

我国森林生物 和碳储 多层次联立模型系统

曾伟生^{1*} 邹文涛² 陈新云¹ 杨学云¹

(1. 国家林业和草原局林草调查规划院, 北京 100714; 2. 中国林科院科信所, 北京 100091)

摘 要:【目的】森林生物量和碳储量模型, 是森林资源调查监测评价的重要计量工具。研建我国各种森林类型的材积源生物量和碳储量模型, 既为估计国家尺度的森林碳储量变化提供科学依据, 也为估计区域和全球尺度的森林碳储量及其碳汇潜力提供重要参考。【方法】基于我国第九次森林资源清查的 52700 个固定样地实测数据, 依据 35 个树种组的立木生物量模型和含碳系数计算出每公顷生物量和碳储量, 再综合利用加权回归、哑变量建模和误差变量联立方程组方法, 按 1 个总体、3 个大类 (第 1 层)、20 个类型 (第 2 层)、74 个亚类 (第 3 层) 建立了基于材积的森林生物量碳储量多层次联立模型系统, 并对 3 个层次模型的评价指标进行了分析, 还与已发表的相关模型进行了对比。【结果】结果表明森林生物量和碳储量模型的评价指标相差很小, 总体平均模型及第 1、2、3 层哑变量模型的确定系数 R^2 分别在 0.78、0.85、0.92、0.95 以上, 平均预估误差 MPE 分别为 0.42%、0.34%、0.24% 和 0.19%, 平均百分标准误差 $MPSE$ 分别在 22%、21%、15% 和 12% 左右, 总体相对误差 TRE 均接近于 0。所建 20 个类型的森林生物量和碳储量模型, 其 R^2 都在 0.87 以上, MPE 均在 3% 以内; 所建 74 个亚类的模型, 其 R^2 都在 0.85 以上, MPE 基本在 5% 以内。已发表的 3 组生物量模型的估计结果存在较大的不确定性, TRE 的变动范围达到 -20%~74%, 但随着建模样本量的增加而逐渐改进。【结论】对森林生物量和碳储量总量的估计, 总体平均模型的 R^2 最低, 第 1、2、3 层哑变量模型的 R^2 依次逐渐提高, $MPSE$ 依次逐渐降低; 但 TRE 和 MPE 差异不大。所建我国森林生物量和碳储量多层次联立模型系统, 为准确估计国家和区域尺度的森林生物量和碳储量现状及变化提供了计量依据。为了提高森林生物量和碳储量估计结果的准确性, 应该尽可能应用第 3 层次的模型。

关 词: 森林生物量; 碳储量; 联立方程组; 误差变量; 哑变量

Multi-level simultaneous models of forest biomass and carbon storage in China

Abstract: 【Objective】 Forest biomass and carbon storage models are important tools for forest resource inventory, monitoring and assessment. Developing forest biomass and carbon storage models for the forest types in China not only provide a scientific basis for estimating forest carbon storage changes at the national level, but also provide an important reference for estimating forest carbon storage and carbon sequestration potential at regional and global scales. 【Method】 Based on the measured data of 52700 permanent plots from the 9th national forest inventory of China, the biomass and carbon storage per hectare were calculated according to the tree biomass models and carbon factors of 35 tree species groups. Then, the volume-based forest biomass and carbon storage models were established for one population, 3 categories (level I), 20 forest types (level II), 74 sub-types (level III) by using weighted regression, dummy variable modeling and error-in-variable simultaneous equations approach. Additionally, the evaluation statistics of three-level models were analyzed, and comparison with previously published models was conducted. 【Results】 The results showed that evaluation statistics of forest biomass and carbon storage models are only slightly different. The determination coefficients (R^2) of population average model, and dummy models of level I, II, and III are more than 0.78, 0.85, 0.92, and 0.95 respectively, the mean percent standard errors (MPSEs) are about 22%, 21%, 15% and 12% respectively, the mean prediction errors (MPEs) are

基金项目: 国家重点研发计划课题“典型人工林立地质量评价与生产力提升技术”(2022YFD2200501)

* 曾伟生为通讯作者

also decreased gradually and all less than 0.5%, and the total relative errors (TREs) are all close to 0. The R^2 of biomass and carbon models for 20 forest types are more than 0.87, and the MPEs are fewer than 3%; and those for 74 sub-types are 0.85 and 5%, respectively. The estimated results from three sets of biomass models published before had great uncertainty, the TREs ranging from -20% to 74%. But the models would gradually improve with the increase of modeling sample size. **【Conclusion】** For the estimation of total forest biomass and carbon storage, the R^2 of population average model is lowest, and the R^2 of dummy models of level I, II, and III are increased gradually while the MPSEs are decreased, and the MPEs and TREs are not significantly different. The multi-level simultaneous models of forest biomass and carbon storage for all forest types in China developed in this study would provide a quantitative basis for accurately estimating status and changes of forest carbon storage at national and regional scales. In order to improve the accuracy of forest biomass and carbon stock estimation results, the models of level III should be applied whenever possible.

Keywords: biomass conversion factor; simultaneous equations; error-in-variable; dummy variable; carbon storage

森林生物量、碳储量与森林蓄积量一样,既是各级森林资源监测的重要指标,更是反映森林生态系统生产力的重要参数(IUFRO,1994; IPCC,2006; FAO,2023)。随着对气候变化问题的日益关注,尤其是随着碳达峰碳中和战略的实施,国际上对森林碳储量及碳汇潜力方面的研究也越来越重视(Molotoks *et al*, 2018; Walker *et al*, 2022)。对森林生物量的估计,既可通过建立立木生物量模型来获得(Somogyi *et al*, 2007; Jagodziński *et al*, 2019a),也可通过建立林分生物量模型或生物量转换因子模型来获得(IPCC,2006; Somogyi *et al*, 2007);而森林碳储量的估计,可通过森林生物量乘以其平均含碳系数得到(IPCC,2006)。根据 Luo 等(2020)的综述,1978年至2013年间,我国学者已发表了近200个树种的5924个立木生物量模型。2014年以来,国家林业局(2015, 2017)有计划地编制了我国主要树种的立木生物量模型,并颁布实施了系列行业标准(LY/T 2260~2264, LY/T 2654~2662)。但是,不论是国外还是国内,发表的林分生物量模型(Shiver *et al*, 1992; 方精云等, 1996; Fang *et al*, 2001; Chamshama *et al*, 2004;王斌等, 2009; Fernando *et al*, 2012; Zhou *et al*, 2016, 2019; Hou *et al*, 2017; Mei *et al*, 2017; Tang *et al*, 2018; Usoltsev *et al*, 2018; Jagodziński *et al*, 2018a, 2018b, 2019a, 2019b; Zhao *et al*, 2019; Dong *et al*, 2019; 曾伟生等, 2021; 张煜星等, 2021a, 2021b)都要显著少于立木生物量模型(Ter-Mikaelian *et al*, 1997; Zianis *et al*, 2005; Lambert *et al*, 2005; 国家林业局,2015,2017; Zeng, 2017,2018; Jagodziński *et al*, 2018a, 2018b)。而林分水平的模型在宏观层面应用更为广泛,因此构建全国各森林类型的生物量模型具有重要现实意义。

在已发表的我国各森林类型的生物量模型中,影响最大的是方精云等基于418组样地数据提出的21种森林类型的材积源生物量模型(方精云等,1996; Fang *et al*, 2001),该模型在很多研究中得到了引用(Zhou *et al*, 2016,2019; Zhao *et al*, 2019; Dong *et al*, 2019)。此外,王斌等(2009)利用1266个不同森林类型样地的数据,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;张煜星等(2021)利用1828个不同森林类型样地的数据,建立了我国10种森林类型的生物量与蓄积量之间的幂函数模型,还同时分7个区域按3种类型建立了21个模型。经分析,这些模型存在3个方面的不足:一是建模样本较少,部分模型建立在小样本基础上。如Fang *et al*(2001)建立的21个模型有18个的建模样地数在30以下,仅落叶松、油松、杉木3种林分的建模样地数超过了30个;王斌等(2009)建立的16个模型,有10个的建模样地数在50以下;张煜星等(2021)建立的10个模型,也有2个的建模样地数不足50。二是建模方法简单,基本都是采用普通最小二乘法,未考虑生物量和蓄积量数据的异方差性。三是评价指标单一,仅提供了确定系数 R^2 (Fang *et al*, 2001; 张煜星等, 2021b)或相关系数 R (王斌等, 2009)这一项评价指标,未提供其他误差方面的评价指标,在应用时难以评估其不确定性。

另外,随着对气候变化的日益关注及双碳战略的实施,森林碳储量的估计越来越受到重视,有很多学者基于所建森林生物量模型来估计森林碳储量及其变化趋势(Zhou *et al*, 2016,2019; Tang *et al*, 2018; 张煜星等, 2021a),但不同森林生物量的含碳系数基本都是采用平均值0.5或0.47。事实上,不同森林类型其生物量的含碳系数是存在一定差异的。曾伟生等(2021)利用2000个样地的实测数据,建立了我国东北地区

