

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第34卷 第6期 Vol.34 No.6 **2014**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 34 卷 第 6 期 2014 年 3 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 全球气候变暖对凋落物分解的影响..... 宋 飘,张乃莉,马克平,等 (1327)
- 从系统到景观:区域物质流分析的景观取向 张晓刚,曾 辉 (1340)
- 论湿地生态系统服务的多维度价值评估方法..... 宋豫秦,张晓蕾 (1352)
- 保幼激素在昆虫中的分子作用机理..... 金敏娜,林欣大 (1361)
- 岩画和壁画类文物微生物病害研究进展..... 李 强,葛琴雅,潘晓轩,等 (1371)
- 基于 3S 技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究 朱卫红,苗承玉,郑小军,等 (1379)
- 跨界保护区网络构建研究进展..... 王 伟,田 瑜,常 明,等 (1391)

个体与基础生态

- 速生树种尾巨桉和竹柳幼苗耗水特性和水分利用效率..... 邱 权,潘 昕,李吉跃,等 (1401)
- 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响..... 褚延梅,杨 健,李景吉,等 (1411)
- 气象要素及土壤理化性质对不同土地利用方式下冬夏岩溶作用的影响 刘 文,张 强,贾亚男 (1418)
- 施用纳米碳对烤烟氮素吸收和利用的影响..... 梁太波,尹启生,张艳玲,等 (1429)
- 基于 Voronoi 图的林分空间模型及分布格局研究 刘 帅,吴舒辞,王 红,等 (1436)
- 近自然毛竹林空间结构动态变化..... 仇建习,汤孟平,沈利芬,等 (1444)
- 基于种实性状的无患子天然群体表型多样性研究..... 刁松峰,邵文豪,姜景民,等 (1451)
- 不同林分起源的相容性生物量模型构建..... 符利勇,雷渊才,孙 伟,等 (1461)

种群、群落和生态系统

- 毛竹材用林林下植被群落结构对多花黄精生长的影响..... 樊艳荣,陈双林,杨清平,等 (1471)
- 温度和 CO₂ 浓度升高下转 *Bt* 水稻种植对土壤活性碳氮和线虫群落的短期影响
..... 陈 婧,陈法军,刘满强,等 (1481)
- 中国东北地区近 50 年净生态系统生产力的时空动态 李 洁,张远东,顾峰雪,等 (1490)
- 遥感与 GIS 支持下的盘锦湿地水禽栖息地适宜性评价..... 董张玉,刘殿伟,王宗明,等 (1503)
- 秦岭火地塘林区土壤大孔隙分布特征及对导水性能的影响..... 陆 斌,张胜利,李 侃,等 (1512)
- 磷浓度对铜绿微囊藻、大型溞和金鱼藻三者相互作用的影响..... 马剑敏靳 萍,郭 萌,等 (1520)
- 普生轮藻浸提液对两种淡水藻类的化感抑制作用及其数学模型..... 何宗祥,刘 璐,李 诚,等 (1527)
- 北京永定河-海河干流河岸带植物的区系分析 修 晨,欧阳志云,郑 华 (1535)
- 基于河流生境调查的东河河流生境评价..... 王 强,袁兴中,刘 红,等 (1548)

景观、区域和全球生态

应用 SWAT 模型研究潮河流域土地利用和气候变化对径流的影响 郭军庭,张志强,王盛萍,等 (1559)

长白山不同海拔树木生长对气候变化的响应差异..... 陈 力,尹云鹤,赵东升,等 (1568)

石家庄市空气花粉散布规律及与气候因子的关系..... 李 英,李月丛,吕素青,等 (1575)

不同放牧梯度下呼伦贝尔草甸草原土壤碳氮变化及固碳效应..... 闫瑞瑞,辛晓平,王 旭,等 (1587)

南四湖区农田土壤有机质和微量元素空间分布特征及影响因素..... 武 婕,李玉环,李增兵,等 (1596)

资源与产业生态

跨国土地利用及其生态影响 陆小璇 (1606)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 288 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 30 * 2014-03



封面图说: 图们江河流中段——图们江位于吉林省东南边境,发源于长白山东南部的石乙水,河流的绝大部分是中国与朝鲜的界河,下游很小一段为俄罗斯与朝鲜的界河,并由这里流入日本海,我国珲春距离日本海最近的地方仅有 15km。图们江是我国重要的国际性河流之一,随着我国经济的迅速崛起,图们江地区进入到多国合作联合开发阶段,湿地生态系统处于中度预警状态,并有向重度预警发展的趋势,生态安全面临的威胁越来越严重。对该区域进行湿地生态安全评价与预警研究,可为图们江流域生态环境的可持续发展提供依据。图中河道的远方为朝鲜、河道近方为中国。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@ 163.com

DOI: 10.5846/stxb201306181729

符利勇, 雷渊才, 孙伟, 唐守正, 曾伟生. 不同林分起源的相容性生物量模型构建. 生态学报, 2014, 34(6): 1461-1470.

Fu L Y, Lei Y C, Sun W, Tang S Z, Zeng W S. Development of compatible biomass models for trees from different stand origin. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(6): 1461-1470.

不同林分起源的相容性生物量模型构建

符利勇¹, 雷渊才^{1,*}, 孙 伟², 唐守正¹, 曾伟生³

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2 新疆农业大学计算机与信息工程学院, 乌鲁木齐 830052;

3. 国家林业局调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 目前为止已有不同方法构建生物量相容性模型, 但不同林分起源的生物量相容性模型很少报道。针对此问题, 以 150 株南方马尾松 (*Pinus massoniana*) 地上生物量数据为例, 利用比例平差法和非线性联立方程组法建立不同起源地上生物量以及干材、干皮、树枝和树叶各分项生物量相容的通用性模型。根据分配层次不同, 两种方法又各自考虑总量直接控制和分级联合控制两种方案。从直径、树高、地径、枝下高和冠幅 5 个林分变量中选取不同的变量构建一元、二元和三元生物量模型, 并利用加权最小二乘回归法消除生物量模型中存在的异方差性。结果为: 比例平差法和非线性联立方程组法都能有效保证各分项生物量总和等于总生物量, 模型预测精度满足要求。总体而言, 非线性联立方程组方法比比例平差方法精度高, 同时两种方法中总量直接控制法比分级联合控制法预测效果好; 各分项生物量模型本身作为权函数能有效消除异方差; 各分项对应的三元生物量模型预测精度最高, 其次是二元生物量模型, 最低是一元生物量模型, 但这些差异不是很大。总之, 为权衡考虑模型预测精度和调查成本, 建议把直径和树高作为协变量利用总量直接控制非线性联立方程组法对不同起源生物量建模。

