

中国主要树种通用二元材积模型与推导形数模型研究

程文生 冯仲科 于景鑫

(北京林业大学精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 以全国主要树种的二元材积模型、各省市一元材积表为基础材料,以取样径阶为 1 cm 间隔所生成的 2 082 组胸径(D)、树高(H)、材积(V)数据为基础数据,构建通用二元材积模型与推导形数模型。其中,通用二元材积模型利用 SPSS 软件进行回归建模,构建形式为山本式的 1 个全国通用二元材积模型、2 个全国通用针/阔叶二元材积模型及 6 个全国分地区通用二元材积模型。结果表明,各模型的拟合决定系数 R^2 均在 0.984 以上,选取 6 种回归模型评价指标进行模型验证,验证结果表明各模型的总相对误差和平均系统误差基本都不超过 3%,在特定情况下,可以取代现有规模庞大的分地域树种一元/二元立木材积模型库进行材积估算。推导形数模型采用二元材积式之一的斯泊尔式,该公式利用基础数据对形数 f 进行推导,得到全国六大区域总体/针叶/阔叶 16 个通用推导形数。结果表明,各模型的决定系数 R^2 在 0.983 以上,验证结果表明各模型的总相对误差基本都控制在 $\pm 3\%$ 内,总体精度较高。

关键词: 胸径; 树高; 二元材积; 通用模型; 推导形数; 评价指标

中图分类号: S758 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)03-0245-08

Development of Generic Standard Volume Model and Derived Form Factor Model for Major Tree Species in China

CHENG Wensheng FENG Zhongke YU Jingxin

(Precision Forestry Key Laboratory of Beijing, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: In forest surveys, volume tables are usually used for standing wood volume estimation. From the national to the provincial scales and even forest farm all have their own single and binary tree volume tables which have characteristics of a large number of samples and high accuracy. However, due to the great number of models that the form is not unified, it is difficult to identify the large species and other reasons, resulting in poor efficiency in table look-up. It is inconvenient to estimate standing wood volume by using volume tables for some applications with no high precision requirement, such as estimation of wood value by lumberman, growing stock estimation by UAV and remote sensing retrieval of standing parameters in wide area. Therefore, a simple and quick standing tree volume estimation model is required. Based on standard volume model of national major tree species and single entry volume table of all provinces and municipalities, the regression model was made by SPSS to process all the data of 2 082 groups of diameter at breast height (D), height of tree (H) and volume (V) generated by 1 cm sampling diameter class, and then the generic standard volume models and derived form factor (f) models were built. Among them, generic standard volume models included a nationwide standard volume model, two nationwide needle-leaved and broad-leaved standard volume models and six standard volume models that made by using SPSS software with form of Yamamoto type. The result of model fitting showed that the fitting determination coefficients (R^2) were all above 0.984 and the effects of model fitting were good. Evaluation indicators of six regression models were selected to conduct model verification, and the verification results showed that the indicators of total relative error (TRE) and average system error (MSE) of all models were almost within the range of $\pm 3\%$. Using basic data to derive the value of f to get 16 overall, needle-leaved and broad-leaved derived form factor models. The validation result of generic standard volume models and derived form factor models showed that in specific situation, it can replace existing regional tree species' single entry and standard tree volume model to estimate volume, which avoided the process of in-place wood recognition and table look-up, and it is of practical

收稿日期: 2016-07-08 修回日期: 2016-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41371001)、北京市自然科学基金项目(6161001)和北京林业大学青年教师科学研究中长期项目(2015ZCQ-LX-01)

作者简介: 程文生(1991—),男,博士生,主要从事林业 3S 技术集成研究, E-mail: wenshengcheng@bjfu.edu.cn

通信作者: 冯仲科(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事森林计量学和精准林业研究, E-mail: fengzhongke@126.com

significance to guarantee precision and simplify evaluation process of standing tree volume.

Key words: diameter at breast height; tree height; binary volume; general model; derived form factor; evaluation index

引言

立木材积表是我国森林资源清查的重要工具之一,其主要包括一元材积表和二元材积表,其中一元材积表又分为胸径一元表和地径一元表^[1]。30多年前,农林部编制并颁布实施了二元立木材积表^[2]。通过一/二元材积表可计算立木材积进而求得林木蓄积量,即区域内活立木的材积总和^[3-6]。立木材积是反映单株木体体积的指标,立木材积的变化则是该地区森林生态变化、健康状况和森林经营利用的最重要的反映^[7]。

