

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica

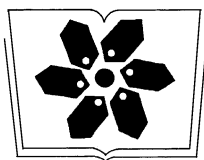
中国生态学会2011年学术年会专辑



第31卷 第19期 Vol.31 No.19 **2011**

中国生态学会
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 31 卷 第 19 期 2011 年 10 月 (半月刊)

目 次

卷首语	本刊编辑部 (I)
我国生态学研究及其对社会发展的贡献	李文华 (5421)
生态学的现任务——要在混乱和创新中前进	蒋有绪 (5429)
发展的生态观:弹性思维	彭少麟 (5433)
中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展	刘世荣,王 晖,栾军伟 (5437)
区域尺度陆地生态系统碳收支及其循环过程研究进展	于贵瑞,方华军,伏玉玲,等 (5449)
流域尺度上的景观格局与河流水质关系研究进展	刘丽娟,李小玉,何兴元 (5460)
中国珍稀濒危孑遗植物珙桐种群的保护	陈 艳,苏智先 (5466)
水资源投入产出方法研究进展	肖 强,胡 聃,郭 振,等 (5475)
我国害鼠不育控制研究进展	刘汉武,王荣欣,张凤琴,等 (5484)
基于 NDVI 的三江源地区植被生长对气候变化和人类活动的响应研究	李辉霞,刘国华,傅伯杰 (5495)
毛乌素沙地克隆植物对风蚀坑的修复	叶学华,董 鸣 (5505)
近 50 年黄土高原地区降水时空变化特征	王麒麟,范晓辉,王孟本 (5512)
森林资源可持续状况评价方法	崔国发,邢韶华,姬文元,等 (5524)
黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响——景观水平与多尺度比较	王计平,杨 磊,卫 伟,等 (5531)
未来 10 年黄土高原气候变化对农业和生态环境的影响	俄有浩,施 茜,马玉平,等 (5542)
山东近海生态资本价值评估——近海生物资源现存量价值	杜国英,陈 尚,夏 涛,等 (5553)
山东近海生态资本价值评估——供给服务价值	王 敏,陈 尚,夏 涛,等 (5561)
特大冰冻灾害后大明山常绿阔叶林结构及物种多样性动态	朱宏光,李燕群,温远光,等 (5571)
低磷和干旱胁迫对大豆植株干物质积累及磷效率的影响	乔振江,蔡昆争,骆世明 (5578)
中国环保模范城市生态效率评价	尹 科,王如松,姚 亮,等 (5588)
污染足迹及其在区域水污染压力评估中的应用——以太湖流域上游湖州市为例	焦雯珺,闵庆文,成升魁,等 (5599)
近二十年来上海不同城市空间尺度绿地的生态效益	凌焕然,王 伟,樊正球,等 (5607)
城市社区尺度的生态交通评价指标	戴 欣,周传斌,王如松,等 (5616)
城市生态用地的空间结构及其生态系统服务动态演变——以常州市为例	李 锋,叶亚平,宋博文,等 (5623)
中国居民消费隐含的碳排放量变化的驱动因素	姚 亮,刘晶茹,王如松 (5632)
煤矿固废资源化利用的生态效率与碳减排——以淮北市为例	张海涛,王如松,胡 聃,等 (5638)
城市遮阴环境变化对大叶黄杨光合过程的影响	于盈盈,胡 聃,郭二辉,等 (5646)
广东永汉传统农村的聚落生态观	姜雪婷,严力蛟,后德仟 (5654)
长江三峡库区昆虫丰富度的海拔梯度格局——气候、土地覆盖及采样效应的影响	刘 晔,沈泽昊 (5663)
东南太平洋智利竹筴鱼资源和渔场的时空变化	化成君,张 衡,樊 伟 (5676)
豚草入侵对中小型土壤动物群落结构特征的影响	谢俊芳,全国明,章家恩,等 (5682)