关键词: 非线性联立方程组; 比例平差法; 相容性; 马尾松

Development of compatible biomass models for trees from different stand origin

FU Liyong¹, LEI Yuancai^{1,*}, SUN Wei², TANG Shouzheng¹, ZENG Weisheng³

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

2 Xinjiang Agricultural University, College of Computer and Information Engineering, Urumqi 830052, China

3 Academy of Forest Inventory and Planting, State Forestry Administration, Beijing 100714, China

Abstract: Biomass equations for individual-trees have appeared frequently in the ecological and forestry literature over the last 60 years as biomass estimation is a prerequisite for studies on forest productivity, nutrient cycling and for calculating carbon sequestration, storage and other structural and functional attributes of forest ecosystems. Over the same period of time, the methods of developing biomass equations for total tree and component biomass have evolved from single equation least squares to multivariate adjustment in proportion and simultaneous equations, both linear and nonlinear. The single equation approach relates total tree biomass and its components such as stem, wood, bark, branches, and foliage to predictor variables such as diameter at breast height, height and sometime also crown width using log transformed data through least squares regression. The equation for each component is estimated separately without taking into account (1) the inherent correlation among the biomass components measured on the same sample trees and (2) the logical constraint between the sum of predicted biomass for tree components and the prediction for the total tree. As a result, biomass equations developed through this approach fall short of statistical efficiency in parameter estimation and lack compatibility among the component equations (Parresol 1999). The lack of compatibility means inconsistency in logic in the sense that the predicted values from summing the biomass equations of tree components do not equal to the predicted value from the

基金项目: 国家 863 重点项目 (2012AA12A306) 和国家自然科学基金项目 (31170588, 31300534)

收稿日期: 2013-06-18; **修订日期:** 2013-10-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yclei@caf.ac.cn

equation for the total tree biomass. Development of compatible individual-tree biomass models were well reported in the literature, while how to construct these biomass models for trees from different stand origin has not been investigated so far. In this paper, generalized models on total above-ground biomass and its four components (stem wood, stem bark, branch, and foliage) for trees from different stand origin were established using the methods of adjustment in proportion and nonlinear simultaneous equations. Totally 150 Masson pine (*Pinus massoniana*) trees were sampled for biomass investigation in southern China. For the two approaches mentioned above, i.e. adjustment in proportion and nonlinear simultaneous equations, controlling jointly from level to level by ratio functions and controlling directly under total biomass by proportion functions were employed. Covariate variables of one-, two- and three-variable biomass models were obtained from five stand variable candidates of diameter at breast height, tree total height, diameter at ground level, height to crown base and crown width. Weighted least square regression was used to remove the heteroscedasticity of biomass models. The results showed that both methods of adjustment in proportion and nonlinear simultaneous equations could efficiently ensure that the total biomass is equal to the summary of its components with high prediction accuracy. However, the prediction accuracy of nonlinear simultaneous equations was generally much higher than that of adjustment in proportion. The approach of controlling directly by proportion functions was slightly better than the one controlling jointly by ratio functions. The function of each component biomass itself as weighted function could remove heteroscedasticity effectively. The biomass models for each component with three variables (diameter at breast height, height and crown width) had the highest prediction accuracy, following by the two variables (diameter at breast height and height), and the single variable (diameter at breast height) model. The discrepancies among the models were very small, however. For balancing the model prediction accuracy and survey cost in constructing biomass model for trees from different stand origin, we suggest adapting the nonlinear simultaneous equations of controlling directly under total biomass with diameter at breast height and height as covariables.

Key Words: nonlinear simultaneous equations; adjustment in proportion; 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生物量的监测和评价。生物量建模就是其中的一项核心内容,国内外关于它的研究非常多^[1-12]。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,但在研究生态系统生产力、能源和营养物质分布时,需把总生物量分解成不同的组成部分^[13],例如把地上生物量分解成树干和树冠,树干进一步分解成干材和干皮,树冠进一步分解成树枝和树叶等。除此之外,在生态系统分析时,要求生产物必须满足分解和集成要相一致(分量加起来等于总量)。因此,构建森林地上各分项生物量相容性模型一直为世界生态学家和林学家所重视。

到目前为止,国内外有一些学者做了研究,骆期邦等^[14]提出线性联立模型和非线性联合估计模型两种方法解决总量和分量之间相容性问题;唐守正等^[8]对 5 种非线性联合估计方案进行了系统对比,

得到以树干生物量作为控制量,采用两级联合估计方法效果最好;Parresol^[1]提出采用非线性似然无关回归方法解决非线性生物量方程的可加性问题;Bi^[3]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。曾伟生和唐守正^[10]利用度量误差模型方法并考虑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。然而,尽管这些学者对生物量相容性模型进行了研究,但在模型构建时都把不同起源的林木生物量放在一起进行研究,得到的是该树种平均生物量模型,实际情况中,在相同直径或树高下,人工林树木的生物量和天然林树木的生物量可能相差较大。为此,本文在唐守正等^[8]、曾伟生和唐守正^[10]的研究基础上,以 150 株马尾松地上

生物量为例,进一步构建不同林分起源的相容性通用生物量模型。

1 材料与方法

1.1 实验数据

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,采集时间为 2009 年 6—9 月,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。其中随机抽取 120 株样本作为建模数据,另外 30 株作为检验数据。建模数据中样本单元数的选取大体上按各省资源多少分配,并兼顾天然和人工起源。其中,天然 62 株,人

工 58 株;样木数按 2、4、6、8、12、16、20、26、32、38 cm 以上共 10 个径阶均匀分配(除 26、32 cm 径阶分别为 14、16 株外,其它径阶均为 15 株),每个径阶的样木数按树高级从低到高也尽量均匀分配,在大尺度范围内具有广泛的代表性。全部样木都实测胸径、地径和冠幅,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、树叶称鲜重,并分别抽取样品带回实验室,在 85 ℃ 恒温下烘干至恒重,根据样品鲜重和干重分别推算出样木各部分干重并汇总得到地上部分干重。建模数据和检验数据统计信息见表 1。数据的具体调查和测定方法见文献符利勇等^[11]。