10 种主要森林类型的蓄积量生物量和碳储量联立模型，同时获得了每种森林类型的生物量转换因子模型和平均含碳系数。

本研究的主要目标有两个：1）利用第九次全国森林资源清查的 52700 个样地的地面实测数据，综合采用加权回归、哑变量建模和误差变量联立方程组方法(Wang et al, 2008; 曾伟生等,2011,2021; Fu et al, 2016)，按 1 个总体、3 个大类（第 1 层）、20 个类型（第 2 层）、74 个亚类（第 3 层）建立基于材积的森林生物量碳储量多层次联立模型系统；2）对 3 个层次模型的统计指标进行对比分析，为应用于不同尺度时评估其估计值的不确定性提供依据。

1 数据资料

本研究所用数据为第九次全国森林资源清查的固定样地调查资料，以全国为总体，可将其分成针叶林、混交林、阔叶林 3 个大类，再细分成冷杉(*Abies* spp.)林、云杉(*Picea* spp.)林、落叶松(*Larix* spp.)林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林、柏木(*Cupressus* spp.)林、马尾松(*Pinus massoniana*)林、油松(*Pinus tabulaeformis*)林、云南松(*Pinus yunnanensis*)林、其他针叶林、针叶混交林、针阔混交林、阔叶混交林、栎树(*Quercus* spp.)林、桦树(*Betula* spp.)林、杨树(*Populus* spp.)林、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)林、桉树(*Eucalyptus* spp.)林、橡胶(*Hevea brasiliensis*)林、其他硬阔林、其他软阔林共 20 个类型。全国的有效样地数（蓄积量大于 0）为 52700 个，每个样地都基于每木胸径测量数据，采用各个树种的一元立木材积模型和立木生物量模型及含碳系数(国家林业局,2015,2017; Zeng, 2018; 国家标准委,2024)，计算出每公顷蓄积量、生物量（包括地上生物量和地下生物量，但未含林下灌木和草本层生物量）和碳储量。将每种森林类型的全部样地随机抽取其中的 2/3 作为建模样本，剩下 1/3 作为检验样本。表 1 是 20 种森林类型建模样本和检验样本的基本情况。

表 1 20 个森林类型的建模样本和检验样本

Tab. 1 The basic information of modeling samples and validation samples for 20 forest types in China

森林类型 Forest Type		样地数 Number of plots	建模样本 Modeling samples			检验样本 Validation samples		
			样地数 Number of plots	最大蓄积量 Max volume (m³/ha)	最大生物量 Max biomass (t/ha)	样地数 Number of plots	最大蓄积量 Max volume (m³/ha)	最大生物量 Max biomass (t/ha)
			Num ber of plots	Max volu me (m³/ha)	Max bioma ss (t/ha)	Num ber of plots	Max volu me (m³/ha)	Max bioma ss (t/ha)
针叶林 Coniferous	冷杉林 <i>Abies</i> spp.	534	355	1439	764	179	1364	792
	云杉林 <i>Picea</i> spp.	1353	900	941	564	453	800	487
	落叶松林 <i>Larix</i> spp.	2495	1665	485	381	830	522	379
	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	3152	2100	456	257	1052	454	262
	柏木林 <i>Cupressus</i> spp.	1328	885	511	768	443	388	622
	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	2607	1740	319	325	867	333	290
	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	1186	790	306	377	396	275	343
	云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i>	766	510	340	250	256	355	242
	其他针叶林 Other coniferous	1681	1125	471	323	556	414	327
	针叶混交林 Conifer mixed	1898	1265	881	600	633	789	487
混交林 Mixed	针阔混交林 Conifer-broadleaf	4364	2910	650	606	1454	502	436
	阔叶混交林 Broadleaf mixed	13073	8715	732	870	4358	706	723
	栎树林 <i>Quercus</i> spp.	4474	2980	706	875	1494	402	538
阔叶林 Broadleave	桦木林 <i>Betula</i> spp.	2201	1465	472	359	736	420	360
	杨树林 <i>Populus</i> spp.	3924	2615	396	367	1309	380	298
	刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	830	550	188	248	280	193	245
	桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp.	1036	690	261	296	346	195	248
	橡胶林 <i>Hevea brasiliensis</i>	701	465	298	241	236	370	296
s	其他硬阔林 Other hardwood	3368	2245	488	549	1123	443	509
	其他软阔林 Other softwood	1729	1150	381	366	579	422	321

2 建模方法

2.1 类型细分

为了增强建模结果的实用性,在建模样本数据可支撑的前提下,将 20 个森林类型中除油松林、云南松林、刺槐林、桉树林、橡胶林外的 15 个类型再按优势树种(组)(国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会, 2020)或地理区域(曾伟生等, 2010)进行细分,其中 1 个类型(其他针叶林)按优势树种(组)细分为 8 个亚类, 2 个类型(其他硬阔林、其他软阔林)先按优势树种(组)再按地理区域分别细分为 12 和 6 个亚类,其他 12 个类型只按地理区域细分 2~6 个亚类。全国分为华北、东北、华东、中南、西南、西北 6 大地理区域,还可视需要合并为北部(东北+华北+西北)、南部(华东+中南+西南)、西部(西北+西南)等区域。最后, 20 个森林类型共细分为 74 个亚类,具体见图 1。

2.2 模型建立

林分生物量主要与林分蓄积量有关,基于蓄积量的生物量模型应用最为广泛(王斌等, 2009; Jagodziński et al, 2018b,2019b; Zhao et al, 2019; Zhou et al, 2019)。根据 Fang et al(2001)对全国 21 种森林类型的研究结果,林分生物量与蓄积量之间呈线性相关。从 52 700 个样地的每公顷生物量与蓄积量数据的散点图分析,这种线性相关规律也是非常明显的。而且线性模型适于不同尺度应用,不会存在非线性模型可能存在的有偏估计问题(Zhou et al, 2016)。另外,除了总生物量之外,地上和地下生物量同样值得关注,全球森林资源评估就要求分别提供地上和地下生物量(FAO,2023)。地上和地下生物量之比称为根茎比(RSR),不同森林类型的根茎比也是有差异的(IPCC,2006)。为了准确估计不同森林类型的地下生物量,根茎比这一因子尤为重要。在得到森林总生物量估计值后,再乘以平均含碳系数(0.5 或 0.47)就可得到森林碳储量(IPCC,2006;方精云等,1996;Fang et al, 2001)。但是,不同森林类型的含碳系数同样存在差异(曾伟生等,2021)。因此,本研究综合采用含哑变量的误差变量联立方程组方法(Wang et al, 2008; Fu et al, 2016,2017; Zeng et al, 2017),分别 3 个层次构建如下形式的森林生物量和碳储量模型系统:

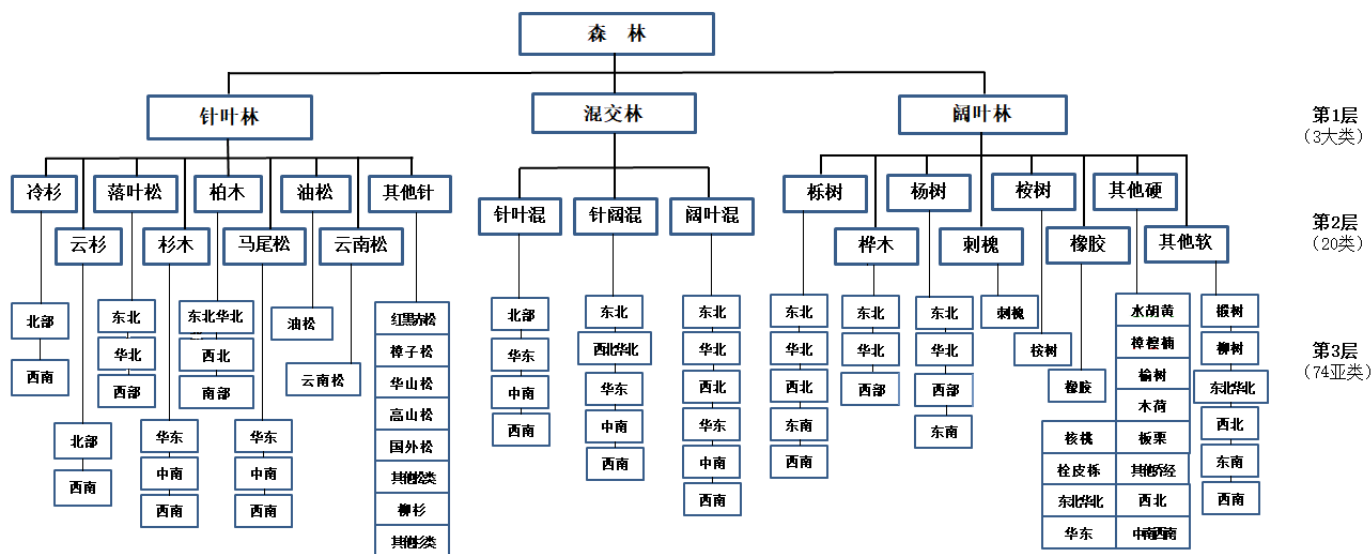


图 1 森林分类结构图

Fig.1 Framework of forest classification

(注:全国分为 6 大地理区域,其中华北包括北京、天津、河北、山西、内蒙 5 省(区、市),东北包括辽宁、吉林、黑龙江 3 省,华东包括上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、山东 7 省市,中南包括河南、湖北、湖南、广东、广西、海南 6 省区,西南包括重庆、四川、贵州、云南、西藏 5 省市,西北包括陕西、甘肃、青海、宁夏、新疆 5 省区。东北、华北、西北合称北部,西北、西南合称西部,华东、中南合称东南,东南、西南合称南部。以上森林分类及地理区域划分未包括台湾、香港和澳门。)

