

# 基于森林调查数据的长白山天然林森林 生物量相容性模型\*

邢艳秋 王立海\*\*

(东北林业大学森林作业与环境研究中心, 哈尔滨 150040)

**摘要** 森林生物量估算是进行陆地生态系统碳循环和碳动态分析的基础,但现有估测模型存在着总量与分量不相容的问题. 本文以吉林省汪清天然林区为例,提出了基于森林调查的相容性森林生物量模型设计思想,并采用联立方程组为不同森林群落构造了一系列引入林分蓄积因子的相容性生物量模型,得到的预估精度较高. 其中,针叶林、阔叶林和针阔混交林群落的森林生物量模型预估精度均在95%以上,基本上解决了森林生物量模型的相容性问题.

**关键词** 天然林 森林生物量 估测 森林调查 相容性模型

**文章编号** 1001-9332(2007)01-0001-08 **中图分类号** S718 **文献标识码** A

**Compatible biomass estimation models of natural forests in Changbai Mountains based on forest inventory.** XING Yan-qiu, WANG Li-hai (Center for Forest Operations and Environment, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2007, 18(1): 1-8.

**Abstract:** Forest biomass estimation is the groundwork of analyzing carbon cycle and its dynamics in terrestrial ecosystems, but the current estimation models had the problem of un-compatibility between total forest biomass and its components. Taking the Wangqing natural forest area in Jilin Province as a case, the compatible concept of building forest biomass models based on forest inventory was brought forward. A series of compatible biomass estimation models, taking stem volume as one of the independent variables, were established by using simultaneous equations. The accuracy of the models in estimating the biomass of coniferous forest, broad-leaved forest, and mixed forest was all higher than 95%, suggesting that these models basically solved the problem of un-compatibility between total forest biomass and its components.

**Key words:** natural forest; forest biomass; estimation; forest inventory; compatible model.

## 1 引言

森林生物量估算是进行陆地生态系统碳循环和碳动态分析的基础,已成为生态学和全球变化研究的重要内容之一<sup>[7,13,22,25,27]</sup>. 1992年,全世界166个国家签署了《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC),1997年12月,各国又在日本京都签订了《京都议定书》,规定了各国为减少温室气体的排放应履行的责任和义务,且从2005年2月16日起正式生效.《京都议定书》允许缔约国通过保持及加强森林生态系统的碳储量来实现其减排承诺.因此,森林生态系统生物量、碳贮量以及森林植被碳库的动

态变化是目前急需解决的问题.然而,由于估测方法不同,使得森林生物量估测结果存在着相当大的不确定性<sup>[1,5,11,14,20,26]</sup>.为减少这种不确定性,Brown等<sup>[3]</sup>、方精云等<sup>[9]</sup>认为,加强长期定位监测、改良现有估测模型对于提高森林生物量估测精度至关重要.目前,生物量转换法和生物量转换因子连续函数法是应用比较广泛的两种估测方法<sup>[2-4,6,8]</sup>.

生物量转换因子法是利用林分生物量与木材材积比的平均值,乘以该森林类型的总蓄积量,得到该类型森林总生物量的方法.该方法将生物量转换因子看作是一恒定的常数<sup>[15]</sup>.实际上,它随着材积的变化而变化,只有当材积很大时,该值才是一常数<sup>[7]</sup>.因此,采用常数的生物量转换因子不能准确地估算森林生物量<sup>[12,16]</sup>.生物量转换因子连续函数法是将单一不变的生物量平均转换因子改为分龄级的转换因子,以更加准确地估算区域或国家的森林

\* 国家“十五”科技攻关项目(2001BA510B07-02)和东北林业大学校基金资助项目(XJ04022).

\*\* 通讯作者. E-mail: lihaiwg@public.hr.hl.cn; lihaiwang@yahoo.com

2006-06-05 收稿,2006-11-08 接受.

生物量<sup>[2,17]</sup>.但这种方法难以实现由样地调查到区域推算尺度的转换.方精云等<sup>[6-7]</sup>利用倒数方程表示生物量转换因子法与林分材积的关系,简单地实现了由样地调查向区域推算的尺度转换,并据此推算了区域尺度的森林生物量.但是,对某一森林类型而言,该线性关系存在样本数不足的缺陷.

目前,关于森林生物量估测模型的研究,对天然林生物量的研究很少,缺乏森林多层次模型的研究,且没有考虑到分量模型与总量模型之间的相容关系.唐守正等<sup>[18]</sup>以长白落叶松为实例建立了相容性立木生物量模型,但是将这种思想推广到森林生物量模型上尚未见报道.本研究基于森林调查数据,利用森林生物量与其各分量之间的代数关系,通过各分量联合估计系统,建立生物量模型,解决独立模型不相容问题,旨在对东北天然林区域森林生物量进行精确估计.