表 1 建模和检验数据概况

Table 1 Summary statistics for modelling and validation data sets

变量 Variable	建模数据 Modelling data				检验数据 Validation data			
	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD
<i>D</i> /cm	1.60	47.20	16.54	12.21	1.50	40.70	16.68	11.93
<i>H</i> /m	2.00	27.60	12.01	7.28	2.10	24.10	11.76	6.97
<i>CW</i> /m	0.60	12.00	4.51	2.62	0.93	9.85	4.31	2.32
<i>D₀</i> /cm	2.60	52.30	21.07	13.89	2.60	52.90	21.65	13.98
<i>CH</i> /m	0.05	18.70	5.67	4.60	0.30	14.90	5.93	4.91
Stem/kg	0.22	734.12	131.32	183.57	0.24	591.93	128.03	181.58
Wood/kg	0.17	675.01	120.62	170.11	0.18	534.55	116.51	166.87
Bark/kg	0.04	61.89	10.70	14.27	0.05	57.39	11.52	15.30
Crown/kg	0.06	305.02	39.50	57.97	0.14	168.40	34.19	47.42
Branch/kg	0.04	273.45	31.44	48.99	0.06	148.14	27.87	42.22
Leaf/kg	0.02	70.20	8.06	10.97	0.08	20.34	6.32	6.43
AG/kg	0.32	1039.14	170.82	237.14	0.38	731.75	162.23	223.34

D: 胸径; *H*: 树高; *CW*: 冠幅; *D₀*: 地径; *CH*: 枝下高; Stem: 树干; Wood: 干材; Bark: 干皮; Crown: 树冠; Branch: 树枝; Leaf: 树叶; AG: 地上总生物量; *D*: diameter at breast height; *H*: tree height; *CW*: crown width; *D₀*: diameter at ground level; *CH*: height to crown base; Stem: tree stem; Wood: stem wood; Bark: stem bark; Crown: tree crown; Branch: tree branch; Leaf: tree foliage; AG: total above-ground biomass

1.2 基础模型

根据已有经验模型并结合实际调查数据确定各分量(地上总生物量、树干、干材、树皮、树冠、树枝和树叶)基础模型 $f_i(x)$ ($i = 1, \dots, 7$)。按照模型 $f_i(x)$ 中自变量维数分为一元、二元和多元生物量模型。

(1) 一元生物量模型。选用常见 CAR (Constant Allometric Ratio) 形式^[15] $f_i(x) = \alpha x^b$ 构建各分项的一元生物量模型。候选自变量分别为: 胸径 (*D*)、地径 (*D₀*)、树高 (*H*)、冠幅 (*CW*) 和枝下高 (*CH*)。

(2) 二元生物量模型。从林分变量 *D*、*D₀*、*H*、*CW* 和 *CH* 共 10 种两两组合中选出 2 个自变量,按照 CAR 函数形式 $f_i(x) = \alpha x_1^b x_2^c$ 最终确定各分项的二元生物量模型。

(3) 多元生物量模型。从林分变量 *D*、*D₀*、*H*、*CW* 和 *CH* 共 10 种不同组合中选出 3 个自变量,按照 CAR 函数形式 $f_i(x) = \alpha x_1^b x_2^c x_3^d$ 最终确定各分项的三元生物量模型。

利用平均残差 ($\bar{e}$)、残差方差 (σ^2)、均方误差 (δ) 和决定系数 (R^2) 4 个指标确定一元、二元和多元基础模型的自变量。平均残差 ($\bar{e}$)、残差方差 (σ^2) 和均方误差 (δ) 的计算见公式(1) — (3)。为区别林分起源(人工林和天然林),模型中将增加一个哑变量 *S*, 即 *S* = 0 为人工林,反之 *S* = 1 为天然林。本文将考虑 *S* 对模型中每个参数的影响,各分量考虑林分起源的基础模型用 $f_i(x, S)$ 表示。

$$\bar{e} = \sum (y_i - \hat{y}_i) / N \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / (N - 1) \quad (2)$$

$$\delta = \sqrt{\bar{e}^2 + \sigma^2} \quad (3)$$

式中, y_i 和 $\hat{y}_i$ 分别为真实值和预测值, N 为总观测数。

1.3 比例平差法

1.3.1 总量直接控制比例平差法

设 W_1 — W_7 分别表示地上总生物量以及树干、干材、树皮、树冠、树枝和树叶各分项生物量。由总量直接平差分配给干材、树皮、枝和叶, 从而保证各分量之和等于总量。具体计算公式如下:

$$W_3 = \frac{f_3(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} W_1 + \varepsilon_3 \quad (4)$$

$$W_4 = \frac{f_4(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} W_1 + \varepsilon_4 \quad (5)$$

$$W_6 = \frac{f_6(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} W_1 + \varepsilon_6 \quad (6)$$

$$W_7 = \frac{f_7(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} W_1 + \varepsilon_7 \quad (7)$$

$$W_1 = f_1(x, S) + \varepsilon_1 \quad (8)$$

式中, ε_1 、 ε_3 、 ε_4 、 ε_6 和 ε_7 为误差项。

1.3.2 分级联合控制比例平差法

分级联合控制比例平差法, 即首先把地上总生物量分配给树干和树冠, 然后再把树干生物量分配给干材和干皮, 树冠生物量分配给树枝和树叶。该方法不但实现了干材、干皮、树枝和树叶之和等于总量, 而且还实现了树干和树冠之和等于总量^[8]。

$$W_3 = \frac{f_3(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S)} \frac{f_2(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} W_1 + \varepsilon_3 \quad (9)$$

$$W_4 = \frac{f_4(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S)} \frac{f_2(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} W_1 + \varepsilon_4 \quad (10)$$

$$W_6 = \frac{f_6(x, S)}{f_6(x, S) + f_7(x, S)} \frac{f_5(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} W_1 + \varepsilon_6 \quad (11)$$

$$W_7 = \frac{f_7(x, S)}{f_6(x, S) + f_7(x, S)} \frac{f_5(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} W_1 + \varepsilon_7 \quad (12)$$

$$W_1 = f_1(x, S) + \varepsilon_1 \quad (13)$$

1.4 非线性联立方程组

度量误差模型是近代统计分析方法之一, 它研究当模型中的变量带有度量误差时的参数估计等问题, 广义多元非线性度量误差模型一般表达式如下^[16,17]:

$$\begin{cases} f(y_i, x_i, c) = 0, i = 1, \dots, n \\ Y_i = y_i + e_i \\ E(e_i) = 0, \text{Var}(e_i) = \Sigma \end{cases} \quad (14)$$

式中, $f = (f_1, f_2, \dots, f_m)^T$ 为 m 维已知向量函数值; Y_i 是真实值 y_i 的 $1 \times p$ 维观测向量, e_i 是其观测误差; x_i 是没有误差的 $1 \times q$ 维观测向量; Σ 是已知或未知的 $p \times p$ 维正定矩阵, 通常取 $\Sigma = \sigma^2 \psi$ (ψ 为 $p \times p$ 维误差结构矩阵); c 是 $k \times 1$ 维参数向量; 一般满足 $p \geq m$; 当 f 是 (y_i, x_i) 和 c 的双线性函数时, 就是线性度量误差模型, 否则称为非线性度量误差模型。特别是 $p = m$ 时, 模型 (14) 为非线性度量误差变量联立方程组。本研究是假定模型中所有自变量 (林分变量) 不含度量误差, 即利用非线性联立方程组构建各分项生物量方程系统。非线性联立方程组的详细介绍见文献^[17]。

