

文章编号: 1001-1498(2010)06-0797-07

利用度量误差模型方法建立相容性 立木生物量方程系统

曾伟生, 唐守正*

(中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091)

摘要: 本文以马尾松 (*Pinus massoniana*) 地上生物量数据为例, 通过利用度量误差模型方法, 研究建立了地上生物量与干、皮、枝、叶 4 个分量的相容性方程系统。首先, 从各个分量所占比例变化特点分析入手, 采用比值函数分级联合控制和比例函数总量直接控制 2 种方案构建了以地上总生物量为基础的相容性方程系统, 其中对地上总生物量模型的估计, 又采取了独立估计和联合估计 2 种处理方法。结果表明, 分级联合控制方案和总量直接控制方案效果基本相当, 而独立估计方法和联合估计方法也几乎没有差异。然后, 还对一元、二元和三元模型的拟合效果进行了对比分析, 结果显示随着解释变量的增加, 估计值的标准误差和平均预估误差会有所下降, 但对模型效果的改善幅度并不大。最后, 对各个分量占地上总生物量的比例随直径的变化特点进行了分析, 结果表明干材生物量所占比例随林木直径的增大而提高, 干皮和树叶生物量所占比例则随林木直径的增大而下降, 而树枝生物量所占比例相对比较稳定。本文所建立的相容性生物量方程系统, 地上总生物量的预估精度达到 95% 以上, 树叶生物量的预估精度最低, 但也达到了 85% 以上。

关键词: 立木生物量; 地上生物量; 度量误差模型; 平均预估误差; 相容性; 马尾松

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

Using Measurement Error Modeling Method to Establish Compatible Single-Tree Biomass Equations System

ZENG Wei-sheng, TANG Shou-zheng

(Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: A system of equations for total biomass and the components must be compatible or additive, that is, the predicted values from the component biomass equations should add up to the predicted value from the total biomass equation. Based on the above-ground biomass data of Masson pine (*Pinus massoniana*) of southern China, the compatible systems of single-tree biomass equations for total above-ground biomass and the four components (stem wood, stem bark, branch, and foliage) were established using the error-in-variable modeling method in this paper. Firstly, starting from the analysis of properties of the component proportions to total biomass, two alternative approaches, controlling jointly from level to level by ratio functions and controlling directly under total biomass by proportion functions, were presented to design the compatible system of biomass equations based on the above-ground biomass which could be estimated independently apart from the system or estimated simultaneously in the system. It was showed that the approach controlling jointly by ratio functions was same effective as the one controlling directly

收稿日期: 2010-04-10

基金项目: 国家林业局专题“基于清查资料的中国森林植被生物量和碳储量评估”和“十一五”国家科技支撑计划课题“东北天然林保护与可持续经营技术试验示范(2006BAD03A08)”

作者简介: 曾伟生(1966—), 湖南涟源人, 在读博士, 教授级高工, 主要从事森林资源监测和林业数表研制工作。

* 通讯作者: 唐守正, E-mail: stang@caf.ac.cn

by proportion functions, and the method that total above-ground biomass being estimated independently had almost the same prediction precision as that being estimated simultaneously. Secondly, the goodness-of-fit between biomass models with one variable and two or three variables were compared, and the results showed that the standard error of estimate (SEE) and mean prediction error (MPE) would decreased with increasing explainable variables, but the contribution to prediction precision was not high. Finally, the properties of the proportions of four components to total above-ground biomass were analyzed, and the results showed that the proportion of stem wood would increased with growing diameter, the proportions of stem bark and foliage would decreased with growing diameter, and the proportion of branches might be relatively stable. From the compatible system of biomass equations established in this paper, the prediction precision of total above-ground biomass estimate was higher than 95%, and the precision of foliage biomass estimate was the lowest but higher than 85%.

Key words: single-tree biomass; above-ground biomass; error-in-variable model; mean prediction error; compatibility; Masson pine

森林生态系统作为陆地生态系统的主体,在维护全球气候系统、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用。因此,世界各国越来越重视对森林生物量的监测^[1]。林木生物量涉及干材、干皮、树枝、树叶、树根等各个分量。尽管作为大尺度森林生物量监测,更多关注的是总生物量及地上和地下生物量^[1-3],但是,为了研究森林生态系统的生产力和营养物质分布,需要了解树干、树冠的生物量以及比例,而树叶生物量与叶面积指数这一森林生态系统的重要参数也是高度相关的。因此,在地上生物量估计的基础上,进一步对干、皮、枝、叶等各项分量进行估计是十分必要的。