## 2 研究地区与研究方法

### 2.1 自然概况

本研究选择以典型天然针阔混交林为主要森林类型的吉林省汪清林业局经营区为研究区.该局属长白山系的中低山区(43°05′—43°40′N,129°56′—131°04′E),东西长约85 km,南北宽约60 km,总面积30.4万hm<sup>2</sup>.属寒温带大陆性气候区,夏季炎热多雨,冬季寒冷干燥,年降水量550 mm左右,其中5—9月的降雨量(438 mm)占全年总降水量的80%.年平均气温3.9℃,极端最高气温37.5℃,极端最低气温-37.5℃,无霜期137 d.该区域植物种类繁多,结构复杂.深山区林相以针阔混交林为主,针叶树主要有红松(*Pinus koraiensis*),云杉(*Picea koraiensis*)和臭松(*Abies nephrolepis*),阔叶树多为椴树(*Tilia amurensis*),柞树(*Quercus mongolica*),枫桦(*Betula costata*),色树(*Acer mono*)和白桦(*Betula platyphylla*)等.在森林龄组结构上,中龄林居多.境内有3条主要

河流通过.暗棕色森林土是该区域主要土壤类型,其间穿插有少量的沼泽土和草甸土.

### 2.2 研究方法

**2.2.1 实验设计** 根据国际粮农组织FAO-FRA2005的定义,林木生物量指除树叶、花和种子之外,所有活的以及死的林木的木质部分(树干、树皮、树枝和嫩枝)和灌木的绝干质量之和,包括树桩、树根.地上林木生物量是除树桩、树根外,所有活林木的木质部分(树干、树皮、树枝和嫩枝)绝干质量之和<sup>[10]</sup>.本文所研究的森林生物量是指地上活林木生物量(包括树叶生物量)、灌木生物量和草本生物量三者之和.

本研究采用标准地法进行实地数据调查.在176块面积为0.09 hm<sup>2</sup>的正方形标准地内,对胸径≥4 cm的树木进行每木调查,记录树种和胸径,针对不同树种量测3~5株断面积平均直径的平均高.为获得林内下木及草类的生物量,在每个样地的4个角及中心点机械布设5个面积为1 m×1 m的样方,记录样方内所有灌木和草类的种类、盖度及样方盖度,测定每株灌木的冠幅、冠长、高度等生长因子,分部位(即干和枝叶)测定鲜质量,并分别截取小段样品,待样品鲜质量测定后,将其放入密封袋内用以测定其干质量.用收获法测定样方内每种草类的鲜质量并按种类取样,测定鲜质量后,放入密封袋内用以测定其干质量.

利用实测林木参数,参考胥辉等<sup>[24]</sup>构建的长白山林区相容性生物量模型(预估精度在95%~99%之间)计算林木生物量,并近似看作实测林木生物量值;利用实地采集的灌、草类样本,应用于干质量与鲜质量比例法分别确定灌木及草类的干物质率,结合实测样方内灌木及草类生物量,计算标准样地内灌草生物量.样地内林木、灌木及草类生物量三者之和,即为样地森林生物量<sup>[23]</sup>.

**2.2.2 模型建立** 图1为森林生物量的代数关系.

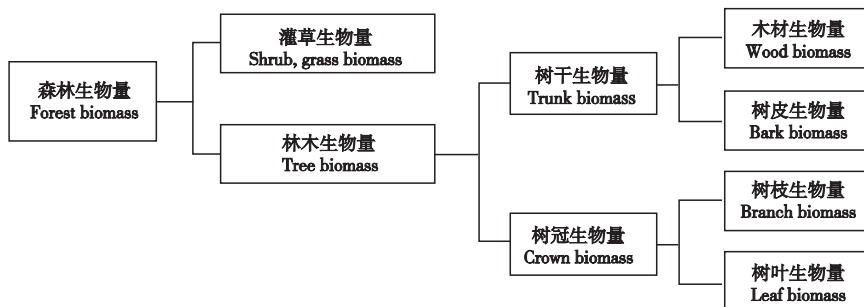


图1 森林生物量的代数关系

Fig. 1 Algebraic relationship of forest biomass.

在林木生物量一定的情况下,树干生物量越大则树冠生物量越小;在森林生物量一定的情况下,林木生物量越大,则灌草生物量越小.因此,可以充分利用森林生物量各分量之间的数量关系,建立各分量联合估计系统,建立生物量模型,从而解决独立模型不相容问题.

以 7 个易测林分因子,即林分郁闭度  $C$ 、优势树种平均林龄  $A(a)$ 、平均胸径  $D(cm)$ 、平均树高  $H(m)$ 、林分蓄积  $V(m^3 \cdot hm^{-2})$ 、林分密度  $N(株 \cdot hm^{-2})$ 、胸高断面面积  $B(m^2 \cdot hm^{-2})$  为自变量,以各类林分生物量  $(t \cdot hm^{-2})$ ,即树干生物量  $W_b$ 、树冠生物量  $W_c$ 、林木总生物量  $W_l$ 、灌草生物量  $W_{sg}$  (为灌木和草本植物的生物量之和)、森林生物量  $W$  为因变量进行模型研究.其中,将林木生物量的各分量,即木材、树皮、树枝和树叶生物量作为因变量,分别以  $W_w$ 、 $W_p$ 、 $W_z$  和  $W_1$  表示.

设  $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$ 、 $f_6(x)$ 、 $f_7(x)$ 、 $f_8(x)$  和  $f_9(x)$  分别为林木、树干、木材、树皮、树冠、树枝、树叶、森林和灌草的独立模型.即

$$\hat{w}_i = f_i(x) \quad (i = 1, 2, \dots, 9) \quad (1)$$

其中,  $\hat{w}_i$  为独立生物量模型各分量估计值,  $x$  分别表示  $A$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $H$ 、 $V$ 、 $N$ 、 $B$ 、 $W_i$  为各分量的实际观测值.