$$\begin{cases} B_T = \sum a_i S_i + (\sum b_i S_i) V + \varepsilon_1 \\ B_A = (\sum c_i S_i) \hat{B}_T + \varepsilon_2 \\ C = (\sum d_i S_i) \hat{B}_T + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中： B_T 为每公顷总生物量（t/ha）， B_A 为地上生物量， C 为每公顷碳储量， V 为每公顷蓄积量（m³/ha），均为无误差变量； $\hat{B}_T$ 为每公顷总生物量估计值，在模型系统（1）的第2、3方程式中属于误差变量； a_i 、 b_i 、 c_i 、 d_i 为模型参数， i 表示某一层次的第 i 个类型； S_i 为哑变量，当属于某一层次的第 i 个类型时取值为1，否则取值为0； ε_1 、 ε_2 、 ε_3 为误差项，假定其服从均值为0的正态分布。将模型（1）中的第1式除以 V ，可得到如下森林生物量转换因子(BCF)模型：

$$B_{CF} = B_T/V = \sum b_i S_i + \sum a_i S_i / V \quad (2)$$

此处的生物量转换因子(BCF)相当于IPCC国家温室气体清单指南中的基本木材密度(D)、生物量扩展因子(BEF)及根茎比(RSR)3个参数的综合(IPCC,2006)，其关系为： $B_{CF}=D \cdot BEF \cdot (1+RSR)$ 。而模型（1）中的第3式的参数 d_i 就相当于含碳系数CF。另外，根据模型（1）中的第2式的参数 c_i 可得到根茎比：

$$R_{SR} = B_B/B_A = (1 - c_i) / c_i \quad (3)$$

由于生物量、碳储量数据与蓄积量数据类似，都具有异方差性，模型（1）应该采用加权回归估计和误差变量联立方程组方法才是合适的(曾伟生等,2011a; Fu *et al*, 2016)。本研究采用的权函数为 $w=1/V^{0.5}$ (Zeng *et al*, 2023)。

2.3 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(曾伟生等,2011b; Fu *et al*, 2017; Zeng *et al*, 2017)。

从实用性角度考虑，一般要求模型的MPE小于3%或5%，MPSE小于15%或20%，TRE在±3%以内，ASE在±5%以内。为了评价模型的广泛适用性，还采用检验样本进行独立交叉检验，计算模型的TRE和ASE，一般要求TRE在±3%以内或不超过MPE，ASE在±5%以内。如果TRE超出±3%的允许误差范围或超过MPE，则表明误差过大；若ASE在±5%~±10%之间，则存在一定系统误差；若ASE超出±10%，则明显存在系统误差。

3 建模结果

利用全部35120个森林样地的每公顷蓄积量、生物量、地上生物量和碳储量数据，分别按1个总体、3个大类、20个类型、74个亚类，采用含哑变量的误差变量联立方程组方法拟合模型（1），其模型参数估计结果及总生物量模型的评价指标见表2。地上生物量和碳储量模型的评价指标除SEE与总生物量模型有显著差异外，其他5项指标均差异很小，故未全部列出。从表2的6项评价指标看，总体相对误差TRE都接近于0，其他5项指标从1个总体到3个大类、20个类型、74个亚类这3个层次的平均水平看，除了与样本量有关的平均预估误差MPE略有增加外（从0.42%到0.60%、1.22%、2.11%），其他4项指标都呈现拟合效果越来越好的趋势，其中确定系数 R^2 逐渐增大（从0.781到0.853、0.928、0.941），估计值的标准差SEE和平均系统误差ASE、平均百分标准误差MPSE都逐渐减少（如MPSE从22.38%到21.03%、14.68%、12.96%）。

从3个大类看， R^2 都在0.78以上，MPE均在1%以内，ASE均在10%以内（其中2个森林类型在5%以内），MPSE在20%左右。利用17580个样地的检验样本数据进行独立交叉检验，总体相对误差TRE均在±0.3%以内，平均系统误差ASE均在±5%以内。

从20个类型看， R^2 都在0.87以上，MPE均在3%以内（其中8个森林类型在1%以内），ASE均在10%以内（其中18个森林类型在5%以内），MPSE仅1个森林类型超过20%，有2个在10%以内。利用检验样本数据进行独立交叉检验，有19个类型的总体相对误差TRE在±3%以内，仅其他针叶林模型（3）

略

表 2 我国森林生物 和碳储 多层次联立模型的参数估计值和评价指标

Tab. 2 The parameter estimates and evaluation indices of multi-level simultaneous models of forest biomass and carbon storage in China