比例平差法是直接利用各分项独立回归模型, 而没有考虑分项间相容性问题, 因此当考虑相容后, 参数可能不再是最优估计。为此, 本研究选用非线性联立方程组构建相容性生物量模型。同样, 考虑总量直接控制和分量联合控制两种情形。

1.4.1 总量直接控制联立方程组法

与总量直接控制比例平差法相类似, 由模型 (14) 得到总量直接控制联立方程组模型形式如下:

$$\begin{cases} W_3 = \frac{f_3(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_3 \\ W_4 = \frac{f_4(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_4 \\ W_6 = \frac{f_6(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_6 \\ W_7 = \frac{f_7(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S) + f_6(x, S) + f_7(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_7 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\hat{W}_1$ 为地上总生物量估计值, 由传统独立回归模型计算得到。

1.4.2 分级联合控制联立方程组法

同样, 与分级联合控制比例平差法相类似, 由模型(14)得到分级联合控制联立方程组模型形式如下:

$$\begin{cases} W_3 = \frac{f_3(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S)} \frac{f_2(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_3 \\ W_4 = \frac{f_4(x, S)}{f_3(x, S) + f_4(x, S)} \frac{f_2(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_4 \\ W_6 = \frac{f_6(x, S)}{f_6(x, S) + f_7(x, S)} \frac{f_5(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_6 \\ W_7 = \frac{f_7(x, S)}{f_6(x, S) + f_7(x, S)} \frac{f_5(x, S)}{f_2(x, S) + f_5(x, S)} \hat{W}_1 + \varepsilon_7 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $\hat{W}_1$ 为地上总生物量估计值, 由传统的独立回归模型计算得到。

1.5 异方差

生物量数据普遍存在异方差性, 为消除异方差, 常用方法有对数回归法和加权回归法^[8, 10]。本文采用加权最小二乘法求解, 权函数[模型(17)]是通过各分项独立拟合方程的方差所确定, 选用常见的指

数函数、对数函数、幂函数、Logistic 函数以及原基础模型本身为候选模型形式, 利用评价指标 AIC (Akaike information criterion) 确定最终权函数。

$$\varphi_i = 1/g(x)^2 \quad (17)$$

1.6 模型评价

首先通过建模数据利用常用的模型评价指标平均残差($\bar{e}$)、残差方差(σ^2)、均方误差(δ)和决定系数(R^2)选出一元、二元和三元最优相容性生物量模型。再利用检验数据并结合指标 $\bar{e}$ 、 σ^2 、 δ 对各自的一元、二元和多元最优模型进行比较和评价, 最终确定一种考虑不同林分起源的相容性生物量模型。本研究所有计算是在 ForStat2.2 版本上实现。具体计算方法和步骤见文献^[17]。

2 结果与分析

2.1 基础模型

通过逐步筛选方法最终确定一元、二元和三元各分项生物量模型中自变量分别为 D 、 D 和 H 、 D 、 H 和 CW 。各分项一元生物量模型、二元生物量模型和多元生物量模型分别见模型(18)—模型(20)。各分项一元生物量模型、二元生物量模型和多元生物量模型的加权函数见表 2。

表 2 各分项一元、二元和三元生物量模型的权函数

Table 2 Weighted functions for each biomass model with one, two or three predictor variables

分项 Components	一元权函数 Weighted function with one variable	二元权函数 Weighted function with one variables	三元权函数 Weighted function with three variables
地上总生物量 AG	$g(D) = D^{2.27}$	$g(D, H) = D^{2.67} H^{-0.82}$	$g(D, H, CW) = D^{3.13} H^{-1.15} CW^{0.38}$
树干 Stem	$g(D) = D^{1.83}$	$g(D, H) = D^{2.09} H^{0.10}$	$g(D, H, CW) = D^{2.07} H^{-0.12} CW^{0.41}$
干材 Wood	$g(D) = D^{1.78}$	$g(D, H) = D^{2.0} H^{0.06}$	$g(D, H, CW) = D^{1.84} H^{0.23} CW^{0.40}$
干皮 Bark	$g(D) = D^{1.73}$	$g(D, H) = D^{1.70} H^{0.05}$	$g(D, H, CW) = D^{2.14} H^{-0.02} CW^{-0.49}$
树冠 Crown	$g(D) = D^{1.60}$	$g(D, H) = D^{2.79} H^{-1.58}$	$g(D, H, CW) = D^{2.19} H^{-1.36} CW^{0.85}$
树枝 Branch	$g(D) = D^{1.75}$	$g(D, H) = D^{2.7} H^{-1.30}$	$g(D, H, CW) = D^{2.06} H^{-1.39} CW^{1.38}$
树叶 Leaf	$g(D) = D^{1.55}$	$g(D, H) = D^{1.28} H^{0.18}$	$g(D, H, CW) = D^{1.35} H^{0.51} CW^{0.61}$

$$W_{ij} = f_i(D_j, S_j) = (a_i + c_i S_j) D_j^{(b_i + d_i S_j)} + \varepsilon_{ij} \quad (18)$$

$$W_{ij} = f_i(D_j, H_j, S_j) = (a_i + c_i S_j) D_j^{(b_i + d_i S_j)} H_j^{(e_i + f_i S_j)} + \varepsilon_{ij} \quad (19)$$

$$W_{ij} = f_i(D_j, H_j, CW_j, S_j) = (a_i + e_i S_j) D_j^{(b_i + d_i S_j)} H_j^{(c_i + g_i S_j)} CW_j^{(d_i + h_i S_j)} + \varepsilon_{ij} \quad (20)$$

式中, $i = 1, \dots, 7$ 分别代表地上总生物量, 树干、干材、干皮、树冠、树枝和树叶生物量; $j = 1, \dots, N$,

$a_i - h_i$ 为第 i 分项所对应的参数; D_j, H_j, CW_j, S_j 分别为第 j 株样木胸高直径、树高、冠幅和林分起源类型。

2.2 模型选择

各分项比例平差法(总量直接控制和分级联合控制)和联立方程组法(总量直接控制和分级联合控制联)对应的评价指标分别见表 3 和表 4。从表 3 中看出, 在两种不同比例平差法中, 都满足地上总生物