在实际森林调查中,通常使用材积表来进行立木材积的测算^[8-9],从全国到各省市甚至到林场级别基本都有各自对应的一元材积表以及个别单位单独编制的二元材积表供使用,有样本数量大、精度高等特点,同时也因为模型数量众多、形式不统一、現地树种识别难度较大等原因,导致查表效率低下。对于很多精度要求不高的用途,例如木材商粗算木材价值、无人机蓄积量估算和大范围地区林分参数遥感反演等^[10],常用的查表方法就显得过于烦琐,需要一个简单快捷的立木材积估算模型^[11]。为此本文建立通用二元材积模型和推导形数模型,以适用于某地区所有针/阔树种统一的材积预估。在保证精度的前提下,共研究和建立1个全国通用二元材积模型、2个全国通用针/阔叶二元材积模型、6个区域性通用二元材积模型以及全国六大区域总体/针叶/阔叶16个通用推导形数模型。

1 数据与方法

1.1 数据资料

通过收集全国主要树种的二元材积模型、各省市一元材积表作为数据基础来源,其中作为行业标准的二元材积模型形式为 $V = aD^bH^c$,该式是在全国各地197 000株样木数据的基础上进行整理和编制的,涵盖了我国180个树种,最终形成了35个针叶树二元立木材积表和21个阔叶树二元立木材积表,共56个二元立木材积表,编表系统误差一般在 $\pm 1\%$ 以内,少数在 $\pm 3\%$ 范围内^[12-13]。

各省市一元材积表多以印刷表格的形式呈现,通过对各省市材积表内各个树种的样木数据进行分析处理,将每个树种回归至形式为 $V = aD^b$ 的模型^[14]。

1.1.1 全国区域划分

模型的划分按照全国建立一个统一的二元材积

模型、分树种建立全国针叶/阔叶二元材积模型及分区域建立6个通用二元模型展开,其中分区域模型综合考虑各树种(组)林木的蓄积、分布、行政边界、生态区域等因素,将全国划分为六大区域:东北地区(黑龙江及内蒙古东部、吉林、辽宁)、华北地区(北京、天津、河北、山西、山东、河南及内蒙古中部)、西北地区(陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆及内蒙古西部)、南方地区(上海、江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、海南、重庆、贵州)、西南地区(四川、云南)、西藏地区,区域划分如图1^[15]所示。

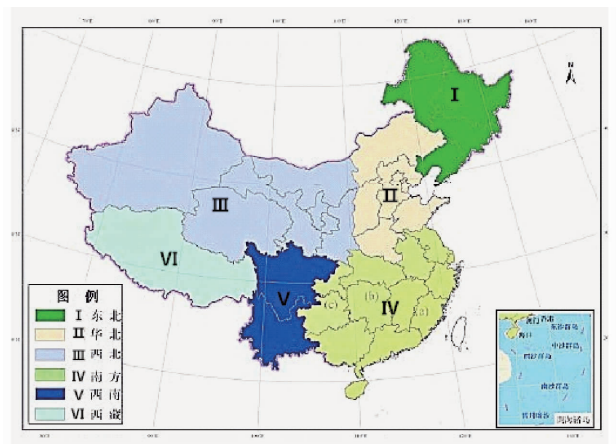


图1 六大区域划分图

Fig. 1 Diagram of six regions in China

1.1.2 基础数据构建

将全国二元材积表中的每一个树种的胸径(D)从5 cm起,每间隔1 cm建立一个样本,根据各省市的一元材积表确定各地最大样本胸径(D)及相对应的材积(V)范围,将得到的胸径(D)、材积(V)数据通过二元材积表反推出对应的树高(H),共生成2 082组 D 、 H 、 V 数据^[16]。其中,从各省市每个树种的 D 、 H 、 V 数据中随机选择75%的数据作为建模样本,剩余的25%数据为验证样本。

1.2 建模方法

1.2.1 回归模型拟合

为了便于模型的实际使用,确保模型的应用价值,中国主要树种通用二元材积模型选择与国家二元材积模型相同的形式,即 $V = aD^bH^c$,同时提出推导形数模型,其采用的模型形式为二元材积式之一的斯泊尔式,即 $V = fD^2H$,其中参数 f 在本文中被定义为推导形数,利用SPSS 21.0软件的“非线性回归”功能进行模型的回归分析,将参数 a 、 b 、 c 及 f 值初始化为1^[17-18],选择Levenberg-Marquardt估计方法对各样本数据进行回归分析,最终求得 a 、 b 、 c