层次 Level	类型 Type	参数估计值 Parameter estimate					评价指标 Evaluation indices					
		a_i	b_i	c_i	$d_i(\text{CF})$	RSR	R^2	SEE/t	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
总体 Population	森林 Forest	1.4864	0.9792	0.7973	0.4891	0.2542	0.781	34.62	0.00	5.30	0.42	22.38
第 1 层 Level I	针叶林 Coniferous	1.6355	0.8129	0.8069	0.4994	0.2393	0.787	35.69	-0.01	8.52	0.80	24.60
	混交林 Mixed	1.7434	1.0463	0.7956	0.4868	0.2569	0.884	25.39	-0.04	3.45	0.45	16.81
	阔叶林 Broadleaved	0.2986	1.1133	0.7959	0.4838	0.2564	0.887	23.06	-0.01	3.93	0.55	21.68
第 2 层 Level I	冷杉林 <i>Abies</i> spp.	5.5779	0.5937	0.8180	0.4951	0.2225	0.873	47.30	-0.06	2.20	2.21	17.30
	云杉林 <i>Picea</i> spp.	1.6095	0.7157	0.7991	0.4901	0.2514	0.914	29.89	-0.01	5.50	1.23	15.65
	落叶松林 <i>Larix</i> spp.	1.0427	0.8228	0.7794	0.4888	0.2830	0.936	14.99	0.00	2.70	0.82	13.28
	杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	0.5904	0.7118	0.8109	0.4969	0.2332	0.936	12.06	0.00	4.36	0.87	14.04
	柏木林 <i>Cupressus</i> spp.	0.4836	1.5336	0.8007	0.5013	0.2489	0.947	22.57	0.00	2.88	1.65	16.47
	马尾松林 <i>Pinus massoniana</i>	1.7401	0.9726	0.8297	0.5162	0.2053	0.954	11.20	0.02	0.91	0.67	10.01
	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.0901	1.1255	0.8098	0.5130	0.2349	0.966	16.18	0.00	0.05	1.66	15.60
	云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.9361	0.6499	0.8453	0.5047	0.1830	0.973	11.89	0.00	3.94	1.71	13.79
	其他针叶林 Other coniferous	0.9884	0.8313	0.8041	0.5009	0.2436	0.874	20.90	-0.03	6.63	1.64	20.41
	针阔混交林 Conifer mixed	0.5828	1.2964	0.8088	0.5014	0.2364	0.921	19.64	0.06	1.69	1.22	14.21
	针阔混交林 Conifer-broadleaf	0.5018	1.0149	0.7961	0.4920	0.2561	0.894	20.58	-0.01	3.37	0.89	15.80
	阔叶混交林 Broadleaf mixed	0.0077	0.9022	0.7938	0.4835	0.2598	0.916	22.67	-0.03	3.19	0.47	15.44
	栎树林 <i>Quercus</i> spp.	0.6954	1.5388	0.7930	0.4810	0.2610	0.917	26.78	-0.01	3.27	0.85	17.44
	桦木林 <i>Betula</i> spp.	0.3333	1.1740	0.7821	0.4867	0.2786	0.898	17.39	0.00	1.77	1.03	14.36
	杨树林 <i>Populus</i> spp.	0.8226	0.8607	0.8246	0.4725	0.2127	0.933	12.21	0.00	1.86	0.78	12.83
	刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.3439	1.2130	0.7832	0.4838	0.2768	0.934	10.75	-0.01	1.94	2.00	14.68
	桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp.	0.5703	0.9935	0.7793	0.5238	0.2832	0.962	8.98	0.00	1.32	1.18	8.88
	橡胶林 <i>Hevea brasiliensis</i>	4.0799	0.8272	0.7981	0.4956	0.2530	0.991	4.10	-0.01	2.48	0.53	5.96
	其他硬阔林 Other hardwood	2.6170	0.9515	0.7880	0.4856	0.2690	0.933	14.37	-0.01	2.95	1.17	17.67
	其他软阔林 Other softwood	1.5064	1.1073	0.7954	0.4873	0.2572	0.896	18.66	-0.02	5.29	1.79	19.75
第 3 层 Level II	冷杉林 1 <i>Abies</i> spp. I	1.9730	0.7767	0.8017	0.4955	0.2473	0.989	13.10	0.00	0.56	1.02	5.09
	冷杉林 2 <i>Abies</i> spp. II	3.6239	0.5359	0.8267	0.4950	0.2096	0.971	23.16	0.01	1.52	1.36	8.97
	云杉林 1 <i>Picea</i> spp. I	1.4994	0.7351	0.7918	0.4900	0.2629	0.899	31.11	0.00	5.75	1.42	16.25
	云杉林 2 <i>Picea</i> spp. II	3.4253	0.6405	0.8282	0.4903	0.2074	0.978	17.05	-0.01	1.63	1.63	8.27
	落叶松林 1 <i>Larix</i> spp. I	0.6576	0.9237	0.7452	0.4885	0.3419	0.967	9.24	0.00	1.35	0.87	9.95
	落叶松林 2 <i>Larix</i> spp. II	0.4562	0.7999	0.7836	0.4888	0.2762	0.939	12.49	0.00	0.81	1.12	10.26
	落叶松林 3 <i>Larix</i> spp. III	2.3320	0.7342	0.8285	0.4895	0.2070	0.973	14.02	0.01	2.47	1.37	11.69
	杉木林 1 <i>Cunninghamia lanceolata</i> I	0.7850	0.6990	0.8100	0.4965	0.2346	0.920	14.32	0.00	4.60	1.40	16.21
	杉木林 2 <i>Cunninghamia lanceolata</i> II	0.4758	0.7229	0.8120	0.4974	0.2315	0.954	8.85	0.00	4.52	1.29	11.56
	杉木林 3 <i>Cunninghamia lanceolata</i> III	0.4392	0.7268	0.8115	0.4973	0.2323	0.953	10.36	0.00	2.99	1.56	12.57
	柏木林 1 <i>Cupressus</i> spp. I	0.0735	1.7647	0.7997	0.5020	0.2505	0.947	9.14	0.00	0.89	2.92	11.70
	柏木林 2 <i>Cupressus</i> spp. II	2.0093	1.6802	0.8006	0.5030	0.2491	0.956	28.59	0.00	2.14	2.54	12.57
	柏木林 3 <i>Cupressus</i> spp. III	1.0093	1.3584	0.8012	0.4995	0.2481	0.968	13.95	0.00	2.07	1.55	10.56
	马尾松林 1 <i>Pinus massoniana</i> I	1.3985	0.9519	0.8303	0.5157	0.2044	0.947	11.84	0.02	1.10	1.29	11.00
	马尾松林 2 <i>Pinus massoniana</i> II	1.8000	1.0408	0.8278	0.5166	0.2080	0.953	10.28	0.02	0.23	1.12	10.08
	马尾松林 3 <i>Pinus massoniana</i> III	1.6417	0.9385	0.8309	0.5163	0.2035	0.979	8.03	0.01	0.38	0.75	7.13
	油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	0.0940	1.1255	0.8098	0.5130	0.2349	0.916	16.18	0.00	0.03	1.66	15.60
	云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i>	0.9394	0.6499	0.8453	0.5047	0.1830	0.909	11.89	0.00	3.94	1.71	13.79
	樟子松林 <i>Pinus sylvestris</i>	0.5574	0.8918	0.7950	0.5163	0.2579	0.873	21.25	0.00	4.26	4.68	17.69
	红赤黑松林 <i>Pinus</i> K.T.D.	0.8327	0.8267	0.8028	0.5065	0.2456	0.864	23.09	0.05	9.86	5.22	24.67
	华山松林 <i>Pinus armandii</i>	0.5115	0.9231	0.8021	0.5175	0.2467	0.981	7.78	0.00	1.02	1.84	8.62
	高山松林 <i>Pinus densata</i>	3.1127	0.6639	0.8267	0.4904	0.2096	0.970	10.63	0.00	0.97	1.86	8.42
	国外松林 Foreign pine	0.7032	0.9988	0.7793	0.4763	0.2832	0.976	6.55	0.00	1.67	1.48	8.85
	其它松树林 Other pine	3.9524	0.8538	0.8331	0.5070	0.2003	0.869	21.56	0.05	1.61	3.99	22.33
	柳杉林 <i>Cryptomeria</i> spp.	0.9519	0.7296	0.7809	0.5052	0.2806	0.968	11.52	-0.01	4.84	2.89	10.82
	其它针叶林 Other coniferous	0.8331	0.7273	0.8079	0.4993	0.2378	0.855	22.33	0.00	1.00	6.42	24.38
	针叶混交林 1 Conifer mixed I	5.2106	0.7982	0.7963	0.4944	0.2558	0.929	23.92	0.06	4.28	2.41	17.35
	针叶混交林 2 Conifer mixed II	2.4575	0.8529	0.8116	0.5033	0.2321	0.915	14.73	-0.02	1.76	1.76	13.81
	针叶混交林 3 Conifer mixed III	1.2449	0.9207	0.8132	0.5047	0.2297	0.959	9.48	-0.01	0.82	1.73	10.35

层次 Level	类型 Type	参数估计值 Parameter estimate					评价指标 Evaluation indices					
		a_i	b_i	c_i	$d_i(\text{CF})$	RSR	R^2	SEE/t	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
第3层 Level I II	针叶混交林4 Conifer mixed IV	4.4595	0.8099	0.8159	0.5044	0.2256	0.906	24.82	0.05	1.71	2.97	13.66
	针阔混交林1 Conifer-broadleaf I	1.8584	0.8430	0.7829	0.4870	0.2773	0.930	17.73	0.00	2.52	1.37	10.22
	针阔混交林2 Conifer-broadleaf II	3.8893	1.1026	0.7938	0.4934	0.2598	0.877	21.66	0.01	0.89	2.35	16.44
	针阔混交林3 Conifer-broadleaf III	1.7448	1.0257	0.7965	0.4918	0.2555	0.935	16.07	-0.01	2.12	1.42	14.12
	针阔混交林4 Conifer-broadleaf IV	1.1497	1.0444	0.7974	0.4950	0.2541	0.940	10.91	-0.01	2.41	1.31	12.54
	针阔混交林5 Conifer-broadleaf V	2.2794	0.8772	0.8121	0.4945	0.2314	0.923	19.06	-0.04	2.89	1.88	14.32
	阔叶混交林1 Broadleaf mixed I	0.4864	0.9751	0.7927	0.4798	0.2615	0.909	19.82	0.00	1.37	0.69	11.40
	阔叶混交林2 Broadleaf mixed II	-0.0928	1.3711	0.7894	0.4838	0.2668	0.927	16.58	0.00	0.75	1.85	14.87
	阔叶混交林3 Broadleaf mixed III	-0.0875	1.3001	0.7965	0.4849	0.2555	0.954	16.91	0.00	1.28	1.02	11.90
	阔叶混交林4 Broadleaf mixed IV	1.3414	1.2308	0.7905	0.4833	0.2650	0.952	17.96	-0.01	3.33	0.80	13.05
	阔叶混交林5 Broadleaf mixed V	1.8432	1.1634	0.7911	0.4865	0.2641	0.960	15.28	-0.02	1.40	0.79	11.35
	阔叶混交林6 Broadleaf mixed VI	0.9649	1.0453	0.8035	0.4863	0.2446	0.956	19.22	-0.03	3.09	1.06	12.15
	栎树林1 <i>Quercus</i> spp. I	-1.0068	1.1471	0.7818	0.4795	0.2791	0.970	13.96	0.00	1.13	0.80	9.89
	栎树林2 <i>Quercus</i> spp. II	-0.0049	1.5550	0.7821	0.4808	0.2786	0.946	15.61	0.00	-0.06	1.14	11.37
	栎树林3 <i>Quercus</i> spp. III	-0.2365	1.4851	0.7968	0.4815	0.2550	0.961	19.38	0.00	0.87	1.34	9.94
	栎树林4 <i>Quercus</i> spp. IV	1.0500	1.4135	0.7912	0.4823	0.2639	0.957	18.15	-0.02	2.81	1.77	14.07
	栎树林5 <i>Quercus</i> spp. V	-0.1926	1.1182	0.8217	0.4820	0.2170	0.969	23.36	0.01	4.84	1.54	11.61
	桦木林1 <i>Betula</i> spp. I	0.1938	0.9346	0.7613	0.4862	0.3135	0.984	6.21	0.00	-0.73	0.88	6.91
	桦木林2 <i>Betula</i> spp. II	1.5641	1.0444	0.7850	0.4868	0.2739	0.858	18.71	0.00	2.50	1.40	15.79
	桦木林3 <i>Betula</i> spp. III	0.7607	1.0042	0.7970	0.4870	0.2547	0.885	22.14	-0.01	3.63	2.82	12.73
	杨树林1 <i>Populus</i> spp. I	0.1542	0.7329	0.7968	0.4731	0.2550	0.982	7.14	0.00	1.33	1.17	11.25
	杨树林2 <i>Populus</i> spp. II	-0.0628	0.9791	0.8170	0.4724	0.2240	0.973	7.49	0.00	1.56	0.72	9.17
	杨树林3 <i>Populus</i> spp. III	-0.3020	0.8946	0.8195	0.4729	0.2203	0.956	11.94	0.01	0.81	1.97	13.26
	杨树林4 <i>Populus</i> spp. IV	-0.3962	0.9141	0.8601	0.4721	0.1627	0.907	12.13	0.01	1.31	1.50	14.09
	刺槐林 <i>Robinia pseudoacacia</i>	0.7447	1.5370	0.7832	0.4838	0.2768	0.934	10.74	0.00	1.75	2.01	14.68
	桉树林 <i>Eucalyptus</i> spp.	0.3307	1.1740	0.7793	0.5238	0.2832	0.962	8.98	0.00	1.33	1.18	8.88
	橡胶林 <i>Hevea brasiliensis</i>	0.8497	0.8604	0.7981	0.4956	0.2530	0.991	4.09	-0.01	2.43	0.53	5.93
	水胡黄林 F.J.P.	0.4219	0.9889	0.7929	0.4822	0.2612	0.908	14.30	0.00	4.38	3.49	14.22
	樟楠樟林 C.S.P.	1.0519	1.1024	0.7934	0.4894	0.2604	0.975	8.00	-0.01	1.08	1.96	7.44
	榆树林 <i>Ulmus</i> spp.	0.7656	1.0968	0.7844	0.4839	0.2749	0.938	10.41	0.00	4.89	2.73	16.44
	木荷林 <i>Schima superba</i>	0.4144	1.2017	0.7728	0.4746	0.2940	0.942	15.88	0.00	1.67	3.81	14.17
	核桃林 <i>Juglans regia</i>	0.3120	1.0375	0.7907	0.4952	0.2647	0.968	2.65	-0.02	1.59	2.76	11.32
	板栗林 <i>Castanea mollissima</i>	0.2104	1.1672	0.7958	0.4943	0.2566	0.943	8.21	-0.01	1.72	3.46	13.91
	栓皮栎林 <i>Quercus variabilis</i>	-0.2029	1.5204	0.7823	0.4945	0.2783	0.963	10.46	0.00	-0.95	3.77	12.58
	其他乔经 Other non-wood	0.4858	1.0736	0.7882	0.4944	0.2687	0.964	5.32	-0.01	2.30	1.86	12.61
	其他硬阔林1 Other hardwood I	0.4491	1.4058	0.7852	0.4834	0.2736	0.919	11.75	-0.01	3.80	4.08	15.92
	其他硬阔林2 Other hardwood II	-0.1049	1.4276	0.7986	0.4842	0.2522	0.980	11.53	0.00	1.87	2.25	13.11
	其他硬阔林3 Other hardwood III	1.0589	1.3343	0.7842	0.4829	0.2752	0.958	14.14	-0.01	5.09	2.74	15.51
	其他硬阔林4 Other hardwood IV	0.4022	1.2749	0.7886	0.4827	0.2681	0.950	18.16	-0.01	4.25	3.67	15.88
	椴树林 <i>Tilia tuan</i>	1.7288	0.8643	0.7949	0.4617	0.2580	0.879	19.92	-0.04	3.26	4.21	15.76
	柳树林 <i>Salix</i> spp.	0.3393	0.9938	0.7948	0.4929	0.2582	0.932	9.15	-0.01	2.21	4.00	16.19
	其他软阔林1 Other softwood I	0.4991	0.9423	0.7900	0.4888	0.2658	0.933	14.43	-0.01	6.15	3.11	21.26
	其他软阔林2 Other softwood II	0.8547	1.3636	0.8010	0.4938	0.2484	0.898	19.83	-0.02	4.27	3.89	19.19
	其他软阔林3 Other softwood III	0.6294	0.9392	0.7895	0.4937	0.2666	0.963	9.45	-0.01	4.70	2.82	16.84
	其他软阔林4 Other softwood IV	1.3184	0.9434	0.8002	0.4891	0.2497	0.953	13.90	-0.04	3.00	2.53	10.55