基于森林生物量各分量的代数关系,分两层建模.

第 1 层:以树干生物量为基础,按代数和分配解决林木生物量模型的相容性问题.以树干生物量估计值为基础,采用分级控制方法.首先将林木生物量模型设计为树干生物量模型与树冠生物量模型之和的形式,固定树干模型中参数,对林木总量与树冠生物量模型进行联合估计,然后分别以树干和树冠生物量估计值为基础,先确定木材和树枝的模型参数,再将树皮与树叶模型分别设计为树干减木材和树冠减树枝.用公式表达则为:

1 级控制

$$w_1 = \hat{w}_2 + f_5(x) \quad (2)$$

$$w_5 = f_5(x) \quad (3)$$

2 级控制

$$w_3 = f_3(x) \quad (4)$$

$$w_4 = \hat{w}_2 - f_3(x) \quad (5)$$

$$w_6 = f_6(x) \quad (6)$$

$$w_7 = \hat{w}_5 - f_6(x) \quad (7)$$

由上式可以看出,只有树干生物量是事先单独确定的模型,其它 6 个模型的参数都按成对模型的联合估计得到.多数分量生物量模型结构简单,且兼

顾主要分量估计精度.

第 2 层:以林木生物量为基础按代数和分配解决森林生物量模型的相容性问题.以林木生物量估计值为基础,将森林生物量模型设计为林木生物量模型与灌草生物量模型之和的形式,固定林木生物量模型中参数,对森林总量与灌草生物量模型进行联合估计,其表达式为:

$$w_8 = \hat{w}_1 + f_9(x) \quad (9)$$

$$w_9 = f_9(x) \quad (10)$$

由上式可以看出,只有林木生物量是事先单独确定的模型,其它两个模型的参数都按成对模型的联合估计得到<sup>[19,24]</sup>.

### 3 结果与分析

#### 3.1 相容性森林生物量模型拟合

基于 2.2.2 的相容性森林生物量联立方程组,对各类生物量模型参数采用逐步回归的方法进行联合估计.第 1 层模型参数估计时,首先单独估计树干模型中参数,然后对林木总量与树冠生物量模型进行联合估计,再分别以树干和树冠生物量估计值为基础,确定木材和树枝的模型参数,最后用树干减木材和树冠减树枝模型确定树皮与树叶模型参数.第 2 层模型参数估计时,利用已经固定参数的林木生物量模型,对森林总量与灌草生物量模型进行联合估计.模型拟合结果见表 1 和表 2.

以针叶林森林生物量  $W$  的模型回归过程为例,根据回归方程和相关系数矩阵(表 3、表 4),从定性与定量的结合上分析模型的成因.分析针叶林的森林生物量模型拟合,发现变量  $A$  (平均林龄)和  $N$  (林分密度)从模型拟合过程中被剔除.在相关系数表中,这两个变量和生物量的相关系数相对较小,说明  $A$  和  $N$  对生物量的影响不大.从理论上讲,假设不存在由于各种森林灾害造成的林木死亡情况,也不存在采伐造成的林木损失,则样地的平均林龄越大,样地生物量的值将越高,但对于以生产为主的天然林区来讲,这种假设不成立.因此,平均林龄与森林生物量之间并没有很显著的正相关关系是正常的.同时,平均林龄  $A$  与森林生物量  $W$  之间的相关系数又不是非常小,说明多年来在该林区实行的“采育兼顾,青山常在”的经营战略取得了实效,一定程度上限制了对森林的过度采伐.而森林生物量与林分密度  $N$  呈弱正相关性,表明在以提高生产量为目标的时期,进行了大量的皆伐,后来在采伐迹地进行了人工造林或天然更新,虽然林分的密度并不小,但