及 f 的参数值。

1.2.2 回归模型评价

评价模型是否最优的方法有很多,但在林业当中通常用决定系数(R^2)、估计值标准差、总相对误差、平均系统误差、平均预估误差和平均百分标准误差等 6 项指标作为基本评价指标,指标具体计算公式如表 1 所示。式中: y_i 为实际观测值; \hat{y}_i 为模型预估值; \bar{y} 为样本平均值; n 为样本单元数; p 为参数个数; t_α 为置信水平 α 时的 t 值^[19-20]。

在这 6 项评价指标中,决定系数和估计值标准

表 1 基本检验指标

Tab.1 Basic parameters of model evaluation

检验指标	计算公式
决定系数	$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$
总相对误差	$R_{TRE} = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i} \times 100$
估计值标准差	$R_{SEE} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{(n - p)}}$
平均系统误差	$R_{MSE} = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i / n} \times 100$
平均百分标准误差	$R_{MPSE} = \frac{\sum y_i - \hat{y}_i / \hat{y}_i}{n} \times 100$
平均预估误差	$R_{MPE} = t_\alpha (R_{SEE} / \bar{y}) / \sqrt{n} \times 100$

表 2 全国主要树种通用二元材积模型的参数估计值和统计指标

Tab.2 Estimations and statistics of standard volume model parameters for major tree species in nationwide

模型类型	a	b	c	决定系数	总相对误差/%	估计值标准差/ m^3	平均系统误差/%	平均百分标准误差/%	平均预估误差/%
全国	5.9173×10^{-5}	1.918 7	0.929 44	0.984	0.01	0.07	-0.48	6.24	0.64

注: a 、 b 、 c 参数估计值统一保留 5 位有效位数,下同。

从表 2 的统计指标可以看出,全国主要树种通用二元材积模型的拟合优度达到 98%,计算的总相对误差和平均系统误差分别为 0.01%、-0.48%,两者都很好地控制在 $\pm 3\%$ 的范围内,模型拟合效果较好。预估误差仅为 0.64%,说明其对林分材积的总体预估精度可达到 99% 以上,百分标准误差为 6.24%,说明其对单株木材积的预估准确度可达到 93% 以上,无论是针对林木群体还是单株木,其对材积的预估效果均良好。

2.2 针/阔叶通用性模型

通过估计,得到了 1 个全国针叶通用二元材积模型和 1 个全国阔叶通用二元材积模型(不包括西藏地区)。并对这 2 个模型按照表 1 给出的 6 项指

标公式进行计算,其指标结果和 a 、 b 、 c 的参数估计值如表 3 所示。

2 结果与分析

2.1 全国通用性模型

由于西藏地区自然环境因素的影响,使其树木生长条件与全国其它地区差异较大,即西藏地区的样本数据与其它地区有所差别,为了提高模型的精度,所建立的全国主要树种通用模型都不包括西藏地区,利用 1373 组全国各地(不包括西藏地区)主要树种的样本数据,采用非线性回归分析的方法对模型 $V = aD^b H^c$ 进行拟合,得到了 1 个适用于全国(不包括西藏地区)主要树种的通用二元材积模型。由 6 项指标对模型进行评价,其指标评价和参数估计结果如表 2 所示。

根据表 3 的指标统计结果,可以看出针叶和阔叶通用模型的总相对误差均为 -0.05%,平均系统误差分别为 -1.21%、-1.04%,2 项指标均在 $\pm 3\%$ 以内,表明模型的拟合效果很好。其平均百分标准误差都控制在 $\pm 6\%$ 以内,模型总体精度较高。

2.3 区域通用性模型

将样本数据以大区分类建立全国六大区域的通用二元材积模型,通过 SPSS 21.0 软件拟合得到各大区域的二元材积通用方程,并由评价指标分别对这六大区域的模型进行计算,其参数估计结果和指标评价结果如表 4 所示。

表 3 全国主要树种针/阔叶通用二元材积模型的参数估计值和统计指标

Tab.3 Estimations and statistics of standard volume model parameters for needle and broad leaves tree species in nationwide

模型类型	a	b	c	决定系数	总相对误差/%	估计值标准差/ m^3	平均系统误差/%	平均百分标准误差/%	平均预估误差/%
针叶	7.0828×10^{-5}	1.955 5	0.832 12	0.986	-0.05	0.07	-1.21	5.90	0.79
阔叶	6.7453×10^{-5}	1.960 0	0.814 43	0.990	-0.05	0.04	-1.04	4.70	0.78

表4 全国主要树种分地区通用二元材积模型的参数估计值和统计指标

Tab.4 Estimations and statistics of standard volume model parameters for major tree species in nationwide by region