注：第3层的亚类中，红黑赤松林指红松林、黑松林和赤松林，水胡黄林指水曲柳林、胡桃楸林和黄菠萝林，樟楠樟林指樟树林、楠木林和楠木林，其他乔经林指除橡胶林、核桃林、板栗林、栓皮栎林之外由其他经济树种构成的乔木林；阿拉伯数字代表该类型不同的地理区域，其编号顺序与图1保持一致，如：其他硬阔林1、2、3、4分别指除前述硬阔林之外的东北华北、西北、华东、中南西南4个地理区域的其他硬阔林。

Note: In the sub-types of level III, *Pinus* K.T.D. means *Pinus koraiensis*, *Pinus thunbergii*, and *Pinus densiflora*; F.J.P. means *Fraxinus mandshurica*, *Juglans mandshurica* forest and *Phellodendron amurense*; C.S.P. forest means *Cinnamomum* spp., *Sassafras* spp. and *Phoebe* spp.; Other non-wood means the non-wood forests composed of other tree species except *Hevea brasiliensis*, *Juglans regia*, *Castanea mollissima* and *Quercus variabilis*. The Arabic numerals represent different geographical regions of the type, and their numbering order is consistent with Fig.1. For example, other hardwood I, II, III, and IV represent other hardwood broadleaved forests distributed in north-east & north, north-west, east, and central-south & south-west regions respectively, except the sub-types of hardwood broadleaved forests listed above.

超出此范围（为-3.16%）；平均系统误差 ASE 都在±5%以内（2个类型除外）。

从74个亚类看， R^2 都在0.85以上， MPE 基本在5%以内（其中60个在3%以内，仅红赤黑松和其他杉类超过了5%）， ASE 均在±10%以内（其中70个亚类在±5%以内）， $MPSE$ 仅4个亚类超过20%，有55个在15%以内，其中15个在10%以内。利用检验样本数据进行独立交叉检验，总体相对误差 TRE 有68个亚类的在±3%以内，有3个亚类的 TRE 在±3%~±5%之间，其他3个亚类（红黑赤松、柳杉、板栗）

的 TRE 在 $\pm 5\% \sim \pm 8\%$ 之间; 平均系统误差 ASE 有 66 个亚类的在 $\pm 5\%$ 以内, 有 6 个亚类的 TRE 在 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 之间, 仅有 2 个亚类 (其他杉类、其他松类) 的 ASE 超出了 $\pm 10\%$ 。

以上评价指标是针对每一个大类、类型或亚类, 如果都针对森林这个总体, 则从 3 个大类到 20 个类型、74 个亚类这 3 个层次的联立模型 (1) ~ (3), 其评价指标的变化趋势与前述各层次模型的平均水平类似, 不同之处是 3 个层次的哑变量模型其样本量是相等的, 因此平均预估误差 MPE 尽管都在 0.5% 以下, 但也呈现减少趋势 (见表 3)。

表 3 不同层次联立模型对总体估计的评价指标

Tab. 3 The evaluation indices of multi-level simultaneous models for estimating the population							
模型 Model	层次 Level	R^2	SEE	$TRE/\%$	$ASE/\%$	$MPE/\%$	$MPSE/\%$
(1) 生物量 Biomass	总体 Population	0.781	34.62	0.00	5.30	0.42	22.38
	第 1 层 Level I	0.857	28.04	-0.02	5.07	0.34	20.73
	第 2 层 Level II	0.928	19.88	-0.01	3.01	0.24	15.11
	第 3 层 Level III	0.955	15.80	0.00	2.15	0.19	12.42
(2) 地上生物量 Aboveground biomass	总体 Population	0.796	27.07	0.22	4.74	0.41	21.69
	第 1 层 Level I	0.864	22.07	-0.01	4.35	0.34	20.10
	第 2 层 Level II	0.933	15.55	0.00	2.31	0.24	14.69
	第 3 层 Level III	0.957	12.51	0.00	1.52	0.19	12.11
(3) 碳储量 Carbon storag e	总体 Population	0.786	16.72	0.05	5.48	0.42	22.36
	第 1 层 Level I	0.851	13.94	-0.07	5.32	0.35	21.11
	第 2 层 Level II	0.927	9.79	-0.05	3.06	0.24	15.15
	第 3 层 Level III	0.954	7.76	-0.04	2.14	0.19	12.43

从表 3 可以看出, 森林生物量、地上生物量和碳储量模型的各项评价指标, 除了有量纲的 SEE 有所差别外, 其他 5 项指标之间差异很小, 从应用角度完全可以忽略不计。但从各个层次模型的评价指标看, 明显是第 3 层的模型效果最好, 第 2 层的次之, 第 1 层的更次。譬如对全国森林碳储量的估计, 从 3 个大类的模型到 74 个亚类的模型, 其 R^2 从 0.851 提升到 0.954, MPE 从 0.35% 降至 0.19%, $MPSE$ 从 21.11% 降至 12.43%, 拟合效果改进很大 (见图 2)。三层次联立模型系统为国家、区域和全球尺度的森林生物量和碳储量估计提供了计量框架。为了降低生物量和碳储量估计结果的不确定性, 应该尽可能应用第 3 层次的模型, 尤其是国家及省级尺度的估计更应如此。