林木总生物量应该等于各分项生物量之和。为了满足这一基本的逻辑关系,在同时建立干材、干皮、树枝、树叶生物量和地上生物量方程时,就必需保证各个方程之间具有兼容性(或可加性)。为此,骆期邦等^[4]研究提出了线性联立模型和非线性联合估计模型两种方法,来解决总量和分量之间相容性问题;唐守正等^[5]对 5 种非线性联合估计方案进行了对比研究,提出了以树干生物量作为控制量、采用两级联合估计的方法;Parresol^[6]提出采用非线性似然无关回归方法,来解决非线性生物量方程的可加性问题;Bi 等^[7]建立了以对数转换为基础的可加性生物量方程系统,并采用似然无关回归对方程参数和偏差校正因子进行联合估计。本文以我国南方的主要针叶树种马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)为例,利用度量误差模型方法^[8-11],研究建立地上生物量与干、皮、枝、叶 4 个分项生物量的相容性方程系统,并对各个分量所占比例变化的特点进行分析。

1 数据来源

本文所用数据为我国南方马尾松的立木地上生物量实测数据,共 150 株样木,采集地点涉及江苏、浙江、安徽、福建、江西、湖南、广东、广西、贵州等 9 省区,样本单元数按各省资源多少分配,并兼顾天然和人工起源,其中天然 77 株,人工 73 株;福建 22 株,浙江、江西、湖南、广西、贵州各 20 株,安徽、广东各 10 株,江苏 8 株。样木按 2、4、6、8、12、16、20、26、32、38 cm 以上 10 个径阶均匀分布,每个径阶的样木按树高级也均匀分布,在大尺度范围内具有广泛的代表性。全部样木都实测胸径和冠幅,将样木伐倒后,测量树干长度(树高)和活树冠长度(冠长),分干材、干皮、树枝、树叶称鲜质量,并分别抽取样品带回实验室,在 85 ℃ 恒温下烘干至衡质量,根据样品鲜质量和干质量分别推算样木各部分干质量并汇总得到地上部分干质量。

2 研究方法

通常的回归模型,是假定自变量的观测值不含误差,而因变量的观测值含有误差。误差可能有各种来源,如抽样误差、测量误差等,一般统称为度量误差。当自变量和因变量的观测值中都含有度量误差时,通常的回归模型估计方法就不再适用,而必需采用度量误差模型方法^[8-11]。如李永慈等^[12]就用度量误差模型方法编制了相容的生长过程表和材积表;李永慈、唐守正^[13]对带度量误差的全林整体模型的参数估计进行了专题研究,认为在建立带度量误差的全林整体模型时,非线性度量误差联立方程组方法明显优于最小二乘法。

多元非线性度量误差模型(即非线性误差变量

联立方程组)的向量形式为^[11]:

$$\begin{aligned} f(y_i, x_i, c) &= 0 \\ Y_i &= y_i + e_i, \quad i = 1, \dots, n \\ E(e_i) &= 0, \quad \text{cov}(e_i) = \Sigma \end{aligned} \quad (1)$$

式中, x_i 是 q 维无误差变量 (error-out-variable) 的观测数据, y_i 是 p 维误差变量 (error-in-variable) 的观测数据, f 是 m 维向量函数, y_i 是 Y_i 的未知真值, 误差的协方差矩阵记为 Σ , Σ 是 e_i 的误差结构矩阵, Σ 为估计误差。

在事先已经建立地上总生物量模型的情况下, 来研究如何构建干、皮、枝、叶各分项生物量与地上总生物量相容的生物量方程系统。借鉴骆期邦等、唐守正等建立非线性联合估计模型思路^[4,5], 按以下 2 个方案来构建相容性方程系统。

2.1 分级联合控制方案

该方案按照地上总生物量分成树干、树冠生物量, 树干、树冠生物量又再分为干材、干皮、树枝、树叶 4 个分项生物量的思路进行控制, 确保各级分量之和等于总量。假设树冠与树干的比值函数为 $f_1(x)$, 干皮与干材的比值函数为 $f_2(x)$, 树叶与树枝的比值函数为 $f_3(x)$, 地上总生物量模型为 $f_0(x)$, 则相容性生物量方程系统为:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{1 + f_2(x)} \cdot \frac{1}{1 + f_1(x)} \cdot f_0(x) \\ y_2 &= \frac{f_2(x)}{1 + f_2(x)} \cdot \frac{1}{1 + f_1(x)} \cdot f_0(x) \\ y_3 &= \frac{1}{1 + f_3(x)} \cdot \frac{f_1(x)}{1 + f_1(x)} \cdot f_0(x) \\ y_4 &= \frac{f_3(x)}{1 + f_3(x)} \cdot \frac{f_1(x)}{1 + f_1(x)} \cdot f_0(x) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, y_1, y_2, y_3, y_4 分别为干材、干皮、树枝、树叶的生物量, x 为林木胸径 D 、树高 H 、冠幅 Cw 等。如果 x 只考虑 D , (2) 式就是一元生物量模型系统; 如果同时考虑 D 和 H , 就是二元模型系统; 如果还考虑 Cw 等因子, 就是三元或多元模型系统。模型系统(2)的每一个方程由 3 个部分构成: 右边的 $f_0(x)$ 为地上总生物量, 中间的分式为树干或树冠占地上总生物量的比例, 左边的分式为干材、干皮占树干生物量的比例或树枝、树叶占树冠生物量的比例。构建一元、二元和三元系列生物量模型系统, 需要先根据生物量数据分析确定 $f_1(x), f_2(x), f_3(x)$ 这 3 个比值函数的形式, 并求出各个参数的估计值; 然后, 再用这些估计值作为初值, 用度量误差模型方法求解模型系