表1 逐步回归法森林生物量模型拟合结果

Tab. 1 Fitting results of forest biomass model using stepwise regression method

森林类型 Forest type	生物量 Biomass	自变量 Independent variable	回归系数 Regression coefficient	标准误差 Standard error	共线性统计量 Collinearity statistic		相关系数 Correlation coefficient <i>R</i>	剩余方差 Residual variance $RMS_q$	预估精度 Prediction accuracy $P(\%)$
					容差 Tolerance	VIFA			
A	树干 Trunk	<i>Cons.</i>	-17.843	3.618			0.996	8.253	98.32
		<i>V</i>	0.267	0.020	0.203	4.928			
		<i>H</i>	2.496	0.467	0.194	5.146			
		<i>C</i>	22.894	4.621	0.410	2.440			
	树冠 Crown	<i>D</i>	-0.656	0.299	0.260	3.848			
		<i>Cons.</i>	-2.449	1.384			0.976	3.463	96.4
		<i>C</i>	18.885	2.876	0.444	2.251			
		<i>V</i>	0.046	0.009	0.385	2.599			
	<i>A</i>	0.033	0.015	0.634	1.578				
	木材 Wood	<i>Cons.</i>	-24.089	4.572			0.990	13.175	93.4
		<i>V</i>	0.171	0.025	0.203	4.928			
		<i>H</i>	3.307	0.590	0.194	5.146			
		<i>C</i>	28.269	5.839	0.410	2.440			
	树枝 Branch	<i>D</i>	-0.834	0.378	0.260	3.848			
		<i>Cons.</i>	-3.026	1.115			0.975	2.247	91.72
		<i>C</i>	15.133	2.316	0.444	2.251			
<i>V</i>		0.036	0.007	0.385	2.599				
<i>A</i>	0.027	0.012	0.634	1.578					
灌草 Shrub and grass	<i>Cons.</i>	0.865	0.810			0.804	1.207	85.23	
	<i>V</i>	0.027	0.005	0.451	2.219				
	<i>C</i>	-4.717	1.685	0.451	2.219				
	<i>D</i>	-0.834	0.378	0.260	3.848				
B	树干 Trunk	<i>Cons.</i>	-2.372	1.845			0.997	3.987	99.26
		<i>V</i>	0.403	0.008	0.677	1.478			
		<i>D</i>	0.446	0.166	0.677	1.478			
		<i>N</i>	-0.004	0.001	0.999	1.001			
	树冠 Crown	<i>Cons.</i>	5.700	3.279			0.857	19.109	97.59
		<i>V</i>	0.118	0.015	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.004	0.001	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.002	0.001	0.999	1.001			
	木材 Wood	<i>Cons.</i>	4.650	1.440			0.995	3.687	99.09
		<i>V</i>	0.339	0.007	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.002	0.001	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.002	0.001	0.999	1.001			
	树枝 Branch	<i>Cons.</i>	4.849	3.231			0.825	18.556	97.61
		<i>V</i>	0.101	0.015	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.004	0.001	0.999	1.001			
		<i>N</i>	-0.004	0.001	0.999	1.001			
灌草 Shrub and grass	<i>Cons.</i>	4.552	0.603			0.754	1.307	81.36	
	<i>C</i>	-0.628	0.088	0.811	1.232				
	<i>V</i>	-0.001	0.002	0.811	1.232				
	<i>D</i>	-0.001	0.002	0.811	1.232				
C	树干 Trunk	<i>Cons.</i>	-12.169	5.026			0.996	8.067	97.25
		<i>V</i>	0.367	0.013	0.499	2.004			
		<i>H</i>	1.655	0.640	0.499	2.004			
		<i>H</i>	1.655	0.640	0.499	2.004			
	树冠 Crown	<i>Cons.</i>	11.406	4.562			0.978	4.623	94.51
		<i>V</i>	0.136	0.010	0.499	2.004			
		<i>H</i>	1.123	0.485	0.499	2.004			
		<i>H</i>	1.123	0.485	0.499	2.004			
	木材 Wood	<i>Cons.</i>	1.358	1.721			0.994	8.020	95.27
		<i>V</i>	0.327	0.009	1.000	1.000			
		<i>V</i>	0.327	0.009	1.000	1.000			
		<i>V</i>	0.327	0.009	1.000	1.000			
	树枝 Branch	<i>Cons.</i>	5.443	2.253			0.978	3.219	85.84
		<i>V</i>	0.118	0.009	0.440	2.272			
		<i>C</i>	-11.096	3.877	0.440	2.272			
		<i>C</i>	-11.096	3.877	0.440	2.272			
灌草 Shrub and grass	<i>Cons.</i>	3.361	0.171			0.774	1.417	83.67	
	<i>C</i>	-2.895	2.097	0.412	2.427				
	<i>V</i>	0.003	0.005	0.412	2.427				
	<i>V</i>	0.003	0.005	0.412	2.427				

A: 针叶林 Needle-leaved forest; B: 阔叶林 Broad-leaved forest; C: 针阔混交林 Mixed forest. 下同 The same below. *Cons.*: 常数 Constant; *V*: 林分蓄积 Forest volume; *H*: 平均树高 Average height; *C*: 郁闭度 Canopy; *D*: 平均胸径 Average DBH.

表 2 森林生物量模型拟合结果

Tab. 2 Fitting results of forest biomass model

森林类型 Forest type	生物量 Biomass	模型 Model	预估精度 Prediction accuracy $P$ (%)
A	林木 Tree	$-20.292 + 41.779C + 0.313V - 0.656D + 2.496H + 0.033A$	98.22
	树皮 Bark	$5.245 - 5.375C + 0.096V + 0.178D - 0.811H$	94.03
	树叶 Leaf	$0.577 + 3.752C + 0.01V + 0.006A$	93.26
	森林 Forest	$-19.427 + 37.062C + 0.34V - 0.656D + 2.496H + 0.033A$	97.04
B	林木 Tree	$3.328 + 0.521V + 0.446D - 0.004H$	98.83
	树皮 Bark	$-7.022 + 0.064V + 0.446D + 0.002N$	97.66
	树叶 Leaf	$0.851 + 0.017V - 0.004H + 0.004N$	96.01
	森林 Forest	$7.880 - 0.628C + 0.520V + 0.446D - 0.004H$	97.25
C	林木 Tree	$-0.763 + 0.503V + 2.778H$	97.02
	树皮 Bark	$-13.527 + 0.04V + 1.655H$	93.58
	树叶 Leaf	$5.963 + 11.096C + 1.123H$	90.62
	森林 Forest	$2.598 - 2.895C + 0.506V + 2.778H$	96.82

表 3 针叶林各林分因子的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between needle-leaved forest parameters

林分因子 Forest parameter	平均林龄 Average age $A$	郁闭度 Canopy $C$	平均胸径 Average DBH $D$	平均高度 Average height $H$	林分蓄积 Volume $V$	林分密度 Density $N$	胸高断面面积 Sectional area in DBH $B$
A	1	0.508 *	0.708 **	0.519 *	0.598 **	-0.399	0.560 **
C	0.508 *	1	0.462 *	0.456 *	0.741 **	0.141	0.863 **
D	0.708 **	0.462 *	1	0.856 **	0.715 **	-0.660 **	0.608 **
H	0.519 *	0.456 *	0.856 **	1	0.780 **	-0.453 *	0.634 **
V	0.598 **	0.741 **	0.715 **	0.780 **	1	-0.158	0.878 **
N	-0.399	0.141	-0.660 **	-0.453 *	-0.158	1	0.065
B	0.560 **	0.863 **	0.608 **	0.634 **	0.878 **	0.065	1

\*  $P \leq 0.05$ ; \*\*  $P \leq 0.01$ . 下同 The same below.