模型类型	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	决定系数	总相对 误差/%	估计值 标准差/m ³	平均系统 误差/%	平均百分 标准误差/%	平均预估 误差/%
东北地区	8.0652×10^{-5}	1.9547	0.76528	0.987	-0.06	0.06	-1.74	5.94	1.09
华北地区	6.1499×10^{-5}	2.0124	0.78490	0.998	0.29	0.01	1.76	3.92	1.08
南方地区	3.2994×10^{-5}	1.7821	1.2958	0.993	0.16	0.04	2.50	6.12	0.84
西南地区	7.0012×10^{-5}	2.0071	0.77976	0.989	-0.03	0.06	-0.48	5.29	0.86
西北地区	6.7175×10^{-5}	1.8675	0.92872	0.988	-0.04	0.05	-1.29	6.00	1.80
西藏地区	4.2379×10^{-5}	1.6468	1.3675	0.992	-0.06	0.06	-0.89	4.70	1.56

从表4的评价结果可以看出,东北、华北、南方、西南、西北和西藏地区的通用二元材积模型的平均预估误差均控制在 $\pm 2\%$ 以内,这对林分材积总体平均状况的估测已经达到了技术规定的精度要求,但是要准确地计算单株木的材积则要考虑平均百分标准误差这一重要评价指标。5个地区材积方程的平均百分标准误差均在6%以内,只有南方地区超出范围,但其平均百分标准误差非常接近6%,总体影

响较小。不管是针对单株木还是林分材积的估算,模型总体精度较高。

2.4 通用推导形数模型

将样本数据以大区分类建立全国六大区域的总体/针叶/阔叶通用推导形数模型,通过SPSS软件拟合得到六大区域的通用推导形数*f*值,对这六大区域的模型进行统计指标计算,结果如表5所示。

从表5的统计指标可以看出,东北、华北、南方、

表5 推导形数模型统计指标

Tab.5 Statistical parameters of derived form factor model

模型	推导形数 <i>f</i>	决定系数	总相对 误差/%	残差平方 和/m ³	平均系统 误差/%	平均百分 标准误差/%	平均预估 误差/%
东北地区总体	3.3729×10^{-5}	0.985	0.94	0.07	6.59	9.93	1.17
东北地区针叶	3.5017×10^{-5}	0.983	1.99	0.07	7.94	11.43	1.76
东北地区阔叶	3.2476×10^{-5}	0.994	3.06	0.04	8.33	9.62	1.09
华北地区总体	3.5435×10^{-5}	0.994	5.66	0.01	12.69	13.22	2.11
华北地区针叶	3.8681×10^{-5}	0.997	1.33	0.01	6.97	8.27	1.72
华北地区阔叶	3.4549×10^{-5}	0.998	1.69	0.01	9.23	10.34	1.64
南方地区总体	3.4998×10^{-5}	0.991	0.98	0.05	5.62	8.50	0.99
南方地区针叶	3.5606×10^{-5}	0.991	0.08	0.05	5.27	8.46	1.36
南方地区阔叶	3.4099×10^{-5}	0.993	1.23	0.04	5.55	8.19	1.23
西南地区总体	3.7219×10^{-5}	0.986	2.43	0.06	7.03	9.28	0.98
西南地区针叶	3.7449×10^{-5}	0.986	3.33	0.07	8.40	10.22	1.18
西南地区阔叶	3.6309×10^{-5}	0.988	2.45	0.05	6.21	8.25	1.65
西北地区总体	3.3341×10^{-5}	0.986	3.17	0.06	8.98	10.88	1.94
西北地区针叶	3.3368×10^{-5}	0.983	3.77	0.06	10.13	11.73	2.22
西北地区阔叶	3.3349×10^{-5}	0.991	1.69	0.04	6.46	8.78	2.06
西藏地区总体	3.6559×10^{-5}	0.986	0.69	0.09	7.22	10.94	2.08

注:*f*保留5位有效位数。

西南、西北和西藏地区的总体/针叶/阔叶通用推导形数模型的平均预估误差都在 $\pm 3\%$ 以内,达到了技术规定的精度要求。考虑平均百分标准误差这一重要指标,除了华北地区总体的推导形数模型的平均百分标准误差达到了13.22%,其余15个推导形数模型的平均百分标准误差均接近10%,但都控制在15%以内,模型总体效果良好。

2.5 模型验证

为了检验各通用性二元材积方程的适用性,利用各省市主要树种的建模样本和检验样本分别按照区域和树种计算总相对误差和平均系统误差。从表6建模样本的检验结果可以看出,将全国模型用于六大区域估计时,总相对误差的变化范围是-6.00%~5.65%,平均系统误差的变化范围是

