *林业资源管理*, 2020(2): 79 - 86.