表 4 针叶林各生物量与各林分因子的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between needle-leaved forest biomass and forest parameters

生物量 Biomass	平均林龄 Average age $A$	郁闭度 Canopy $C$	平均胸径 Average DBH $D$	平均高度 Average height $H$	林分蓄积 Volume $V$	林分密度 Density $N$	胸高断面面积 Sectional area in DBH $B$
树干 Trunk $W_b$	0.583 **	0.782 **	0.726 **	0.626 **	0.984 **	-0.161	0.806 **
林木 Tree $W_t$	0.512 **	0.720 **	0.722 **	0.792 **	0.983 **	-0.137	0.799 **
树冠 Crown $W_c$	0.564 **	0.750 **	0.636 *	0.599 **	0.899 **	-0.001	0.776 **
灌草 Shrub and grass $W_{sg}$	0.343	0.256	0.399	0.515 *	0.701 **	-0.116	0.436 *
森林 Forest $W$	0.510 **	0.708 **	0.720 **	0.793 **	0.987 **	-0.138	0.808 **
木材 Wood $W_w$	0.560 **	0.787 **	0.728 **	0.846 **	0.962 **	-0.17	0.687 **
树皮 Bark $W_p$	0.507 **	0.647 **	0.614 **	0.610 **	0.946 **	-0.095	0.608 **
树枝 Branch $W_z$	0.565 **	0.723 **	0.681 **	0.666 **	0.896 **	-0.079	0.525 **
树叶 Leaf $W_l$	0.591 **	0.723 **	0.494 *	0.393	0.833 **	0.079	0.530 **

是大多是未成材林,生物量很低.因此,回归方程中没有引进  $A$  和  $N$  是符合实际的.另外,虽然胸高断面面积  $B$  与森林生物量  $W$  的相关系数较大 ( $r = 0.808$ ),但是没有被引入模型.这是由于胸高断面面积  $B$  又与林分蓄积  $V$ 、郁闭度  $C$ 、林分平均树高  $H$  和林分平均胸径  $D$  之间呈线性正相关,相关系数分别为 0.878、0.863、0.634 和 0.608.如同时引进  $B$ 、 $V$ 、 $C$ 、 $H$  和  $D$ ,则很可能造成信息的冗余.所以回归方程

中没有引进  $B$  是合理的.

### 3.2 相容性森林生物量模型评价

**3.2.1 模型的合理性** 从森林生物量最终的模型拟合结果来看,除少部分模型的预估精度低于 90% 以外,其它模型的预估精度都高于 90%,效果比较理想.残差分析是一种简单实用的模型诊断技术,最直观的方法是利用残差的散点图进行回归诊断.由于本研究的生物量的模型主要是以树干生物量模型为

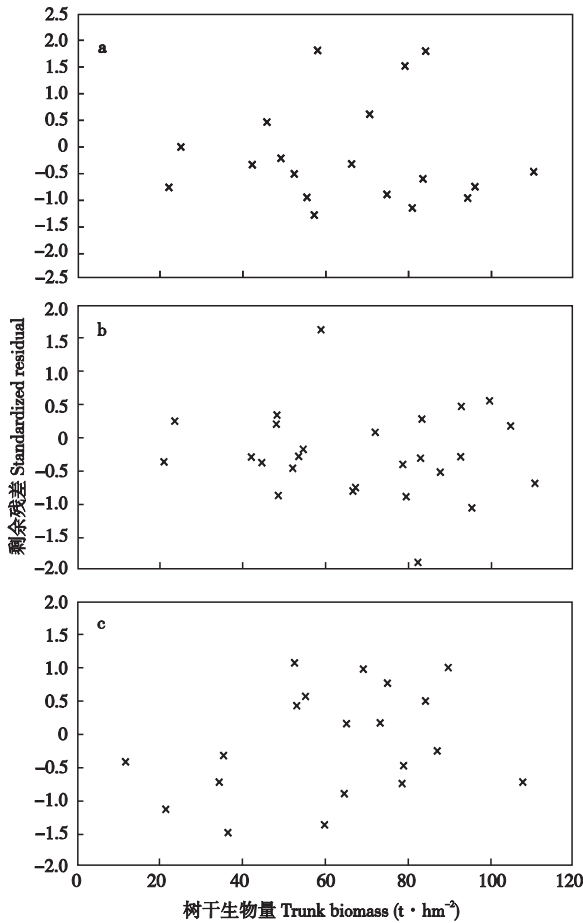


图2 模型标准化残差  
Fig. 2 Standardized residuals of models.  
a) 针叶林 Needle-leaved forest; b) 阔叶林 Broad-leaved forest;  
c) 针阔混交林 Mixed forest.