-5.15%~4.59%,用于23个树种估计时,总相对误差的变化范围是-13.74%~15.08%,平均系统误差的变化范围是-12.16%~14.58%;将针/阔模型用于六大区域估计时,针叶模型总相对误差的变化范围是-10.17%~2.43%,平均系统误差的变化范围是-10.64%~0.81%,阔叶模型总相对误差的变化范围是-2.59%~11.36%,平均系统误差的变化范围是-2.24%~8.53%;用于23个树种估计时,针叶模型总相对误差的变化范围是-9.47%~12.14%,平均系统误差的变化范围是-9.50%~9.13%,阔叶模型总相对误差的变化范围是-10.02%~3.44%,平均系统误差的变化范围是-8.23%~2.28%。区域模型用于其所在区域估计时,其总相对误差和平均系统误差都很好的控制在

±3% 的范围内,将区域模型用于 23 个树种估计时, 均系统误差的变化范围是 -10.70% ~ 15.72%。从总相对误差的变化范围是 -12.95% ~ 17.79%, 平 表7检验样本的检验结果可以看出,将全国模型用

表 6 各二元材积模型建模样本检验结果

Tab.6 Test results of modeling samples of standard volume model

%

分类	类别	全国模型		针/阔模型		区域模型		
		总相对误差	平均系统误差	总相对误差	平均系统误差	总相对误差	平均系统误差	
区域	东北	针阔	-4.16	-3.73	-6.72	-7.19	-0.06	-1.74
	1.49				1.27			
	华北	针阔	-3.58	-1.99	-7.87	-8.32	0.29	1.76
	-0.22				-0.39			
	南方	针阔	-1.55	-2.38	-4.55	-6.53	0.16	2.50
	3.77				1.74			
	西南	针阔	5.65	4.59	2.43	0.81	-0.03	-0.48
11.36	8.53							
西北	针阔	-6.00	-5.15	-10.17	-10.64	-0.04	-1.29	
-2.59				-2.24				
西藏						-0.06	-0.89	
冷杉	东北	14.43	14.58	9.80	9.13	8.30	6.24	
	西南					7.49	8.01	
	西北					17.79	15.72	
	西藏					0.59	2.03	
云杉	东北	0.53	2.04	-2.68	-2.17	8.30	6.24	
	华北					0.55	3.79	
	西南					-0.68	0.56	
	西北					-1.79	-1.92	
西藏						-7.15	-3.88	
落叶松	东北	-7.18	-4.64	-9.33	-7.97	-0.88	-0.74	
	华北					1.44	3.51	
	西北					-1.81	-2.25	
红松	东北	6.85	6.54	3.74	2.47	10.97	7.64	
樟子松	东北	-2.63	-1.18	-6.02	-5.27	0.12	-0.78	
柏类	华北	3.61	6.93	-2.92	0.63	4.42	7.50	
杉木	南方	5.03	3.88	1.59	-0.67	7.85	11.91	
马尾松	南方	-6.41	-4.99	-9.47	-9.50	-3.94	4.15	
黄山松	南方	4.90	4.09	3.77	2.74	-0.98	-0.80	
云南松	西南	15.08	12.40	12.14	8.79	9.76	7.67	
思茅松	西南	7.98	4.84	5.92	2.22	4.04	1.56	
高山松	西南	13.93	11.41	11.14	7.93	8.83	6.88	
	西藏					6.22	0.25	
油松	西南	-4.95	-2.63	-5.49	-4.39	-6.52	-4.54	
华山松	西南	1.27	2.52	0.03	0.14	-1.41	-0.31	
柞树	东北	-5.89	-4.47	-1.35	-0.12	-3.30	-3.24	
白桦	东北	-12.04	-10.89	-6.72	-5.91	-8.09	-8.46	
黑桦	东北	-13.47	-10.87	-8.24	-5.91	-9.59	-8.49	
刺槐	华北	-2.61	-1.07	0.12	0.63	1.32	2.76	
桉树	南方	-13.74	-12.16	-10.02	-8.23	-9.24	-8.22	
山杨	东北	-2.89	-2.95	3.44	2.28	2.36	-0.07	
	华北					0.94	2.41	
	西北					6.90	3.13	
桦木	华北	0.18	-2.88	3.12	-0.13	-6.63	-3.10	
	西南					-3.43	-5.63	
	西北					-5.24	-6.23	
栎类	西南	-7.74	-6.10	-4.03	-3.07	-12.95	-10.7	
	西北					-4.07	-4.60	
阔叶树	东北	-2.95	-3.89	1.32	-0.34	-0.34	-3.71	
	华北					-2.62	-2.26	
	南方					2.17	3.14	
	西南					-6.87	-7.09	
	西北					-10.32	-10.07	