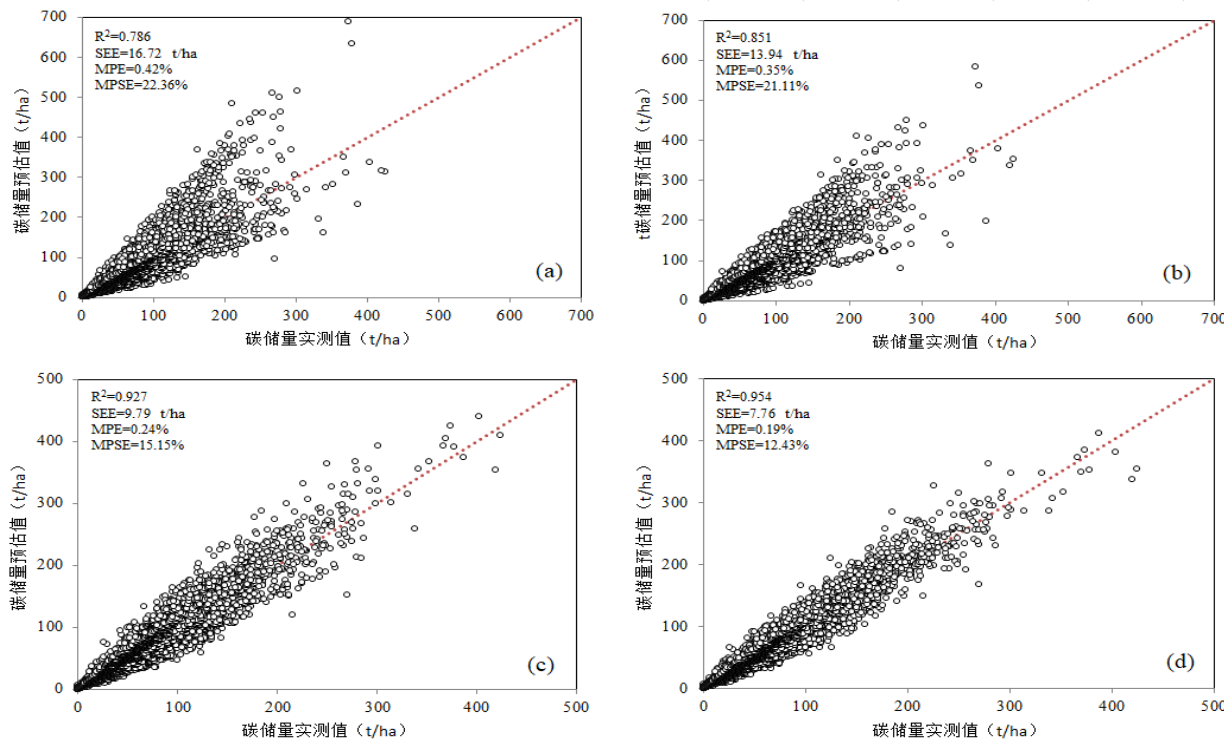


图2 森林碳储 多层次模型拟合效果对比

(a. 总体平均模型; b. 第1层次模型; c. 第2层次模型; d. 第3层次模型)

Fig.2 Comparison of fitting performance of multi-level simultaneous forest carbon storage models

(a. Population average model; b. Level I model; c. Level II model; d. Level III model)

4 讨论与结论

4.1 讨论

4.1.1 与已有相关模型的比较 在引言中提到 Fang *et al*(2001)建立的 21 个森林类型的生物量模型,建模样本数量在 30 以上的仅有落叶松林、杉木林、油松林 3 个模型。作为与本文建模结果的对比,利用这 3 个森林类型的检验样地数据和全部样地数据,对 Fang *et al*(2001)、王斌等(2009)和张煜星等(2021)建立的落叶松林、杉木林、油松林 3 个森林类型的生物量模型一并进行检验,利用(6)(7)二式计算 TRE 和 ASE,其结果列于表 4。

表4 本研究所建模型与 3 种不同来源生物 模型估计结果对比

Tab. 4 Comparison of estimation results of biomass models between this study and other three sources

森林类型 Forest type	检验样本 Validation samples		全部样本 All samples		来源 Source	样本量 Sample size
	TRE/%	ASE/%	TRE/%	ASE/%		
落叶松林 <i>Larix spp.</i>	-10.13	-19.82	-10.41	-19.79	Fang <i>et al</i> (2001)	34
	13.40	12.01	13.11	12.00	王斌等 Wang <i>et al</i> (2009)	39
	8.97	6.33	8.88	6.44	张煜星等 Zhang <i>et al</i> (2021)	241
	-0.29	3.13	-0.10	3.32	本研究 This study	1665
杉木林 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	6.10	-9.55	6.68	-8.75	Fang <i>et al</i> (2001)	56
	14.01	13.12	14.37	13.45	王斌等 Wang <i>et al</i> (2009)	70
	17.08	10.84	17.40	11.39	张煜星等 Zhang <i>et al</i> (2021)	88
	-0.28	3.75	-0.09	4.21	本研究 This study	2100
油松林 <i>Pinus tabulaeformis</i>	33.26	20.89	33.88	20.99	Fang <i>et al</i> (2001)	82
	38.56	33.33	39.52	33.28	王斌等 Wang <i>et al</i> (2009)	147
	24.27	14.11	24.99	14.14	张煜星等 Zhang <i>et al</i> (2021)	699
	-0.60	-0.47	-0.20	-0.58	本研究 This study	790

从表 4 可以看出, 3 组模型的总体相对误差 TRE 都超出了 $\pm 3\%$ 的范围, 其中 2 个油松林模型甚至超过了 30%; 平均系统误差 ASE 都超出了 $\pm 5\%$ 的范围, 其中王斌等(2009)的油松林模型也超过了 30%。3 组模型的估计效果大体随着样本量的增加而逐渐改进, 但不同森林类型之间存在差异。总体来看, 张煜星等(2021)建立的模型优于王斌等(2009)建立的模型, 而以 Fang *et al*(2001)建立的模型误差最大。通过与本研究所建模型参数进行对比, 发现方精云等所建模型的截距参数都要偏大, 而斜率参数都要偏小。之所以其参数估计值出现大的偏差, 首要原因应该是参数估计方法不恰当, 采用的是普通回归而不是加权回归。其次, 样本量的大小及样本结构的好坏也是不可忽略的影响因素。表 4 所列的是建模样本量超过 30 的 3 种森林类型的检验结果, 其 TRE 的变动范围就达到-10.41%~33.88%; 其他 18 种森林类型的建模样本量均在 30 以下, 甚至有 2 个类型的样本量在 10 以下, 用于森林生物量估计的不确定性无疑会更大。由于 Fang *et al*(2001)的建模类型划分与本研究不完全相同, 故不方便一一检验。从其他 18 种森林类型中挑选了能与本研究的类型、亚类或其组合对应的 8 种类型(云冷杉林、柏木林、马尾松云南松林、樟子松林、华山松林、桦木林、杨树林、桉树林)进行了检验, 其 TRE 的变动范围达到了-20.02%~74.01%, ASE 的变动范围达到了-19.32%~77.62%, 由此可知具有很大的不确定性。

图 3 展示了落叶松林生物量模型(1)与 3 组对比模型基于全部 2495 个样地的检验效果。可以看出, 因为 Fang *et al*(2001)的模型其截距参数 $a_0=33.806$, 会得出每公顷蓄积量为 0 的落叶松林其生物量高达 3.8 t/ha 的结果, 从而导致每公顷蓄积量较小的林分, 其生物量估计结果出现正偏; 每公顷蓄积量较大的林

分，其生物量估计结果出现负偏。另外 2 个生物量模型属于非线性模型，尽管不存在截距的问题，但随着生物量的增加，其系统偏差也逐渐增加，导致其残差分布明显不为随机分布（可从平均系统误差 ASE 得到体现）。杉木林、油松林这 2 个森林类型的生物量模型也存在类似问题，为省篇幅，不再详述。