基础建立起来的,具有特殊的重要性及代表性,因此,本研究以树干生物量为例对模型进行诊断,结果如图2所示。

由图2可以看出,针叶林、阔叶林和针阔混交林的3个树干生物量模型,均有95%的残差点落在区域 $[-2.5, 2.5]$ 内,并且散点图在横坐标方向上未呈现任何趋势,因此可以认为选用的模型是合理的。

**3.2.2 模型的可靠性** 观察模型的特点,发现每个模型都包含有林分蓄积因子,说明林分蓄积对生物量模型的影响很大,这与实际情况相符。但是在林业调查中,由于材积因子本身是一个测算因子,通常由二元材积表给出,故本研究回归模型的可靠性与材积模型精度有关。所幸的是我国材积编制工作从20世纪50年代就已开始,到目前为止,各省、地区都有本地区主要树种的部颁标准材积表或地区标准材积表,特别是针对本研究区的材积表,通过多年的应用,可以完全满足森林资源调查的精度要求,从而保证了林分蓄积值和回归模型的可靠性。

**3.2.3 模型的实用性** 1) 在针叶林的树干和木材生物量模型中,参数 $D$ (平均胸径)的估计系数为负。分析样地树木平均胸径与其它针叶林生物量影响因子的关系(图3),发现其与树干生物量呈正相关,但同时与林分密度呈负相关,而且负相关性( $R^2 = 0.56$ )高于正相关性( $R^2 = 0.52$ )。也就是说,对一块平均胸径较大的林分,在成长的过程中很可能由于自然原因或人为破坏,造成其林分密度降低,导致样地林分蓄积、木材和树干生物量较低。

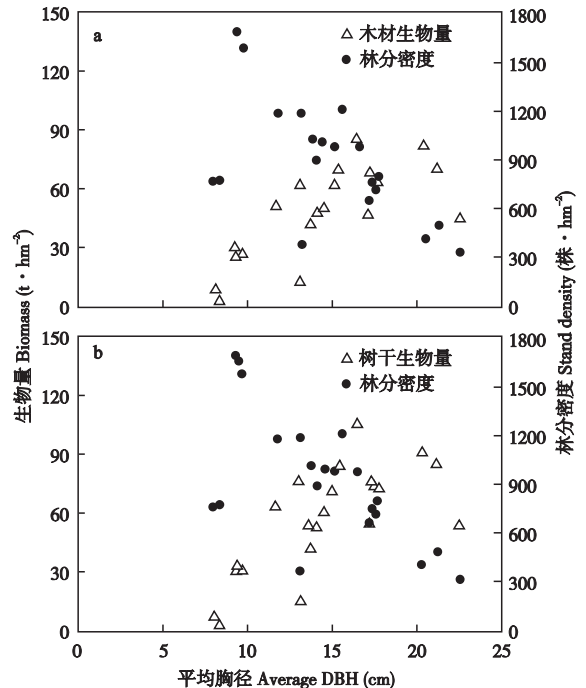


图3 针叶林生物量与平均胸径及林分密度的关系  
Fig. 3 Relationship between biomass and mean diameter and forest density of needle-leaved forest.  
a) 木材生物量 Wood biomass; b) 树干生物量 Trunk biomass.

2) 在阔叶林的树冠、木材、树枝和森林生物量模型中,参数 $N$ (林分密度)的估计系数为非常小的负值( $< -0.01$ )。在实测数据中,未成材的幼树(胸径 $< 4$  cm)也被计算株数。但计算样地生物量时,胸径 $< 4$  cm的幼树则被忽略,而在天然次生林中,这样的幼树普遍存在,从而导致了样地林分密度与其生物量关系的有偏估计。另外,通过分析系数相关矩阵发现<sup>[23]</sup>, $N$ 与影响生物量的重要因子平均胸径 $D$ 、平均树高 $H$ 呈负相关性( $R^2$ 分别为0.39和0.12)。以上原因很可能导致 $N$ 与几乎所有的生物量都呈负相关。同时还发现, $N$ 与另外一个影响生物量的重要因子 $B$ (胸高断面积)呈显著正相关。综合这些不同的影响,削弱了 $N$ 与生物量的负相关性(图4)。因此,模型中参数 $N$ 的估计系数为接近于零