表 7 各二元材积模型检验样本检验结果

Tab. 7 Test results of testing samples of standard volume model

分类	类别	全国模型		针/阔模型		区域模型		
		总相对 误差/%	平均系统 误差/%	总相对 误差/%	平均系统 误差/%	总相对 误差/%	平均系统 误差/%	
区域	东北	针	-4.12	-3.67	-6.68	-7.44	-0.05	-2.46
		阔			1.53	0.96		
	华北	针	-3.30	-0.95	-7.12	-6.59	0.90	3.15
		阔			0.71	1.35		
	南方	针	-1.56	-2.38	-4.57	-6.89	0.16	3.51
		阔			3.75	1.33		
	西南	针	5.63	4.49	2.39	0.58	-0.03	-0.47
阔				11.31	8.28			
西北	针	-6.03	-5.20	-10.28	-11.21	-0.23	-1.96	
	阔			-2.74	-2.88			
西藏						-0.07	-1.01	
树种	冷杉	东北					8.29	5.51
		西南					7.51	8.08
		西北	13.73	13.86	8.79	7.91	17.57	14.97
		西藏					0.64	2.32
	云杉	东北					8.29	5.51
		华北					1.22	3.95
		西南	-2.31	-0.38	-5.67	-4.95	-0.64	0.78
		西北					-1.72	-1.92
	落叶松	西藏					-7.05	-3.21
		东北					-0.79	-1.40
		华北	-7.16	-4.53	-9.85	-8.72	1.52	2.84
	阔叶树	红松	西北				-1.78	-2.42
东北			6.83	6.53	3.71	2.14	10.89	6.84
樟子松			-2.60	-0.84	-5.99	-5.12	0.11	-0.99
柏类		东北	4.20	7.88	-2.38	0.40	5.24	9.26
		杉木	4.99	3.73	1.54	-1.20	7.86	13.76
马尾松		-6.36	-4.82	-9.43	-9.88	-3.83	7.43	
黄山松		4.87	4.00	3.75	2.46	-1.06	-0.09	
云南松		14.99	11.9	12.03	8.17	9.69	7.29	
思茅松		7.87	4.26	5.80	1.54	3.96	1.10	
高山松		西南	13.85	10.95	11.03	7.34	8.77	6.52
		西藏					6.02	-0.82
油松		西南	-4.88	-2.18	-5.46	-4.19	-6.46	-4.15
华山松		西南	1.31	2.76	0.03	0.16	-1.37	-0.10
柞树		东北	-5.84	-4.22	-1.29	-0.24	-3.26	-3.69
白桦		东北	-11.99	-10.78	-6.66	-6.09	-8.06	-8.92
黑桦		东北	-13.37	-10.6	-8.12	-5.91	-9.50	-8.79
刺槐	华北	-2.52	-0.56	0.20	0.81	1.57	3.29	
桉树	南方	-13.72	-11.49	-9.98	-7.73	-9.30	-6.89	
山杨	东北					2.35	-1.17	
	华北	-2.45	-2.96	-2.45	-3.10	1.20	2.54	
	西北					6.59	2.24	
桦木	华北					-5.87	-2.44	
	西南	-3.65	-5.49	-0.85	-2.74	-3.51	-6.04	
栎类	西北					-5.27	-6.42	
	西南	-8.24	-6.37	-5.11	-4.08	-12.88	-10.26	
阔叶树	西北					-4.11	-4.75	
	东北					-0.39	-4.76	
	华北					-2.29	-2.33	
	南方	-4.06	-5.10	-0.32	-2.50	2.15	3.67	
	西南					-6.88	-7.14	
西北					-10.26	-10.03		