统(2)的参数值。

2.2 总量直接控制方案

该方案把地上总生物量直接分成干材、干皮、树枝、树叶 4 个分项, 确保各分量之和等于总量。假设干材占总生物量的相对比例函数为 $g_1(x)$, 干皮占总生物量的相对比例函数为 $g_2(x)$, 树叶占总生物量的相对比例函数为 $g_3(x)$, 地上总生物量模型为 $f_0(x)$, 则相容性生物量方程系统为:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{g_1(x)}{1 + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \cdot f_0(x) \\ y_2 &= \frac{g_2(x)}{1 + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \cdot f_0(x) \\ y_3 &= \frac{1}{1 + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \cdot f_0(x) \\ y_4 &= \frac{g_3(x)}{1 + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x)} \cdot f_0(x) \end{aligned} \quad (3)$$

之所以选择树枝方程的分子作为 1, 是因为其它 3 个分量占总量的比例随林木胸径等的变化而变化, 而树枝生物量占地上总生物量的比例则变化很小, 这一点可以参见后面的结果。同样, 构建一元、二元和三元系列生物量模型系统, 需要先根据生物量数据分析确定 $g_1(x), g_2(x), g_3(x)$ 这 3 个相对比例函数(相对于树枝为 1 的变化函数)的形式, 并求出各个参数的估计值; 然后, 再用这些估计值作为初值, 用度量误差模型方法求解模型系统(3)的参数值。

根据分析, (2) 式中的比值函数 $f_i(x)$ 和 (3) 式中的相对比例函数 $g_i(x)$ 存在如下关系:

$$\begin{aligned} f_1(x) &= \frac{1 + g_3(x)}{g_1(x) + g_2(x)} \\ f_2(x) &= g_2(x) / g_1(x) \\ f_3(x) &= g_3(x) \\ g_1(x) &= \frac{1 + f_3(x)}{1 + f_2(x)} \cdot \frac{1}{f_1(x)} \\ g_2(x) &= \frac{1 + f_3(x)}{1 + f_2(x)} \cdot \frac{f_2(x)}{f_1(x)} \\ g_3(x) &= f_3(x) \end{aligned} \quad (4)$$

对于(2)、(3)式, 如果地上生物量 $f_0(x)$ 采用预先独立估计的值参与模型拟合, 则其预估值相当于误差变量观测数据, 从而必需采用度量误差模型方法求解各方程参数; 如果地上生物量 $f_0(x)$ 未知, 其参数也一起进行联合估计, 则非线性误差变量联立方程组就等同于多元非线性回归模型。本研究将对

独立估计和联合估计2种处理的结果进行对比分析。

另外,由于生物量数据普遍存在着异方差性,在利用度量误差模型方法进行拟合时还要采取措施消除异方差的影响^[6,14-18]。常用的方法是采用对数回归或加权回归。由于(2)、(3)式无法通过对数变换转化为线性形式,因此这里采用非线性加权回归方法,而每个方程的权函数根据其独立拟合的方程确定。通过对通用权函数 $W=1/f(x)^2$ 及根据独立拟合方程的方差建立的权函数 $W=1/g(x)^2$ 进行对比分析后发现,后者的效果要略好;而且对源于方差的权函数,按一元、二元和三元回归方程进行了对比,发现其差异很小。故本文采用的权函数是根据干材、干皮、树枝、树叶独立拟合方程的方差建立的一元回归方程,在具体采用 ForStat2.1 软件求解参数时,采取每一个方程两边乘以权重变量 $G=1/g(D)$ 的方法进行处理。