量的估计效果最好,其次是树干,效果最差的是树叶生物量;各分项的一元模型拟合效果总体上比二元模型要低,三元模型中部分分项,例如地上总生物量、树干和干材的拟合效果比二元模型要高,但剩余分量拟合效果比二元和一元模型差很多,说明比例平差法在本实例中非常不稳定。表 3 中还能得出对各分项生物量,两种不同控制方法拟合效果较为接近,总体上,总量直接控制法比分级联合控制法稍好(例如在二元模型中,对于树枝和树叶,总量控制法对应的平均残差分别为 $\bar{e} = 0.2480$ 和 $\bar{e} = -0.2128$,分级控制法对应的平均残差分别为 $\bar{e} = 18.6285$ 和 $\bar{e} = -18.4871$)。因此,选用总量直接控制中的二元模型计算不同起源马尾松生物量,模型表达式如下:

$$\text{干材 } W_{3j} = \frac{(a_3 + c_3 S_j) D_j^{(b_3+d_3 S_j)} H_j^{(e_3+f_3 S_j)}}{W_0} \hat{W}_{1j} + \varepsilon_{3j} \quad (21)$$

$$\text{干皮 } W_{4j} = \frac{(a_4 + c_4 S_j) D_j^{(b_4+d_4 S_j)} H_j^{(e_4+f_4 S_j)}}{W_0} \hat{W}_{1j} + \varepsilon_{4j} \quad (22)$$

$$\text{树枝 } W_{6j} = \frac{(a_6 + c_6 S_j) D_j^{(b_6+d_6 S_j)} H_j^{(e_6+f_6 S_j)}}{W_0} \hat{W}_{1j} + \varepsilon_{6j} \quad (23)$$

$$\text{树叶 } W_{7j} = \frac{(a_7 + c_7 S_j) D_j^{(b_7+d_7 S_j)} H_j^{(e_7+f_7 S_j)}}{W_0} \hat{W}_{1j} + \varepsilon_{7j} \quad (24)$$

式中, $\hat{W}_{1j}$ 为第 j 株样木地上总生物量估计值,由下列公式计算得到

$$\hat{W}_{1j} = f_1(D_j, H_j, S_j) = (a_1 + c_1 S_j) D_j^{(b_1+d_1 S_j)} H_j^{(e_1+f_1 S_j)} + \varepsilon_{1j} \quad (25)$$

W_0 为各分项总和,计算公式为:

$$W_0 = (a_3 + c_3 S_j) D_j^{(b_3+d_3 S_j)} H_j^{(e_3+f_3 S_j)} + (a_4 + c_4 S_j) D_j^{(b_4+d_4 S_j)} H_j^{(e_4+f_4 S_j)} + (a_6 + c_6 S_j) D_j^{(b_6+d_6 S_j)} H_j^{(e_6+f_6 S_j)} + (a_7 + c_7 S_j) D_j^{(b_7+d_7 S_j)} H_j^{(e_7+f_7 S_j)} \quad (26)$$

从表 4 中看出,与比例平差法相似,各分项都满足地上总生物量估计效果最好,其次是树干,效果最差的是树叶生物量;各分项的一元模型拟合效果都比二元模型要低,三元模型中部分分项,例如地上总生物量、树干、干材和干皮生物量拟合效果比二元模型要高,但树冠和树叶生物量比二元模型要低。与

比例平差法相比,非线性联立方程组法中一元、二元和三元模型中各分量的预测效果更为稳定,尤其是三元模型中树枝和树叶生物量(在非线性联立方程组中,以总量直接控制为例,树枝和树叶的 R^2 分别为 $R^2 = 0.8984$ 和 $R^2 = 0.5796$,在比例平差法中,树枝和树叶的 R^2 分别为 $R^2 = 0.3357$ 和 $R^2 = 0.5298$)。与比例平差法相似,总量直接控制法比分级联合控制法预测效果稍好,因此本文也选用总量直接控制中的二元模型来计算不同起源马尾松生物量,模型表达式如下:

$$\begin{cases} \text{干材 } W_{3j} = \frac{(a_3 + c_3 S_j) D_j^{(b_3+d_3 S_j)} H_j^{(e_3+f_3 S_j)}}{W_0} \hat{W}_1 + \varepsilon_{3j} \\ \text{干皮 } W_{4j} = \frac{(a_4 + c_4 S_j) D_j^{(b_4+d_4 S_j)} H_j^{(e_4+f_4 S_j)}}{W_0} \hat{W}_1 + \varepsilon_{4j} \\ \text{树枝 } W_{6j} = \frac{(a_6 + c_6 S_j) D_j^{(b_6+d_6 S_j)} H_j^{(e_6+f_6 S_j)}}{W_0} \hat{W}_1 + \varepsilon_{6j} \\ \text{树叶 } W_{7j} = \frac{(a_7 + c_7 S_j) D_j^{(b_7+d_7 S_j)} H_j^{(e_7+f_7 S_j)}}{W_0} \hat{W}_1 + \varepsilon_{7j} \end{cases} \quad (27)$$

式中, $\hat{W}_1$ 和 W_0 分别由公式 (25) 和公式 (26) 计算得到。

总量直接控制比例平差法中的二元模型[模型 (21)—模型 (24)] 和 nonlinear 联立方程组法中的二元模型[模型 (27)] 参数估计结果见表 5。从表 5 中参数估计值可得出无论是天然林还是人工林各分项的生物量与树高和直径成正相关,相比于树高,各分项生物量与胸径的正相关更强。除此之外,表 5 中两种不同方法对应的参数 c_i 、 d_i 和 f_i ($\alpha = 0.05$) 显著不等于零进一步说明不同起源(人工林和天然林)马尾松生物量之间差异较大。以模型 (27) 为例,对于干材,3 个参数取值分别为 $c_3 = 1.1155$ 、 $d_3 = 1.5501$ 和 $f_3 = 0.1760$ 。

2.3 模型预测和评价

利用总量直接控制比例平差法模型系统[模型 (21)—模型 (24)] 和 nonlinear 联立方程组法[模型 (27)] 对建模数据进行预测,得到模型评价指标见表 6。从表 6 中可知,两种方法预测精度都较高,总体而言,非线性联立方程组二元模型对应的评价指标,除干材和树枝对应的平均残差($\bar{e}$)外,其它各分项对应的指标都比总量直接控制比例平差法要好。对于地上总生物量以及树冠、树枝和树叶生物量,两种