于六大区域估计时,总相对误差的变化范围是-6.03%~5.63%,平均系统误差的变化范围是-5.20%~4.49%;用于23个树种估计时,总相对误差的变化范围是-13.72%~14.99%,平均系统误差的变化范围是-11.49%~13.86%。将针/阔模型用于六大区域估计时,针叶模型总相对误差的变化范围是-10.28%~2.39%,平均系统误差的变化范围是-11.21%~0.58%,阔叶模型总相对误差的变化范围是-2.74%~11.31%,平均系统误差的变化范围是-2.88%~8.28%;用于23个树种估计时,针叶模型总相对误差的变化范围是-9.85%~12.03%,平均系统误差的变化范围是-9.50%~9.13%,阔叶模型总相对误差的变化范围是-9.98%~0.20%,平均系统误差的变化范围是-7.73%~0.81%。区域模型用于其所在区域估计时,其总相对误差和平均系统误差都基本控制在 $\pm 3\%$ 范围内,个别超出范围的也都比较接近3%,将区域模型用于23个树种估计时,总相对误差的变化范围为-13.74%~15.08%,平均系统误差的变化范围是-12.16%~14.58%。从表6和表7共同看出,按区域进行验证时,全国模型和针阔模型的指标大部分都在 $\pm 5\%$ 以内,个别地区的平均系统误差和总相对误差超出了 $\pm 5\%$,区域模型的平均系统误差和总相对误差基本都控制在 $\pm 3\%$ 以内,总体验证效果良好;按树种进行验证时,大部分模型的平均系统误差、总相对误差值在 $\pm 5\%$ 的范围内,超出部分也都控制在 $\pm 15\%$ 的范围。总体来看,建模所取样本范围越小精度越高,即区域模型的精度优于针阔模型和全国模型,检验结果比较满意。通过检验样本对所得的推导形数进行独立性检验,从表8的检验结果可以看出,各推导形数模型的总相对误差基本都位于 $\pm 3\%$ 范围内,平均系统误差基本都控制在 $\pm 15\%$ 范围内,检验结果良好。

3 结束语

基于我国二元立木材积模型、各省市一元材积表得到的2082组样本数据构建了1个全国通用二元材积模型、2个全国针/阔叶通用二元材积模型、

表8 各推导形数模型的检验结果

Tab.8 Test results of derived form factor model %

模型类型	总相对误差	平均系统误差
东北地区总体	1.95	10.82
东北地区针叶	2.15	11.63
东北地区阔叶	1.75	9.82
华北地区总体	2.96	13.76
华北地区针叶	3.21	12.08
华北地区阔叶	2.11	10.59
南方地区总体	1.14	8.40
南方地区针叶	1.36	9.31
南方地区阔叶	1.08	7.65
西南地区总体	2.00	9.08
西南地区针叶	2.27	10.18
西南地区阔叶	1.71	7.24
西北地区总体	2.50	12.11
西北地区针叶	3.15	15.91
西北地区阔叶	1.62	10.72
西藏地区总体	2.19	13.47

6个全国分区域通用二元材积模型以及全国六大区域总体/针叶/阔叶16个通用推导形数模型。对二元材积模型进行自检和独立性检验,结果表明,随着模型地域范围的缩小,模型的拟合系数 R^2 逐渐增大,按区域验证,各模型的总相对误差及平均系统误差基本都不超过 $\pm 3\%$,对各材积模型划分树种检验,大部分模型的平均系统误差、总相对误差值在 $\pm 5\%$ 范围内,超出部分也都控制在 $\pm 15\%$ 范围内。根据推导形数模型的适用性验证结果,除了华北地区总体和西北地区针叶模型的总相对误差指标分别为7.30%、4.30%,其余各模型的总相对误差基本都在 $\pm 3\%$ 范围内或是接近于3%,平均系统误差指标大部分都在10%以内,但均未超出15%,模型总体验证效果良好。从通用二元材积/推导形数模型的验证结果可以看出,将现有规模庞大的一/二元立木材积模型库整合出的通用树种三类9个材积模型和16个推导形数模型,在特定精度情况下,可以取代现有分地域分树种的一/二元立木材积模型进行材积估算。该方法因避免了树种识别及查表,对于木材商粗算木材价值、无人机蓄积量估算和大范围地区林分参数遥感反演等精度要求不高的用途,该方法更加简便快捷。

参 考 文 献

- 曹忠,巩奕成,冯仲科,等. 电子经纬仪测量立木材积误差分析[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(1):292-298. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150141&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.01.041. CAO Zhong, GONG Yicheng, FENG Zhongke, et al. Error analysis on standing tree volume measurement by using electronic theodolites[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(1):292-298. (in Chinese)
- 中华人民共和国农林部. 立木材积表(LY208-77)[M]. 北京:中国标准出版社,1978.
- 杜鹏志,薛康,曾伟生,等. 北京杨树相容性立木材积系列模型研建[J]. 林业资源管理,2014(5):51-57. DU Pengzhi, XUE Kang, ZENG Weisheng, et al. Developing compatible tree volume equations for populus in Beijing[J]. Forest