3 结果与分析

利用南方马尾松 150 株样木的立木地上生物量实测数据,首先要确定(1)、(2)式中的各个比值函数 $f_i(x)$ 和比例函数 $g_i(x)$ 。根据分析,这些比值或比例主要与林木直径 D 相关,其中 3 个比值函数 $f_1(D)$ 、 $f_2(D)$ 、 $f_3(D)$ 均与 D 呈负相关,3 个比例函数中干材占比 $g_1(D)$ 与 D 呈正相关,干皮、树叶占比 $g_2(D)$ 、 $g_3(D)$ 与 D 呈负相关(参见图 1、图 2)。 $f_i(D)$ 和 $g_i(D)$ 的通式都可以表示为如下幂函数形式:

$$f_i(D) = a_i D^{b_i} \quad (6)$$

$$g_i(D) = a_i D^{b_i} \quad (7)$$

地上生物量方程 $f_0(x)$ 首先考虑应用最广的一元模型。如果 $f_0(x)$ 采用二元或三元模型,则 $f_i(x)$ 和 $g_i(x)$ 除了考虑自变量 D 以外,也还要考虑 H 、 Cw 等因子。

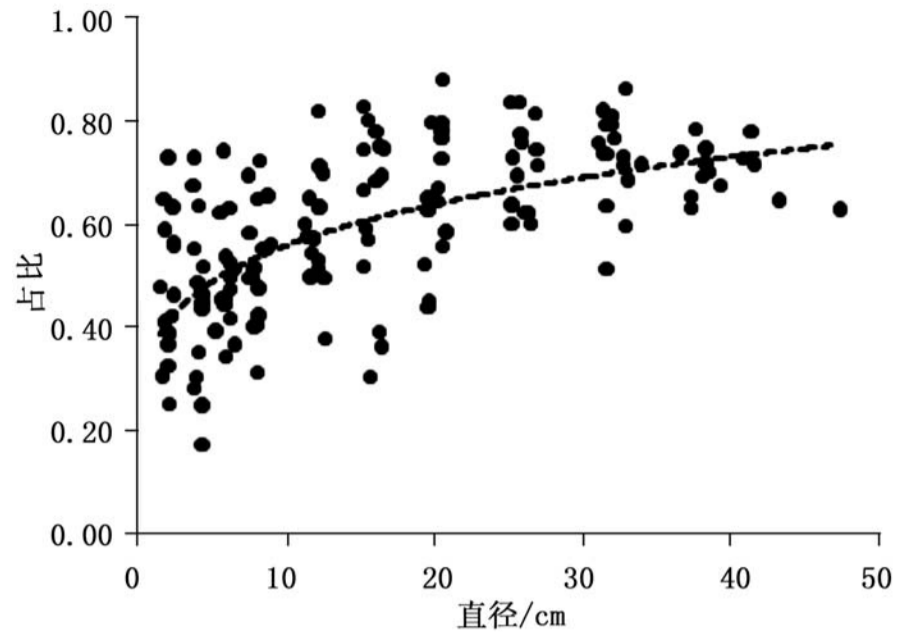


图 1 干材生物量占地上生物量比例随直径的变化

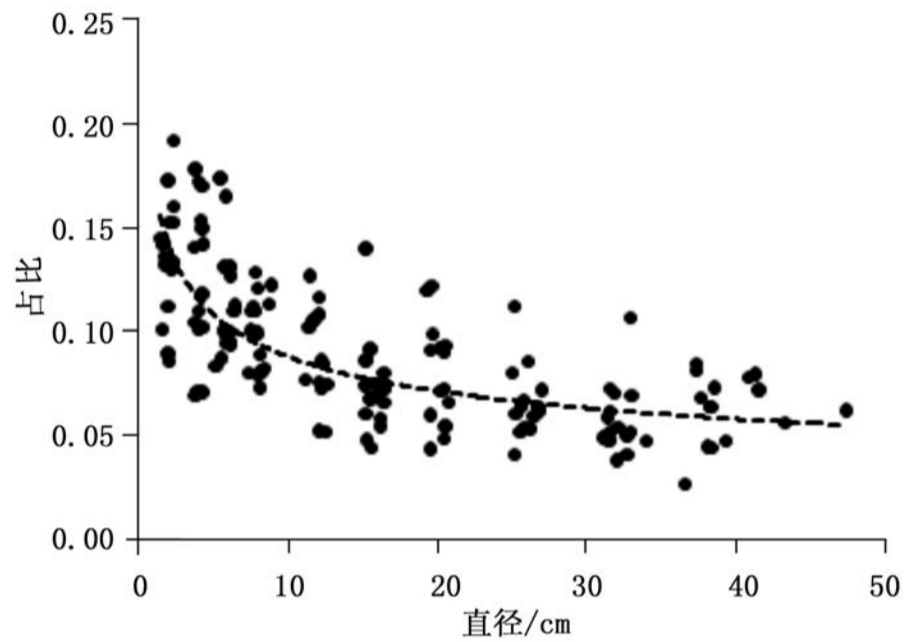


图 2 干皮生物量占地上生物量比例随直径的变化

3.1 一元模型不同方案的拟合结果

表 1、表 2 为一元相容性生物量方程系统(2)、(3)采用度量误差模型方法得到的参数估计值及其统计指标 R^2 (确定系数)、 SEE (估计值的标准误差)和 MPE (平均预估误差),其中地上生物量模型 $f_0(x)$ 按独立估计和联合估计 2 种方法进行处理。参数估计值的求解采用 ForStat2.1 软件,统计指标利用参数估计值进行计算。结果显示:方程系统(2)、(3)之间差异很小,其中干材、树枝的生物量估计,

表 1 一元相容性生物量方程系统(2)、(3)的参数估计值

方程系统	参数估计值								$f_0(x)$ 估计方法
	a_0	b_0	a_1	b_1	a_2	b_2	a_3	b_3	
(2)	0.108 08	2.379 89	0.864 55	-0.311 77	0.416 34	-0.449 22	2.693 36	-0.694 04	独立估计
	0.096 40	2.420 78	0.875 05	-0.319 59	0.449 49	-0.475 25	2.810 36	-0.709 46	联合估计
(3)	0.108 08	2.379 89	2.268 54	0.153 13	0.949 69	-0.297 51	2.622 72	-0.684 63	独立估计
	0.09728	2.417 99	2.256 34	0.160 68	1.021 07	-0.317 15	2.678 45	-0.694 12	联合估计