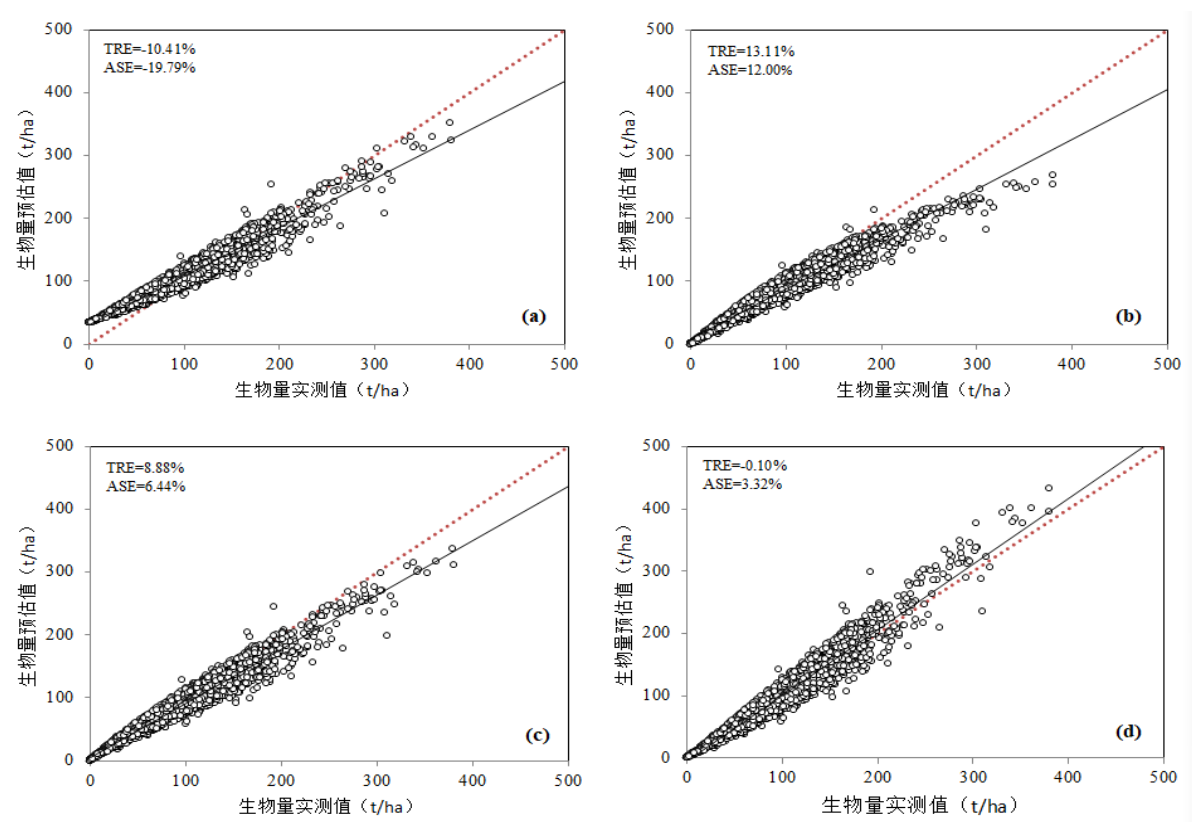


图 3 落叶松生物 模型（1）与 3 组模型的拟合效果对比

（a. Fang et al(2001)模型；b. 王斌等(2009)模型；c. 张煜星等(2021)模型；d. 本研究模型）

Fig. 3 Comparison of fitting performance between model (1) and other three models for larch

（a. Model from Fang et al (2001); b. Model from Wang et al (2009); c. Model from Zhang et al (2021); d. Model in this study）

4.1.2 关于截距参数为负的问题 表 2 中第 3 层次的生物量模型，74 个亚类中有 11 个的截距参数出现了负值，从而会导致蓄积量很小或趋于 0 的幼龄林，其生物量的估计值为负。为此，对这 11 个亚类的模型参数值重新进行了估计，其中 4 类栎树林、3 类杨树林、2 类阔叶混交林的参数估计采用含哑变量的误差变量联立方程组方法，其他 2 个亚类的参数估计采用误差变量联立方程组方法。如果截距参数依然小于 0，则适当调整权函数，以确保截距参数大于 0。表 5 给出了重新拟合的模型参数估计结果及生物量模型（1）的评价指标。

表 5 11 个亚类生物 和碳储 联立模型的参数估计值和评价指标

Tab. 5 The parameter estimates and evaluation indices of simultaneous forest biomass and carbon storage models f or 11 sub-types

亚类 Sub-type	参数估计值 Parameter estimate					评价指标 Evaluation indices					
	a_i	b_i	c_i	$d_i(\text{CF})$	RSR	R^2	SEE/t	TRE/%	ASE/%	MPE/%	MPSE/%
阔叶混交林2 Broadleaf mixed II	0.3940	1.3619	0.7893	0.4838	0.2669	0.927	16.60	-0.01	-0.82	1.86	14.74
阔叶混交林3 Broadleaf mixed III	0.6511	1.2911	0.7964	0.4849	0.2557	0.955	16.90	0.01	-0.31	1.02	11.38
栎树林 1 <i>Quercus</i> spp. I	0.2090	1.1363	0.7817	0.4795	0.2793	0.970	14.16	0.01	-2.87	0.81	8.46
栎树林 2 <i>Quercus</i> spp. II	0.3647	1.5479	0.7820	0.4808	0.2788	0.946	15.61	0.01	-1.68	1.14	11.84
栎树林 3 <i>Quercus</i> spp. III	0.3070	1.4795	0.7968	0.4815	0.2550	0.961	19.33	0.00	-0.67	1.34	10.01
栎树林 5 <i>Quercus</i> spp. V	0.7385	1.1107	0.8216	0.4820	0.2171	0.969	23.29	0.00	1.98	1.53	11.01

杨树林 2 <i>Populus</i> spp. II	0.3080	0.9727	0.8170	0.4724	0.2240	0.973	7.48	0.01	-0.92	0.72	10.08
杨树林 3 <i>Populus</i> spp. III	0.0941	0.8891	0.8194	0.4729	0.2204	0.956	11.96	0.00	-1.23	1.97	12.92
杨树林 4 <i>Populus</i> spp. IV	0.4810	0.9021	0.8600	0.4721	0.1628	0.908	12.10	0.01	-0.82	1.50	13.76
栓皮栎林 <i>Quercus variabilis</i>	0.0492	1.5131	0.7823	0.4945	0.2783	0.963	10.52	0.00	-4.88	3.79	12.73
其他硬阔林 2 Other hardwood III	0.1409	1.4235	0.7985	0.4842	0.2523	0.980	11.49	0.00	0.04	2.24	13.33

与表 2 中的相应模型相比,重新拟合的 11 个亚类的联立模型各项评价指标总体上变化不大,个别模型(如其他硬阔林 2)有明显改进。利用检验样本数据进行独立交叉检验,总体相对误差 TRE 有 10 个亚类的在 $\pm 3\%$ 以内,只有 1 个亚类(杨树林 4)的 TRE 在 $\pm 3\% \sim \pm 5\%$ 之间,与重新拟合前的检验结果一致;平均系统误差 ASE 有 9 个亚类在 $\pm 5\%$ 以内,有 2 个亚类(阔叶混交林 2 和栓皮栎)的 TRE 在 $\pm 5\% \sim \pm 10\%$ 之间。

由此可知,尽管采用含哑变量的误差变量联立方程组方法,可以一次性建立包含多种类型的森林生物量和碳储量联立模型,具有简便易行的特性。但是,如果其中少数模型参数出现异常,则仍需单独重新建模作为补充和修正。

4.2 结论

本研究基于全国第九次森林资源清查的 52700 个固定样地实测数据,综合采用加权回归、哑变量建模和误差变量联立方程组方法,按 1 个总体、3 个类型组(第 1 层)、20 个类型(第 2 层)、74 个亚类(第 3 层)建立了基于材积的森林生物量碳储量多层次联立模型系统,并对 3 个层次模型的评价指标进行了对比分析。可以得出以下结论:

1) 本研究所建 20 个森林类型的生物量和碳储量模型,其确定系数 R^2 都在 0.87 以上, MPE 均在 3% 以内;74 个亚类的森林生物量和碳储量模型,其确定系数 R^2 都在 0.85 以上, MPE 基本在 5% 以内。这些模型,为准确估计国家、区域和全球尺度的森林生物量和碳储量现状及变化提供了计量依据。

2) 对森林生物量和碳储量总量的估计,第 3 层的模型效果最好,第 2 层的次之,第 1 层的更次。为了提高森林生物量和碳储量估计结果的准确性,应该尽可能应用第 3 层次的模型,尤其是国家尺度的估计更应如此。

3) 用本研究数据对已发表的 3 组生物量模型进行了适用性检验,发现其估计结果存在较大的不确定性,但会随着建模样本量的增加而逐渐改进。

参 考 文 献

方精云,刘国华,徐嵩龄. 1996. 我国森林植被的生物量和净生产量. 生态学报,16(5):497-508.

(Fang J Y, Liu G H, Xu S L. 1996. Biomass and net production of forest vegetation in China. Acta Ecologica Sinica, 16(5), 497-508. [in Chinese])

国家林业局. 2015. 立木生物量模型及碳计量参数—油松(LY/T 2260-2014). 北京:中国标准出版社.

(State Forestry Administration. 2015. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus tabulaeformis* (LY/T 2260-2014). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])

国家林业局. 2015. 立木生物量模型及碳计量参数—湿地松(LY/T 2261-2014). 北京:中国标准出版社.

(State Forestry Administration. 2015. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus elliottii* (LY/T 2261-2014). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])

国家林业局. 2015. 立木生物量模型及碳计量参数—云南松(LY/T 2262-2014). 北京:中国标准出版社.

(State Forestry Administration. 2015. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus yunnanensis* (LY/T 2262-2014). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])

国家林业局. 2015. 立木生物量模型及碳计量参数—马尾松(LY/T 2263-2014). 北京:中国标准出版社.

(State Forestry Administration. 2015. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Pinus massoniana* (LY/T 2263-2014). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])

国家林业局. 2015. 立木生物量模型及碳计量参数—杉木(LY/T 2264-2014). 北京:中国标准出版社.