表 3 比例平差法拟合效果指标列表
Table 3 Fitting indexes for adjustment in proportion

方法 Method	一元比例平差法 Adjustment in proportion with one variable				二元比例平差法 Adjustment in proportion with two variables				三元比例平差法 Adjustment in proportion with three variables			
	平均 残差 $\bar{e}$	残差 方差 δ^2	均方误差 MSE	决定 系数 R^2	$\bar{e}$	δ^2	MSE	R^2	$\bar{e}$	δ^2	MSE	R^2
总量直接控制 Controlling directly												
地上总生物量 AG	4.3651	2585.7030	51.0606	0.9550	0.9334	2034.260	45.1124	0.9640	1.2980	1914.803	43.7777	0.9661
树干 Stem	3.5322	2027.0840	45.1615	0.9401	0.8319	1494.4370	38.6669	0.9557	-28.0239	3028.4240	61.7557	0.9572
干材 Wood	3.1985	1922.7860	43.9661	0.9337	0.7133	1446.3860	38.0381	0.95	-25.5268	2689.6320	57.8035	0.9541
干皮 Bark	0.3337	15.3073	3.9267	0.9294	0.1186	13.9857	3.7416	0.9338	-2.4971	24.5779	5.5510	0.9232
树冠 Crown	1.1029	463.2812	21.5522	0.8670	0.1015	351.8912	18.7590	0.8963	29.3219	2300.3470	56.2150	0.7013
树枝 Branch	1.0691	314.8893	17.7773	0.8763	0.1505	246.7312	15.7084	0.8990	30.6755	2339.7750	57.2779	0.3357
树叶 Leaf	0.0338	49.1977	7.0142	0.5913	-0.0490	41.9812	6.4795	0.6513	-1.3535	69.5121	8.4465	0.5298
分级联合控制 Controlling jointly												
地上总生物量 AG	4.6351	2585.7030	51.0606	0.9550	0.9334	2034.26	45.1124	0.9640	1.2980	1914.8030	43.7777	0.9661
树干 Stem	3.3961	2041.448	45.3098	0.9396	0.9656	1517.1050	38.9620	0.9550	-35.7776	4043.34	72.9615	0.9520
干材 Wood	3.0690	1937.8610	44.1280	0.9331	0.8363	1468.7150	38.3329	0.9493	-32.5541	3553.553	67.9214	0.9489
干皮 Bark	0.3271	15.1536	3.9065	0.9296	0.1293	13.8758	3.7273	0.9345	-3.2235	30.8523	6.4221	0.9185
树冠 Crown	1.2390	473.8651	21.8037	0.8658	-0.0322	350.5244	18.7223	0.8964	37.0756	3157.6630	67.3221	0.5174
树枝 Branch	1.1959	324.6311	18.0572	0.8747	0.0220	247.2609	15.7246	0.8983	31.2552	2391.82	58.0406	0.0987
树叶 Leaf	0.0431	49.0659	7.0048	0.5925	-0.0542	41.5388	6.4453	0.6550	5.8204	95.0901	11.3564	0.3678

表 4 非线性联立方程组拟合效果指标列表
Table 4 Fitting indexes for nonlinear simultaneous equations

方法 Method	一元比例平差法 Adjustment in proportion with one variable					二元比例平差法 Adjustment in proportion with two variables					三元比例平差法 Adjustment in proportion with three variables				
	平均 残差 $\bar{e}$	方差 δ^2	均方误差 MSE	决定 系数 R^2		$\bar{e}$	δ^2	MSE	R^2		$\bar{e}$	δ^2	MSE	R^2	
总量直接控制 Controlling directly															
地上总生物量 AG	4.6351	2585.703	51.0606	0.9550		0.9334	2034.26	45.1124	0.9640		1.2980	1914.803	43.7777	0.9661	
树干 Stem	10.2322	2192.699	47.9312	0.9400		0.8981	1497.7110	38.7107	0.9556		2.3633	1180.720	34.4428	0.9655	
干材 Wood	11.4429	2128.2230	47.5307	0.9335		0.6451	1448.3790	38.0631	0.9500		2.2063	1117.0820	33.4955	0.9619	
干皮 Bark	-1.2107	15.3231	4.0974	0.9318		0.2531	14.1892	3.7754	0.9336		0.1569	13.8007	3.7182	0.9343	
树冠 Crown	-5.5971	456.8872	22.0956	0.8738		0.0352	348.795	18.6761	0.8970		-1.0652	383.3993	19.6095	0.8867	
树枝 Branch	-4.3702	296.3696	17.7614	0.8827		0.2480	247.1387	15.7226	0.8990		-1.0807	244.1839	15.6637	0.8984	
树叶 Leaf	-1.2269	51.5405	7.2832	0.5973		-0.2128	41.2412	6.4255	0.6581		0.0155	52.0544	7.2149	0.5796	
分级联合控制 Controlling jointly															
地上总生物量 AG	4.6351	2585.7030	51.0606	0.9550		0.9334	2034.260	45.1124	0.9640		1.2980	1914.803	43.7777	0.9661	
树干 Stem	10.1987	2193.3540	47.9309	0.9396		0.7919	1506.1	38.8166	0.9553		2.3033	1170.590	34.2913	0.9656	
干材 Wood	11.4211	2128.5210	47.5285	0.9330		0.5548	1457.4130	38.1801	0.9497		2.1596	1107.144	33.3438	0.9620	
干皮 Bark	-1.2224	15.4591	4.1175	0.9321		0.2371	13.9384	3.7409	0.9342		0.1437	13.6612	3.6989	0.9343	
树冠 Crown	-5.5636	454.6091	22.0355	0.8728		0.1415	360.2121	18.9798	0.8945		-1.0053	412.0564	20.3241	0.8776	
树枝 Branch	-4.3312	296.6494	17.7598	0.8813		18.6285	1046.0520	37.3239	0.8717		-1.1345	269.6372	16.4598	0.8877	
树叶 Leaf	-1.2324	51.0488	7.2504	0.5984		-18.4871	690.1017	32.1228	0.6275		0.1293	51.8457	7.2016	0.5748	

表 5 总量直接控制比例平差法和非线性联立方程组法参数估计值

Table 5 Parameters estimates for both approaches of adjustment in proportion and nonlinear simultaneous equations with controlling directly under total biomass

参数 Parameters	比例平差法 Adjustment in proportion					非线性联立方程组 Nonlinear simultaneous equations				
	地上总 生物量 AG	干材 Wood	干皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf	地上总 生物量 AG	干材 Wood	干皮 Bark	树枝 Branch	树叶 Leaf
<i>a</i>	0.0670	0.0172	0.0150	0.0311	0.0729	0.0670	0.5221	0.3924	0.8627	1.7864
<i>b</i>	2.0831	1.8043	1.7618	3.1957	2.6047	2.0831	0.4104	0.3730	1.8084	1.4083
<i>c</i>	0.0022	0.0079	0.0017	-0.0219	0.0026	0.0022	1.1155	0.6230	-0.2574	1.6615
<i>d</i>	-0.0259	0.1449	0.0786	-0.7531	-0.7263	-0.0259	1.5501	1.4514	0.6393	0.3593
<i>e</i>	0.5092	1.1649	0.4160	-1.0933	-1.1394	0.5092	2.3497	1.6348	0.1096	-0.0940
<i>f</i>	0.0330	-0.2768	-0.0651	1.3150	0.7954	0.0330	0.1760	0.4076	1.7554	1.6610