注:干材、干皮、树枝、树叶 4 个分量方程的权重变量分别为 $1/D^{1.76}$ 、 $1/D^{1.77}$ 、 $1/D^{1.76}$ 、 $1/D^{1.41}$ 。表 2、表 3、表 4 亦同。

表 2 一元相容性生物量方程系统(2)、(3)的统计指标

方程系统	确定系数 R^2					估计值的标准误差 SEE					平均预估误差 $MPE/\%$					$f_0(x)$ 估计方法
	干材	干皮	树枝	树叶	总量	干材	干皮	树枝	树叶	总量	干材	干皮	树枝	树叶	总量	
(2)	0.927 6	0.925 2	0.848 6	0.575 6	0.956 4	46.23	4.02	18.84	6.78	48.98	6.24	5.98	9.91	14.20	4.68	独立估计
	0.926 4	0.928 6	0.853 9	0.574 4	0.957 6	46.61	3.92	18.51	6.79	48.31	6.29	5.84	9.74	14.23	4.62	联合估计
(3)	0.927 8	0.924 1	0.853 5	0.572 7	0.956 4	46.18	4.04	18.54	6.80	48.98	6.23	6.02	9.75	14.25	4.68	独立估计
	0.927 2	0.927 4	0.857 3	0.572 0	0.957 6	46.36	3.96	18.29	6.81	48.29	6.26	5.89	9.63	14.27	4.62	联合估计

方程系统(3)的统计指标略好,干皮、树叶的生物量估计,方程系统(2)的统计指标略好,说明分级联合控制方案和总量直接控制方案效果基本相当;预先对方程系统(2)、(3)中的地上生物量模型 $f_0(x)$ 独立估计后,再用度量误差模型方法进行拟合,与将 $f_0(x)$ 纳入方程系统进行联合估计的做法相比,各项统计指标基本上没有差异(后面的二元和三元模型更能说明这一点),说明联合估计主要是协调和解决好各个分量之间的比例关系;地上总生物量的预估精度最高,达到 95% 以上;其次是干材、干皮生物量,预估精度在 94% 左右;然后是树枝生物量,预估精度在 90% 以上;而树叶生物量的预估精度最低,但也超过了 85%。

3.2 二元和三元模型的拟合结果

由于方程系统(2)和(3)的拟合效果几乎没有差异,考虑到(3)式没有(2)式复杂,而且利用(3)式中的相对比例函数按(4)式导算各比值函数也相对

简单一些,故这里的二元和三元模型只考虑方程系统(3)。最终确定的地上生物量模型 $f_0(x)$ 的二元和三元模型结构形式分别为:

$$f_0(D, H) = a_0 D^{b_0} H^{c_0} \quad (8)$$

$$f_0(D, H, CW) = a_0 D^{b_0} H^{c_0} CW^{d_0} \quad (9)$$

相对比值函数 $g_i(x)$ 的二元结构形式为:

$$g_1(x) = a_1 D^{b_1} H^{c_1} \quad (10)$$

$$g_2(x) = a_2 D^{b_2} \quad (11)$$

$$g_3(x) = a_3 H^{c_3} \quad (12)$$

增加的第 3 项冠幅因子 CW 只对 $g_2(x)$ 有作用,所以考虑三元模型时 $g_1(x)$ 和 $g_3(x)$ 的结构与二元模型相同, $g_2(x)$ 的三元结构形式为:

$$g_2(x) = a_2 D^{b_2} CW^{c_2} \quad (13)$$

表 3 和表 4 为二元和三元相容性生物量方程系统(3)采用度量误差模型方法得到的参数估计值及其统计指标,其中地上生物量模型 $f_0(x)$ 同样按独立估计和联合估计 2 种方法进行处理。

表 3 二元和三元相容性生物量方程系统(3)的参数估计值

模型	$f_0(x)$ 结构	$g_i(x)$ 结构	参数估计值												$f_0(x)$ 估计方法
			a_0	b_0	c_0	d_0	a_1	b_1	c_1	a_2	b_2	c_2	a_3	b_3	
二元	(4) (6) (7) (8)	(8)	0.072 234	2.079 53	0.491 13	/	0.904 13	-0.497 19	1.073 21	0.870 83	-0.267 95	/	4.055 80	-0.958 98	独立估计
			0.065 083	2.053 48	0.559 22	/	0.899 32	-0.513 13	1.092 10	0.926 96	-0.287 15	/	4.179 19	-0.968 64	联合估计
三元	(5) (6) (9) (8)	(8)	0.070 410	1.964 65	0.533 30	0.153 10	0.890 91	-0.504 56	1.086 30	0.824 43	-0.089 55	-0.285 51	4.111 88	-0.962 30	独立估计
			0.068 519	1.914 47	0.575 50	0.192 54	0.867 32	-0.520 65	1.113 56	0.826 71	-0.079 79	-0.303 99	4.129 38	-0.963 34	联合估计

表 4 二元和三元相容性生物量方程系统(3)的统计指标

模型	$f_0(x)$ 结构	$g_i(x)$ 结构	确定系数 R^2					估计值的标准误差 SEE					平均预估误差 $MPE/\%$					$f_0(x)$ 估计方法
			干材	干皮	树枝	树叶	总量	干材	干皮	树枝	树叶	总量	干材	干皮	树枝	树叶	总量	
二元	(4) (6) (7) (8)	(8)	0.953 9	0.926 4	0.859 9	0.580 9	0.965 3	36.91	3.98	18.12	6.74	43.69	4.98	5.92	9.54	14.12	4.18	独立估计
			0.953 3	0.928 2	0.861 5	0.579 8	0.965 2	37.14	3.93	18.02	6.75	43.72	5.01	5.85	9.48	14.13	4.18	联合估计
三元	(5) (6) (9) (8)	(8)	0.957 9	0.928 2	0.856 0	0.589 7	0.967 4	35.25	3.93	18.38	6.67	42.32	4.76	5.85	9.67	13.97	4.05	独立估计
			0.958 1	0.928 9	0.854 5	0.591 8	0.967 3	35.18	3.92	18.47	6.65	42.41	4.75	5.83	9.72	13.93	4.05	联合估计

从表 4 及与表 2 数据的对比可以看出,随着地上生物量模型 $f_0(x)$ 从一元提升到三元,地上生物总量的 SEE 、 MPE 指标有一定下降,确定系数 R^2 也有所提高,尤其是从一元模型提高到二元模型有较大改进(预估精度平均提高了 0.37 个百分点),而从二元模型提高到三元模型则改进幅度并不大(预估精度仅提高 0.13 个百分点);而对 4 个分量的估计,主

要是改进了干材生物量的估计,其它 3 个分量的预估精度提高很少。从模型的有效性和实用性角度考虑,采用一元生物量模型来估计大尺度范围的森林生物量是合适的;而要得到更高精度的预估值,则可以考虑采用二元生物量模型。

3.3 各分量所占比例变化分析

根据一元相容性生物量方程系统(2)和(3)及

表1的参数估计结果,可以对各个分量占地上总生物量的比例随林木直径的变化进行分析(见图3)。很明显,2个方案所建模型的4条比例变化曲线几乎是重合的。表5为方程系统(3)的4个分项生物量占地上总生物量的比例随林木直径的具体变化数据。可以看出,干材生物量占地上总生物量的比例随林木直径的增大而提高,从2 cm的43%逐渐提高到50 cm的74%;干皮和树叶生物量所占比例则随林木直径的增大而下降,其中干皮生物量所占比例从2 cm的13%逐渐下降到50 cm的5%,树叶生物量所占比例从2 cm的28%逐渐下降到50 cm的3%;树枝生物量所占比例相对比较稳定,基本保持在18%左右,大概在直径11 cm左右最大,超过了19%,然后随直径的增大逐渐下降至50 cm的18%。图3和表5所反映的变化趋势与建模样本所表现出的变化特征是完全吻合的(参见图1、图2)。