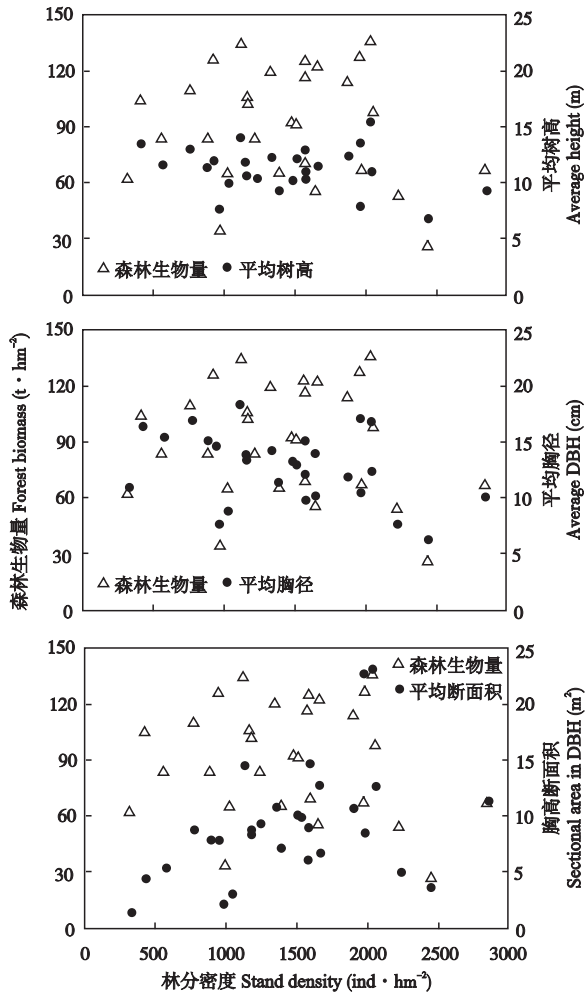


图4 阔叶林森林生物量与部分林分因子的关系

Fig. 4 Relationship between broad-leaved forest biomass and forest parameters.

的负值,实际上对生物量影响不大。

3)在针阔混交林的树枝生物量模型中,参数  $C$  的估计系数为负值,从数据来源分析,在进行森林资源清查时,郁闭度  $C$  是通过目测获得的,具有一定的不确定性,因而导致模型中参数系数估计的偏差。

综上所述,本文所建立的生物量模型可以对森林生物量作出合理的解释,具有实用性。

### 3.3 模型应用结果比较

为检验模型预测的准确性,应用分层随机采样法,针对3种森林类型,分别选取10个未参与建模的样地进行模型预测精度验证,结果见表5。模型估计平均相对误差均小于6%,满足实际森林生物量估测精度要求。

李意德等<sup>[16]</sup>对海南岛热带山地雨林林分生物量研究表明,采用生物量转换因子法估算的生物量较皆伐法高出20%~40%。与这一结果相比较,基于森林调查的相容性森林生物量模型优于生物量转

表5 模型预测精度验证结果

Tab. 5 Accuracy assessment of the models ( $n = 10$ )

森林类型 Forest type	实测森林生物量 Measured forest biomass $W$ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	估计森林生物量 Estimated forest biomass $\hat{W}$ ( $t \cdot hm^{-2}$ )	平均相对误差 Average relative error $E$ (%)
A	73.45	77.12	-4.76
B	90.63	85.65	5.82
C	82.36	87.30	-5.66

换因子法。Zhou等<sup>[28]</sup>、王玉辉等<sup>[21]</sup>利用森林资源清查资料对我国寒温带天然兴安落叶松林研究表明:其生物量与蓄积量之间呈双曲线关系,相关系数为0.96。但该模型是否适用于其它森林类型,还有待于进一步研究;而且该模型只描绘了林分总生物量与蓄积量之间的关系,没有考虑林分其它分量的生物量。基于森林调查的相容性森林生物量模型弥补了这些不足。

## 4 结 语

基于森林生物量的相容性理论,本研究充分利用森林生物量中各分量之间的代数关系,采用联立方程组为不同森林群落构造了一系列相容性生物量模型,并且在模型中引入了林分蓄积因子,得到了很高的预估精度,3种主要森林群落的森林生物量模型预估精度均在95%以上,基本上解决了森林生物量模型的相容性问题。在模型评价指标的选取上,不仅采用常规的剩余方差和相关系数,还采用了方差扩大因子VIF和预估精度来综合评价模型的拟合效果、统计效果和预估准确性,能较全面地反映模型的优劣。

在模型中,通过采用逐步回归方法在一定程度上削弱了自变量之间的多重共线性,但还有极个别的参数系数不能得到合理的解释,说明在保留的自变量中尚存在着一定的共线性。是否能采用其它方法解决多重共线性问题来改善生物量模型,还有待于进一步研究。二级联合估计模型均属有度量误差的模型,如果引入度量误差模型的估计方法,也许能进一步提高相容性模型的预估精度。

## 参考文献

- [1] Bousquet P, Ciais P, Peylin P, et al. 1999. Inverse modeling of annual atmospheric CO<sub>2</sub> sources and sinks I. Method and control inversion. *Journal of Geophysical Research*, **104**(D21): 26161–26178
- [2] Brown S, Gillespie AJR, Lugo AE. 1989. Biomass estimation methods for tropical forests with application to forest inventory data. *Forest Science*, **35**: 881–902
- [3] Brown S, Lugo AE. 1982. The storage and production