表 6 总量直接控制比例平差法和非线性联立方程组法评价指标列表

Table 6 Evaluation indexes for both approaches of adjustment in proportion and nonlinear simultaneous equations with controlling directly under total biomass

分项 Component	比例平差法 Adjustment in proportion			联立方程组法 Nonlinear simultaneous equations		
	$\bar{e}$	δ^2	MSE	$\bar{e}$	δ^2	MSE
地上总生物量 AG	-2.9703	1145.7022	33.9783	-2.9703	1145.7022	33.9783
树干 Stem	2.6184	1005.5090	31.8177	2.5073	998.2318	31.6941
干材 Wood	1.3817	1018.7830	31.9483	1.4017	1011.4313	31.8339
干皮 Bark	1.2367	22.1305	4.8642	1.1056	20.5120	4.6620
树冠 Crown	-5.5888	457.6495	22.1107	-5.4777	447.8716	21.8604
树枝 Branch	-3.3941	341.6549	18.7929	-3.4911	342.5206	18.8337
树叶 Leaf	-2.1947	34.2657	6.2516	-1.9865	29.7365	5.8037

方法都高估于真实值,而对于树干、干材和干皮都低估于真实值。在实际应用中,建议使用非线性联立方程组法构建相容性生物量模型,基于预测效果和调查成本权衡考虑,二元模型,即考虑树高和胸径对生物量的影响效率最好。

3 结论与讨论

本文以 150 株南方马尾松地上生物量数据为例,利用比例平差法和非线性联立方程组法构建不同起源地上生物量与一级分类的树干和树冠以及二级分类的干材、干皮、树枝和树叶的相容性方程系统。根据分配层次不同,可把比例平差法分为总量直接控制比例平差法和分级联合控制比例平差法,非线性联立方程组法分为总量直接控制比例联立方程组法和分级联合控制联立方程组法^[8]。本研究对这 4 种方法进行了详细的比较与分析,得知这 4 种方法都能有效保证各分项生物量总和等于总生物量,拟合效果都比较接近,总体而言,联立方程组法

比比例平差法更稳定。

为更加准确地分析林分因子(胸径、地径、树高、枝下高以及冠幅)对生物量的影响,本文采用变量逐步筛选法确定一元、二元和三元模型中协变量,结果为胸径对各分项生物量的影响最大、其次是树高和冠幅。通过对一元、二元和三元模型预测效果进行比较,各分项对应的三元模型预测精度最高、其次是二元,最低是一元,但这些差异不是很大。总体而言,本文所选用的各种方法预测精度都相对较高,这与曾伟生^[10]利用度量误差模型方法建立马尾松相容性立木生物量模型中结论一致。实际应用时,为权衡考虑模型预测精度和调查成本,由于冠幅调查成本最高,同时对模型精度的提高贡献不是明显(见表 3 和表 4),因此建议使用直径和树高对不同起源生物量建模。

比例平差法是解决生物量形容性问题的最简单并且最直接的办法。所谓相容性就是指生物量中各分项(干材、干皮、树枝和树叶)之和等于地上总生物

量,本质上就是满足各分项占总量的比例之和等于1,比例平差法就是基于该原则提出。在实际应用时,比例平差法涉及的各分项独立模型是通过传统的最小二乘回归求得参数计算各分项生物量。显然,各分项独立模型是在不考虑相容性的情况下给出参数的最优估计,因此在考虑相容性后可能就不再是最优估计了^[8]。而本文提出的非线性联立方程组是将各分量进行联合建模,联立求解,既保证了各分项生物量之间的相容性,又能得到更优化的参数估计。这些结论通过本文实例分析结果(表3,表4和表6)得到进一步验证。

本文主要针对不同起源(天然林和人工林)的马尾松来构建生物量相容性模型,为构建一个通用性的生物量相容性模型,把不同起源作为了一个哑变量,考虑它对各分项生物模型中参数的影响。通过实例计算结果可知这种构建哑变量方法能有效解决不同起源的生物量相容性通用模型,以模型(27)为例,通过参数 c 、 d 和 f 的大小可以反映人工林和天然林之间差异的大小,而参数 a 、 b 和 e 相当于固定效应,即不管是天然林和人工林它们取值不变。因此在实际应用中,只需要这几个参数大小就能有效对不同起源的马尾松生物量预估。除利用哑变量方法能有效解决模型通用性问题外,近代统计学模型中的非线性混合效应模型也能有效求解此类问题,基于目前还没有相应的算法和程序求解非线性混合效应模型联立方程组,因此无法保证生物量相容性问题。所以,到目前为止,通过构造哑变量方法能有效解决考虑不同起源生物量相容性模型的通用性问题。

References:

- [1] Parresol B R. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, 31(5): 865-878.
- [2] Zhang Y J, Borders B E. Using a system mixed-effects modeling method to estimate tree compartment biomass for intensively managed loblolly pines-an allometric approach. *Forest Ecology and Management*, 2004, 194(1/3): 145-157.
- [3] Bi H, Turner J, Lambert M J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees*, 2004, 18(4): 467-479.
- [4] Fehrmann L, Lehtonen A, Kleinn C, Tomppo R. Comparison of linear and mixed-effect regression models and a k -nearest neighbour approach for estimation of single-tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(1): 1-9.
- [5] Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales-a case study for Masson Pine (*Pinus massoniana*) in southern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 2011, 41(7): 1547-1554.
- [6] Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z, Sharma R P, Li H K. Using linear mixed model and dummy variable model approaches to construct compatible single-tree biomass equations at different scales — a case study for masson pine in Southern China. *Journal of Forest Science*, 2012, 58(3): 101-115.
- [7] Zeng W S, Tang S Z. Modeling compatible single-tree biomass equations of Masson Pine (*Pinus massoniana*) in Southern China. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, 23(4): 593-598.
- [8] Tang S Z, Zhang H R, Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(S1): 19-27.
- [9] Zeng W S, Tang S Z. Using mixed-effects modeling method to establish compatible national and regional single-tree biomass equations. *Central South Forest Inventory and Planning*, 2010, 29(4): 1-6.
- [10] Zeng W S, Tang S Z. Using measurement error modeling method to establish compatible single-tree biomass equations system. *Forest Research*, 2010, 23(6): 797-803.
- [11] Fu L Y, Zeng W S, Tang S Z. Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5797-5808.
- [12] Li H K, Ning J K. Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 740-757.
- [13] Waring R H, Running S W. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. 2nd ed. San Diego, Calif: Academic Press, 1998.
- [14] Luo Q B, Zeng W S, Huo D B, Bao T H, Lin W D. Establishment and application of compatible tree above ground biomass models. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(3): 271-277.
- [15] Kittredge J. Estimation of the amount of foliage of trees and stands. *Journal of Forestry*, 1944, 42(12): 905-912.
- [16] Tang S Z, Li Y. An algorithm for estimating multivariate non-linear error-in-measure models. *Journal of Biomathematics*, 1996, 11(1): 23-27.
- [17] Tang S Z, Li Y. *Statistical Foundation for Biomathematical Models*. Beijing: Science Press, 2002.