表5 各分量所占比例随直径的变化 %

D/cm	干材	干皮	树枝	树叶
2	42.56	13.04	16.87	27.53
4	51.48	11.54	18.35	18.63
6	56.20	10.49	18.83	14.48
8	59.27	9.72	19.00	12.00
10	61.50	9.12	19.05	10.33
12	63.21	8.64	19.04	9.11
14	64.58	8.23	19.00	8.18
16	65.72	7.89	18.95	7.45
18	66.68	7.59	18.88	6.85
20	67.52	7.33	18.81	6.35
22	68.24	7.09	18.74	5.92
24	68.89	6.89	18.67	5.56
26	69.47	6.70	18.59	5.24
28	69.99	6.53	18.52	4.96
30	70.46	6.37	18.45	4.72
32	70.90	6.23	18.38	4.49
34	71.30	6.09	18.31	4.30
36	71.67	5.97	18.25	4.12
38	72.01	5.85	18.19	3.95
40	72.33	5.74	18.12	3.80
42	72.63	5.64	18.06	3.67
44	72.91	5.55	18.00	3.54
46	73.17	5.46	17.95	3.42
48	73.42	5.37	17.89	3.31
50	73.66	5.29	17.84	3.21

4 结论与讨论

本文以南方马尾松地上生物量数据为例,通过利用度量误差模型方法,研究建立了地上生物量与干、皮、枝、叶4个分项生物量的相容性方程系统,并对各个分量所占比例变化特点进行了分析。可以得

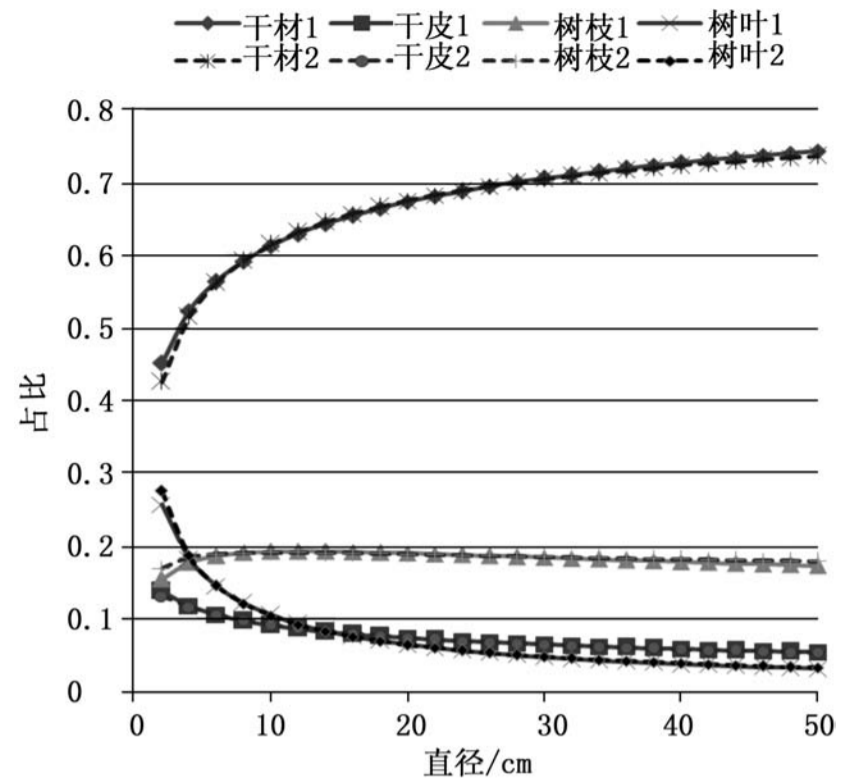


图3 各分量所占比例随直径的变化

到以下结论:

(1) 以地上总生物量为基础构建相容性方程系统,可以采用分级联合控制和总量直接控制2种方案,结果表明2种方案的拟合效果差异不大,都是行之有效的建模方案;由于2套方程系统之间存在着内部关联,从模型的复杂程度考虑,建议采用总量直接控制方案。

(2) 对地上总生物量模型的估计,可以采取独立估计和联合估计2种处理方法,结果表明2种方法的预估结果几乎没有差异,联合估计主要是协调和解决好各个分量之间的比例关系。因此,可以预先单独建立地上生物量模型,再将其预估结果代入相容性方程系统,用度量误差模型方法求解其它4个分量模型的参数。