- (State Forestry Administration. 2015. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Cunninghamia lanceolata* (LY/T 2264-2014). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—落叶松(LY/T 2654-2016). 北京:中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Larix* (LY/T 2654-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—云杉(LY/T 2655-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Abies* (LY/T 2656-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—冷杉(LY/T 2656-2016). 北京: 中国标准出版社
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Picea* (LY/T 2655-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—柳杉(LY/T 2657-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Cryptomeria* (LY/T 2657-2016). Beijing: China Standards Press, 2017. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—榧树(LY/T 2658-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Quercus* (LY/T 2658-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—桦树(LY/T 2659-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Betula* (LY/T 2659-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—木荷(LY/T 2660-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Liquidambar formosana* (LY/T 2660-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家林业局. 2017. 立木生物量模型及碳计量参数—枫香(LY/T 2661-2016). 北京: 中国标准出版社.
- (State Forestry Administration. 2017. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for *Robinia pseudoacacia* (LY/T 2661-2016). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 2020. 森林资源连续清查技术规程(GB/T 38590). 北京: 中国标准出版社.
- (State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. 2020. Technical regulations for continuous forest inventory (GB/T 38590). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 国家市场监督管理总局、国家标准化管理委员会. 2024. 主要树种立木生物量模型与碳计量参数(GB/T 43648). 北京: 中国标准出版社.
- (State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. 2024. Tree biomass models and related parameters to carbon accounting for major tree species (GB/T 43648). Beijing: China Standards Press. [in Chinese])
- 王斌, 刘某承, 张彪. 2009. 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. 林业资源管理, (1): 35-42.
- (Wang, B, Liu M C, Zhang B. 2009. Dynamics of net production of Chinese forest vegetation based on forest inventory data. Forest Resources Management, (1): 35-42. [in Chinese])
- 曾伟生, 孙乡楠, 王六如, 等. 2021. 东北林区 10 中主要森林类型的蓄积量生物量和碳储量模型研建. 北京林业大学学报, 43(3): 1-8.
- (Zeng W S, Sun X N, Wang L R, et al. 2021. Developing stand volume, biomass and carbon stock models for ten major forest types in forest region of northeastern China. Journal of Beijing Forestry University. 43(3), 1-8. [in Chinese])
- 曾伟生, 唐守正. 2011. 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. 林业科学研究, 24(2): 137-143.
- (Zeng W S, Tang S Z. 2011. Bias correction in logarithmic regression and comparison with weighted regression for non-linear models. Forest Research, 24(2), 137-143. [in Chinese])
- 曾伟生, 唐守正. 2011. 立木生物量模型的优度评价和精度分析. 林业科学, 47(11): 106-113.
- (Zeng W S, Tang S Z. 2011. Evaluation and precision analysis of tree biomass equations. Scientia Silvae Sinicae, 47(11): 106-113. [in Chinese])

曾伟生,唐守正,黄国胜,等.2010. 全国立木生物量建模总体划分与样本构成研究.林业资源管理, (3): 16-23.

(Zeng, W S, Tang S Z, Huang G S, *et al.* 2010. Population classification and sample structure on modeling of single-tree biomass equations for national biomass estimation in China. *Forest Resources Management*, (3): 16-23. [in Chinese])

张煜星,王雪军. 2021.全国森林蓄积生物量模型建立和碳变化研究.中国科学:生命科学, 51: 199-214.

(Zhang Y X, Wang X J. 2021. Study on forest volume-to-biomass modeling and carbon storage dynamics in China. *Scientia Sinica Vitae*, 51:199-214. [in Chinese])

张煜星,王雪军,蒲莹,等. 2021. 1949-2018 年中国森林资源碳储量变化研究. 北京林业大学学报, 43(5): 1-14.

(Zhang Y X, Wang X J, Pu Y, *et al.* 2021. Changes in forest resource carbon storage in China between 1949 and 2018. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(5), 1-14. [in Chinese])

Chamshama S A O, Mugasha A G, Zahabu E. 2004. Stand biomass and volume estimation for Miombo woodlands at Kitulungalo, Morogoro, Tanzania[J]. *Southern African Forestry Journal*, 200: 59-69.

Dong L H, Zhang L J, Li F R. 2019. Evaluation of stand biomass estimation methods for major forest types in the eastern Da Xing'an Mountain, northeast China. *Forests*, 10: 715. doi:10.3390/f10090715.

Fang J Y, Chen A P, Peng C H, *et al.* 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 292: 2320-2322.

FAO. 2023. Global forest resources assessment 2025: Guidelines and specifications. Rome: FRA working paper 193.

Fernando C D, Esteban G G, Ulises D A, *et al.* 2012. Aboveground stand-level biomass estimation: A comparison of two methods for major forest species in northwest Spain. *Annals of Forest Science*, 69: 735-746.

Fu L Y, Lei Y C, Wang G X, *et al.* 2016. Comparison of seemingly unrelated regressions with error-in-variable models for developing a system of nonlinear additive biomass equations. *Trees*, 30 (3): 839-857.

Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z. 2017. Individual tree biomass models to estimate forest biomass for large spatial regions developed using four pine species in China. *Forest Science*, 63 (3): 241-249.

Hou Y N, Wu H L, Zeng W X, *et al.* 2017. Conversion parameters for stand biomass estimation of four subtropical forests in southern China. *DEStech Publications*, doi:10.12783/dtees/eccsd2016/5846.

IPCC. 2006. IPCC guidelines for national greenhouse gas inventory. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>.

IUFRO. 1994. International guidelines for forest monitoring. Vienna: IUFRO World Series, Volume 5.

Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, *et al.* 2018. How do tree stand parameters affect young Scots pine biomass? - Allometric equations and biomass conversion and expansion factors. *Forest Ecology and Management*, 409: 74-83.

Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, *et al.* 2018. Tree- and stand-level biomass estimation in a *Larix decidua* Mill. chronosequence. *Forests*, 9: 587.

Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, *et al.* 2019. Tree and stand level estimations of *Abies alba* Mill aboveground biomass. *Annals of Forest Science*, 76: 56. doi: 10.1007/s13595-019-0842-y.

Jagodziński A M, Dyderski M K, Gesikiewicz K, *et al.* 2019. Effects of stand features of aboveground biomass and biomass conversion and expansion factors based on a *Pinus sylvestris* L. chronosequence in western Poland. *European Journal of Forest Research*, 38: 673-683. doi:10.1007/s10342-019-01197-z.

Lambert M C, Ung C H, Raulier F. 2005. Canadian national tree aboveground biomass models. *Can J For Res*, 35:1996-20.

Luo Y J, Wang X K, Ouyang Z Y, *et al.* 2020. A review of biomass equations for China's tree species. *Earth Syst Sci Data*, 12(1): 21-40.

Mei G Y, Sun Y J, Saeed S. 2017. Models for predicting the biomass of *Cunninghamia lanceolata* trees and stands in southeastern China. *PLoS ONE*, 12,(1): 1-14. doi:10.1371/journal.pone.0169747.

Molotoks A, Stehfest E, Doelman J, *et al.* 2018. Global projections of future cropland expansion to 2050 and direct impacts on biodiversity and carbon storage. *Global Change Biology*, 24:5895-5908.

Shiver B D, Brister G H. 1992. Tree and stand volume functions for *Eucalyptus saligna*. *Forest Ecology and Management*, 47(s1-4): 211-223.

Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, *et al.* 2007. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *Eur J Forest Res*, 126: 197-207.

Tang X L, Zhao X, Bai Y F, *et al.* 2018. Carbon pools in China's terrestrial ecosystems: new estimates based on an intensive field survey. *PNAS*, 115: 4021-4026. doi:10.1073/pnas.1700291115.

Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. 1997. Biomass Equations for Sixty-five North American Tree Species. *Forest Ecology and Management*, 97: 1-24.

- Usoltsev V A, Shobairi S O R, Chasovskikh V P. 2018. Triple harmonization of transcontinental allometric of *Picea* spp. and *Abies* spp. forest stand biomass. *Eco Env & Cons*, 24 (4): 1966-1972.
- Walker W S, Gorelik S R, Cook-Patton S C, *et al.* 2022. The global potential for increased storage of carbon on land. *PNAS*, 119(23): e2111312119.
- Wang M, Borders B E, Zhao D. 2008. An empirical comparison of two subject-specific approaches to dominant heights modeling the dummy variable method and the mixed model method. *For. Ecol. Manage*, 255: 2659-2669.
- Zeng W S. 2017. Developing tree biomass models for eight major tree species in China// Tumuluru J S (ed.). *Biomass Volume Estimation and Valorization for Energy*. Croatia: InTech. doi: 10.5772/65664.
- Zeng W S. 2018. Developing one-variable individual tree biomass models based on wood density for 34 tree species in China. *Forest Research: Open Access*, 7(1): 217-221. doi: 10.4172/2168-9776.1000217.
- Zeng W S, Zhang L J, Chen X Y, *et al.* 2017. Construction of compatible and additive individual-tree biomass models for *Pinus tabulaeformis* in China. *Canadian Journal of Forest Research*, 47: 467-475.
- Zeng W S, Chen X Y, Yang X Y. 2023. Estimating changes of forest carbon storage in China for 70 years (1949-2018). *Scientific Reports*, 13: 16864.
- Zhao M M, Yang J L, Zhao N, *et al.* 2019. 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. *Forest Ecology and Management*, 448: 528-534.
- Zhou X L, Lei X D, Liu C X, *et al.* 2019. Re-estimating the changes and ranges of forest biomass carbon in China during the past 40 years. *Forest Ecosystems*, 6: 51.
- Zhou X L, Lei X D, Peng C H, *et al.* 2016. Correcting the overestimate of forest biomass carbon on the national scale. *Method Ecol Evol*, 7:447-455.
- Zianis D, Muukkonen P, Mäkipää R, *et al.* 2005. Biomass and stem volume equations for tree species in Europe. *Silva Fennica, Monographs* 4.