参考文献:

- [8] 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. *林业科学*, 2000, 36(S1): 19-27.
- [9] 曾伟生, 唐守正. 利用混合模型方法建立全国和区域相容性立木生物量方程. *中南林业调查规划*, 2010, 29(4): 1-6.
- [10] 曾伟生, 唐守正. 利用度量误差模型方法建立相容性立木生物量方程系统. *林业科学研究*. 2010, 23(6): 797-803.
- [11] 符利勇, 曾伟生, 唐守正. 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响. *生态学报*, 2011, 31(19): 5797-5808.
- [12] 李海奎, 宁金魁. 基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型. *生态学报*, 2012, 32(3): 740-757.
- [14] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 包拓华, 林文端. 立木地上部分生物量模型的建立及其应用研究. *自然资源学报*, 1999, 14(3): 271-277.
- [16] 唐守正, 李勇. 一种多元非线性度量误差模型的参数估计及算法. *生物数学学报*, 1996, 11(1): 23-27.
- [17] 唐守正, 李勇. *生物数学模型的统计学基础*. 北京: 科学出版社, 2002.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.34, No.6 Mar., 2014 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Impacts of global warming on litter decomposition SONG Piao, ZHANG Naili, MA Keping, et al (1327)
- From system to landscape: the other orientation of regional material flow analysis ZHANG Xiaogang, ZENG Hui (1340)
- A multi-dimensional approach for wetland ecosystem service valuation SONG Yuqin, ZHANG Xiaolei (1352)
- Molecular mechanisms of the insect juvenile hormone JIN Minna, LIN Xinda (1361)
- Microbial deterioration in ancient cave and wall paintings LI Qiang, GE Qinya, PAN Xiaoxuan, et al (1371)
- Study on ecological safety evaluation and warning of wetlands in Tumen River watershed based on 3S technology
..... ZHU Weihong, MIAO Chengyu, ZHENG Xiaojun, et al (1379)
- A review of transboundary protected areas network establishment WANG Wei, TIAN Yu, CHANG Ming, et al (1391)

Autecology & Fundamentals

- Water consumption characteristics and water use efficiency of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis* and bamboo-willow
seedlings QIU Quan, PAN Xin, LI Jiyue, et al (1401)
- Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*
..... CHU Yanmei, YANG Jian, LI Jingji, et al (1411)
- The influence of meteorological factors and soil physicochemical properties on karst processes in six land-use patterns in summer
and winter in a typical karst valley LIU Wen, ZHANG Qiang, JIA Yanan (1418)
- Effects of nanocarbon application on nitrogen absorption and utilization of flue-cured tobacco
..... LIANG Taibo, YIN Qisheng, ZHANG Yanling, et al (1429)
- The stand spatial model and pattern based on voronoi diagram LIU Shuai, WU Shuci, WANG Hong, et al (1436)
- Dynamic analysis of spatial structure in a close-to-nature *Phyllostachys edulis* stands
..... QIU Jianxi, TANG Mengping, SHEN Lifen, et al (1444)
- Phenotypic diversity in natural populations of *Sapindus mukorossi* based on fruit and seed traits
..... DIAO Songfeng, SHAO Wenhao, JIANG Jingmin, et al (1451)
- Development of compatible biomass models for trees from different stand origin ... FU Liyong, LEI Yuancai, SUN Wei, et al (1461)

Population, Community and Ecosystem

- The impact of understory vegetation structure on growth of *Polygonatum cyrtoneura* in extensively managed *Phyllostachys edulis*
plantation FAN Yanrong, CHEN Shuanglin, YANG Qingping, et al (1471)
- Short-term effects of CO₂ concentration elevation, warming and transgenic *Bt* rice cropping on soil labile organic carbon and
nitrogen, and nematode communities CHEN Jing, CHEN Fajun, LIU Manqiang, et al (1481)
- Temporospatial variations in net ecosystem productivity in Northeast China since 1961
..... LI Jie, ZHANG Yuandong, GU Fengxue, et al (1490)
- Assessment of the habitat suitability for waterfowls in the Panjin, Liaoning with GIS and remote sensing
..... DONG Zhangyu, LIU Dianwei, WANG Zongming, et al (1503)
- Distribution of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Huoditang forest region of the
Qinling Mountains LU Bin, ZHANG Shengli, LI Kan, et al (1512)

- Influences of phosphorus concentration on interactions among *Microcystis aeruginosa*, *Daphnia magna* and *Ceratophyllum demersum* ...
 MA Jianmin, JIN Ping, GUO Meng, et al (1520)
- Allelopathic inhibition and mathematical models of *Chara vulgaris* extracts on two freshwater algae species
 HE Zongxiang, LIU Lu, LI Cheng, et al (1527)
- Flora analysis of riparian vegetation in Yongding-Haihe river system, China XIU Chen, OUYANG Zhiyun, ZHENG Hua (1535)
- Stream habitat assessment of Dong River, China, using *River Habitat Survey* method
 WANG Qiang, YUAN Xingzhong, LIU Hong, et al (1548)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Applying SWAT model to explore the impact of changes in land use and climate on the streamflow in a Watershed of Northern
 China GUO Juntong, ZHANG Zhiqiang, WANG Shengping, et al (1559)
- Climate response of tree growth along an altitudinal gradient in the Changbai Mountains, Northeast China
 CHEN Li, YIN Yunhe, ZHAO Dongsheng, et al (1568)
- The dispersion of airborne pollen and its relationship with major climatic parameters in Shijiazhuang
 LI Ying, LI Yuecong, LÜ Suqing, et al (1575)
- The change of soil carbon and nitrogen under different grazing gradients in Hulunber meadow steppe
 YAN Ruirui, XIN Xiaoping, WANG Xu, et al (1587)
- Spatial distribution and influencing factors of farmland soil organic matter and trace elements in the nansihu region
 WU Jie, LI Yuhuan, LI Zengbing, et al (1596)

Resource and Industrial Ecology

- Transnational land use and its potential environmental consequence LU Xiaoxuan (1606)

《生态学报》2014 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@ rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 薛建辉

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 34 卷 第 6 期 (2014 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 34 No. 6 (March, 2014)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@ rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@ cspg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@ cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元