(3) 通过对一元、二元和三元模型的对比分析,结果显示随着解释变量的增加,估计值的标准误差和平均预估误差会有所下降,其中从一元模型提高到二元模型有较大改进,而从二元模型提高到三元模型则改进幅度并不大。从模型的有效性和实用性角度考虑,采用一元生物量模型来估计大尺度范围的森林生物量是合适的;而要得到更高精度的预估,则可以考虑采用二元生物量模型。

(4) 林木各个分量占地上总生物量的比例随直径的增加而呈现不同的变化特点,其中干材生物量占地上总生物量的比例随林木直径的增大而提高,干皮和树叶生物量所占比例则随林木直径的增大而下降,而树枝生物量所占比例相对比较稳定。

(5) 本文所建立的一元相容性生物量方程系

统,地上总生物量的预估精度最高,达到95%以上;其次是干材、干皮生物量,预估精度在94%左右;然后是树枝生物量,预估精度达到90%以上;而树叶生物量的预估精度最低,但也超过了85%。二元和三元相容性生物量方程系统的预估精度还要略高一些。

本文的立木生物量模型,是对应于部颁标准立木材积表(LY208—77)中马尾松(一)的编表总体范围建立的,其应用原则上不得超出该范围。即使是在建模总体范围内应用,也存在着估计尺度的问题。对于省级行政区域等大尺度的生物量估计,采用一元模型可能是合适的;而对于某些局部地区等小尺度的生物量估计,建议采用二元甚至三元模型。另外,由于没有分别起源建立模型,当用于某单一起源的生物量估计时可能存在偏差。若要准确估计不同起源的马尾松林生物量,需要对立木生物量数据按起源进行差异显著性分析。如果不同起源的数据没有显著差异,就可以采用合并建立的模型;如果有显著差异,则应该分别起源建立模型,并评定其预估精度是否达到要求。若预估精度达不到要求,还需要补充收集样本资料后重新建立模型。这些内容,有待另文进行研究和探讨。

参考文献:

- [1] ompo E, Gschwantner T, Lawrence M, *et al.*. National Forest Inventories: Pathways for Common Reporting[M]. Springer, New York, 2010
- [2] Jenkins JC, Chojnacky DC, Heath LS, *et al.*. National-scale biomass estimators for United States tree species[J]. *For Sci*, 2003, 49(1): 12 - 35
- [3] FAO. Global Forest Resources Assessment 2005: Progress Towards Sustainable Forest Management. FAO Forestry Paper 147[R]. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 2006
- [4] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 等. 立木地上部分生物量模型的建立及其应用研究[J]. *自然资源学报*, 1999, 14(3): 271 - 277
- [5] 唐守正, 张会儒, 胥辉. 相容性生物量模型的建立及其估计方法研究[J]. *林业科学*, 2000, 36(专刊1): 19 - 27
- [6] Parresol B R. Additivity of nonlinear biomass equations[J]. *Can J For Res*, 2001, 31: 865 - 878
- [7] Bi H, Turner J, Lambert M J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia[J]. *Trees*, 2004, 18: 467 - 479
- [8] Tang SZ, Li Y, Wang Y H. Simultaneous equations, error-in-variable models, and model integration in systems ecology[J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142: 285 - 294
- [9] Tang SZ, Wang Y H. A parameter estimation program for the error-in-variable model[J]. *Ecological Modelling*, 2002, 156: 225 - 236
- [10] 唐守正, 李勇. 生物数学模型的统计学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [11] 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
- [12] 李永慈, 唐守正, 李海奎, 等. 用度量误差模型方法编制相容的生长过程表和材积表[J]. *生物数学学报*, 2004, 19(2): 199 - 204
- [13] 李永慈, 唐守正. 带度量误差的全林整体模型参数估计研究[J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(1): 23 - 27
- [14] 曾伟生. 再论加权最小二乘法中权函数的选择[J]. *中南林业调查规划*, 1998, 17(3): 9 - 11
- [15] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 论加权回归与建模[J]. *林业科学*, 1999, 35(5): 5 - 11
- [16] 胥辉. 生物量模型方差非齐性研究[J]. *西北林学院学报*, 1999, 19(2): 73 - 77
- [17] 张会儒, 唐守正, 胥辉. 关于生物量模型中的异方差问题[J]. *林业资源管理*, 1999(1): 46 - 49
- [18] Parresol B R. Assessing Tree and Stand Biomass: A Review with Examples and, Critical Comparisons[J]. *For Sci*, 1999, 45(4): 573 - 593