- Resources Management, 2014(5):51-57. (in Chinese)
- 4 曾伟生. 杉木相容性立木材积表系列模型研建[J]. 林业科学研究, 2014, 27(1):6-10.
ZENG Weisheng. Establishment of compatible tree volume equation systems of Chinese fir[J]. Forest Research, 2014, 27(1):6-10. (in Chinese)
- 5 周善付. 林木二元材积与蓄积量精度分析模型的构建[J]. 科技创新与应用, 2015(34):16-17.
ZHOU Shanfu. Construction of forest stock volume of binary volume and accuracy of the analytical model[J]. Science and Technology Innovation and Application, 2015(34):16-17. (in Chinese)
- 6 唐艺. 基于三维激光扫描技术的活立木材积测量方法[D]. 北京:北京林业大学, 2012.
TANG Yi. Volume measurement of live standing tree based on 3D laser scanning technology[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2012. (in Chinese)
- 7 孟宪宇. 测树学[M]. 北京:中国林业出版社, 1996.
- 8 张民侠, 余光辉. 盗伐、滥伐林木材积测算及定案研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2010, 34(1):85-90.
ZHANG Minxia, SHE Guanghui. Study on estimation of tree volumes and final decision for deforestation and illegal felling of forests[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2010, 34(1):85-90. (in Chinese)
- 9 MAUYA E W, MUGASHA W A, ZAHABU E. Models for estimation of tree volume in the miombo woodlands of Tanzania[J]. Southern Forests: A Journal of Forest Science, 2014, 76(4):209-219.
- 10 王佳, 宋珊芸, 刘霞, 等. 结合影像光谱与地形因子的森林蓄积量估测模型[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(5):216-220. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140533&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.033.
WANG Jia, SONG Shanyun, LIU Xia, et al. Forest volume estimation model using spectra and topographic factors of ZY-3 image[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5):216-220. (in Chinese)
- 11 FLEUR Longuetaud, PHILIPPE Santenoise, FRÉDÉRIC Mothe, et al. Modeling volume expansion factors for temperate tree species in France[J]. Forest Ecology and Management, 2013, 292:111-121.
- 12 刘恩斌. 广东二元立木材积表的编制与改进方法的研究[D]. 南京:南京林业大学, 2005.
LIU Enbin. Study on the establishment and improvement of Guangdong binary tree volume table[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005. (in Chinese)
- 13 王利. 麻栎主要调查因子的相关关系以及一元材积表编制的研究[D]. 泰安:山东农业大学, 2003.
WANG Li. Study on correlations among major factors and one-way volume table of sawtooth oak (*Quercus acutissima*) [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2003. (in Chinese)
- 14 杜文峰, 杨传强, 魏娟, 等. 山东省松类一元材积模型初步研究[J]. 山东林业科技, 2012, 42(6):61-63.
DU Wenfeng, YANG Chuanqiang, WEI Juan, et al. A preliminary study of Shandong province one-way volume[J]. Shandong Forestry Science and Technology, 2012, 42(6):61-63. (in Chinese)
- 15 曾伟生. 全国立木生物量方程建模方法研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2011.
ZENG Weisheng. Methodology on modeling of single-tree biomass equations for national biomass estimation in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011. (in Chinese)
- 16 魏建祥, 曾伟生. 论北京市一元立木材积表的数式化方法[J]. 林业资源管理, 2009(6):44-45.
WEI Jianxiang, ZENG Weisheng. Formulization of one-way tree volume tables for Beijing[J]. Forest Resources Management, 2009(6):44-45. (in Chinese)
- 17 石瑞平. 基于一元回归分析模型的研究[D]. 石家庄:河北科技大学, 2009.
SHI Ruiping. The study based on unitary regression analysis model[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 18 陈萧. 滤棒成型设备的多元非线性回归分析[J]. 装备制造技术, 2011(5):36-39.
CHEN Xiao. Multivariate nonlinear regression analysis filter rod forming apparatus[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2011(5):36-39. (in Chinese)
- 19 曾伟生, 唐守正. 立木生物量方程的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, 47(11):106-113.
ZENG Weisheng, TANG Shouzheng. Goodness evaluation and precision analysis of tree biomass equations[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(11):106-113. (in Chinese)
- 20 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.
- 21 冯强, 方良. 海南桉树立木材积模型研建[J]. 中南林业调查规划, 2014(3):47-51.
FENG Qiang, FANG Liang. Establishment of tree volume models for eucalyptus in Hainan[J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2014(3):47-51. (in Chinese)