- of organic matter in tropical forest and their role in the global carbon cycle. *Biotropica*, **14**: 161 – 187
- [ 4 ] Brown S, Lugo AE. 1984. Biomass of tropical forests: A new estimate based on forest volumes. *Science*, **223**: 1290 – 1293
- [ 5 ] Chen JM, Cihlar J. 1996. Retrieving leaf area index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment*, **55**( 2 ): 153 – 162
- [ 6 ] Fang JY, Chen AP, Peng CH, *et al.* 2001. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, **292**: 2320 – 2322
- [ 7 ] Fang JY, Wang GG, Liu GH, *et al.* 1998. Forest biomass of China: An estimation based on the biomass-volume relationship. *Ecological Applications*, **8**: 1084 – 1091
- [ 8 ] Fang J-Y ( 方精云 ), Liu G-H ( 刘国华 ), Xu S-L ( 徐嵩龄 ). 1996. Biomass and net production of forest vegetation in China. *Acta Ecologica Sinica* ( 生态学报 ), **16**( 4 ): 497 – 508 ( in Chinese )
- [ 9 ] Fang J-Y ( 方精云 ), Pu S-L ( 朴世龙 ), Zhao S-Q ( 赵淑清 ). 2001. The carbon sink; The role of the middle and high latitudes terrestrial ecosystems in the northern hemisphere CO<sub>2</sub>. *Acta Phytocologica Sinica* ( 植物生态学报 ), **25**( 5 ): 594 – 602 ( in Chinese )
- [ 10 ] FAO. 2005. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress towards sustainable forest management [ EB/OL ]. [ 2005 – 11 – 03 ] <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/008/A0400E/A0400E13.pdf>, 172 – 173
- [ 11 ] IPCC ( Intergovernmental Panel on Climate Change ). 2001. Climate change 2001: The Scientific Basis. Cambridge: Cambridge University Press.
- [ 12 ] Isaev A, Korovin G, Zamolodchikov D, *et al.* 1995. Carbon stock and deposition in phytomass of the Russian forests. *Water, Air and Soil Pollution*, **82**: 247 – 256
- [ 13 ] Jiang Y-L ( 蒋延龄 ), Zhou G-S ( 周广胜 ). 2001. Carbon equilibrium in *Larix gmelinii* forest and impact of global change on it. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ), **12**( 4 ): 481 – 484 ( in Chinese )
- [ 14 ] Kramer PJ. 1981. Carbon dioxide concentration, photosynthesis and dry matter production. *BioScience*, **31**: 29 – 33
- [ 15 ] Krankina ON, Harmon ME, Winjum JK. 1996. Carbon storage and sequestration in the Russian forest sector. *Ambio*, **25**( 4 ): 284 – 288
- [ 16 ] Li Y-D ( 李意德 ), Zeng Q-B ( 曾庆波 ), Wu Z-M ( 吴仲民 ). 1992. Biomass of tropical mountain forest ecosystem at Jianfengling, Hainan Island. *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica* ( 植物生态与地植物学报 ), **16**( 4 ): 293 – 299 ( in Chinese )
- [ 17 ] Schroeder P, Brown S, Mo J, *et al.* 1997. Biomass estimation for temperate broadleaf forests of the United States using inventory data. *Forest Science*, **43**: 424 – 434
- [ 18 ] Tang S-Z ( 唐守正 ), Li Y ( 李 勇 ). 2002. The Statistical Basic on Biomathematical Model. Beijing: Science Press. ( in Chinese )
- [ 19 ] Tang S-Z ( 唐守正 ), Zhang H-R ( 张会儒 ), Xu H ( 胥 辉 ). 2000. Study on establish and estimate method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae* ( 林业科学 ), **36**( supp. 1 ): 19 – 27 ( in Chinese )
- [ 20 ] Tian H, Melillo JM, Kicklighter DW, *et al.* 1999. The sensitivity of terrestrial carbon storage to historical climate variability and atmospheric CO<sub>2</sub> in the United States. *Tellus*, **51B**: 414 – 452
- [ 21 ] Wang Y-H ( 王玉辉 ), Zhou G-S ( 周广胜 ), Jiang Y-L ( 蒋延龄 ), *et al.* 2001. Estimating biomass and NPP of Larix forests using forest inventory data ( FID ). *Acta Phytocologica Sinica* ( 植物生态学报 ), **25**( 4 ): 420 – 425 ( in Chinese )
- [ 22 ] Woodwell GM, Whittaker RH, Reiners WA, *et al.* 1978. The biota and the world carbon budget. *Science*, **199**: 141 – 146
- [ 23 ] Xing Y-Q ( 邢艳秋 ). 2005. Regional Forest Biomass and Carbon Storage Estimation Study for Northeast Natural Forest Based On RS and GIS. Ph. D. dissertation. Harbin: Northeast Forestry University. ( in Chinese )
- [ 24 ] Xu H ( 胥 辉 ), Zhang H-R ( 张会儒 ). 2002. Research on the Tree Biomass Model. Kunming: Yunnan Science and Technology Press. ( in Chinese )
- [ 25 ] Yang P-Q ( 杨清培 ), Li M-G ( 李鸣光 ), Wang B-S ( 王伯荪 ). 2003. Dynamics of biomass and net primary productivity in succession of south subtropical forests in Southwest Guangdong. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ), **12**( 12 ): 2136 – 2140 ( in Chinese )
- [ 26 ] Zhang XQ, Xu DY. 2003. Potential carbon sequestration in China's forests. *Environmental Science & Policy*, **6**: 421 – 432
- [ 27 ] Zhao M ( 赵 敏 ), Zhou G-S ( 周广胜 ). 2004. Forest Inventory Data ( FID ) – Based biomass models and their prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology* ( 应用生态学报 ), **15**( 8 ): 1468 – 1472 ( in Chinese )
- [ 28 ] Zhou GS, Wang YH, Jiang YL, *et al.* 2002. Estimating biomass and net primary production from forest inventory data: A case study of China's *Larix* forests. *Forest Ecology and Management*, **169**: 149 – 157

---

作者简介 邢艳秋,女,1970年生,博士,副教授。主要从事森林生态及经营管理研究,发表文章11篇。E-mail: yanqiuqing@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤琴

---