我国烟粉虱早春发生与秋季消退·····	陈春丽, 鄧军锐, 戈 峰, 等 (5691)
变叶海棠及其伴生植物峨眉小檗的水分利用策略 ·····	徐 庆, 王海英, 刘世荣 (5702)
杉木人工林不同深度土壤 CO ₂ 通量·····	王 超, 黄群斌, 杨智杰, 等 (5711)
不同浓度下四种除草剂对福寿螺和坑螺的生态毒理效应·····	赵 兰, 骆世明, 黎华寿, 等 (5720)
短期寒潮天气对福州市绿地土壤呼吸及组分的影响·····	李熙波, 曾文静, 李金全, 等 (5728)
黄土丘陵沟壑区景观格局对流域侵蚀产沙过程的影响——斑块类型水平·····	王计平, 杨 磊, 卫 伟, 等 (5739)
气候变化对物种分布影响模拟中的不确定性组分分割与制图——以油松为例·····	张 雷, 刘世荣, 孙鹏森, 等 (5749)
北亚热带马尾松年轮宽度与 NDVI 的关系 ·····	王瑞丽, 程瑞梅, 肖文发, 等 (5762)
物种组成对高寒草甸植被冠层降雨截留容量的影响·····	余开亮, 陈 宁, 余四胜, 等 (5771)
若尔盖湿地退化过程中土壤水源涵养功能 ·····	熊远清, 吴鹏飞, 张洪芝, 等 (5780)
桂西北喀斯特峰丛洼地不同植被演替阶段的土壤脲酶活性·····	刘淑娟, 张 伟, 王克林, 等 (5789)
利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响 ·····	符利勇, 曾伟生, 唐守正 (5797)
火烧对黔中喀斯特山地马尾松林土壤理化性质的影响·····	张 喜, 朱 军, 崔迎春, 等 (5809)
不同培育时间侧柏种基盘苗根系生长和分布·····	杨喜田, 董娜琳, 闫东锋, 等 (5818)
Cd ²⁺ 与 CTAB 复合污染对枫香幼苗生长与生理生化特征的影响 ·····	章 芹, 薛建辉, 刘成刚 (5824)
3 种入侵植物叶片挥发物对早稻幼苗根的影响 ·····	张凤娟, 徐兴友, 郭艾英, 等 (5832)
米槠-木荷林优势种群的年龄结构及其更新策略 ·····	宋 坤, 孙 文, 达良俊 (5839)
褐菖鲉肝 CYP 1A 作为生物标志物监测厦门海域石油污染状况 ·····	张玉生, 郑榕辉, 陈清福 (5851)
基于输入-输出流分析的生态网络 φ 模式能流 ρ 模式能流测度方法 ·····	李中才, 席旭东, 高 勤, 等 (5860)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 444 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 50 * 2011-10	



封面图说: 胡杨是我国西北干旱沙漠地区原生的极其难得的高大乔木, 树高 15—30 米, 能忍受荒漠中的干旱环境, 对盐碱有极强的忍耐力。为适应干旱气候一树多态叶, 因此胡杨又称“异叶杨”。它对于稳定荒漠河流地带的生态平衡, 防风固沙, 调节绿洲气候和形成肥沃的森林土壤具有十分重要的作用。秋天的胡杨林一片金光灿烂。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

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.

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.

利用混合模型分析地域对国内马尾松生物量的影响

符利勇, 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:开展全国森林生物量监测和评估, 建立适合较大区域范围的通用性立木生物量模型是一项重要的基础工作, 而分析森林生物量受不同地域的影响并保证不同尺度范围森林生物量估计值的可靠性, 是必须面临的问题。以南方马尾松 (*Pinus massoniana*) 地上生物量数据为例, 介绍了如何利用混合模型理论来分析地域对马尾松地上生物量的影响以及利用混合模型构建全国通用性立木生物量模型, 为得到不同区域尺度范围内可靠的森林生物量评价和估计提供了有效途径。结果表明, 混合模型不仅提高了模型的精度和通用性, 并且模型中每个参数都有特定的数学含义, 通过这些参数很容易分析出随机因子对生物量的影响程度。因此混合模型方法具有较大的灵活性和适应性, 可推广到其它通用性模型(如材积方程)的建立。

关键词:立木生物量; 马尾松; 混合模型; 通用性

Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model

FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng*

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

Abstract: It is fundamental work for monitoring and assessing national forest biomass in order to develop generalized single-tree biomass models for large scale forest biomass estimation. However, the reliability of estimating forest biomass among different scales is a real problem. Mixed model plays an important role in various industry such as pharmacokinetics, agriculture and medicine, because of its outstanding power in dealing with repeated-measures data, longitudinal data, blocked design data, multilevel data and the capacity to make accurate local prediction. In this article, we consider the influence of origin and region of Masson pine (*Pinus massoniana*) to biomass, because the data including origin and region could be considered as the two level blocked data, then, the mixed-effects model can be used to analysis these kinds of problem.

The mixed-effects model approach is an excellent statistical technique for parameter estimation, and it has been used in many fields for nearly twenty years. However, in recent years, it starts to use mixed-effects model in forestry, and it is much less to use mixed model in building biomass model. In this paper, based on the above-ground biomass data of Masson pine, which is an important coniferous species in southern China, generalized single-tree biomass equations for national and regional forest biomass estimation were established by using linear mixed model, which provided effective approaches to solve the compatibility of forest biomass estimation among different scales. In mixed model, the random parameters could reflect difference by assuming the data distributing normally, and these parameters cancel each other out with an expected value of zero. In fact, we can consider that the difference among these samples is divided into two parts in mixed model: one oriented from the difference among types; another resulted from the random effects. The result shows that based on the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(1070485)

收稿日期: 2011-05-24; 修订日期: 2011-07-11

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

above-ground biomass data of Masson pine in southern China, the generalized single-tree biomass equations for national and regional forest biomass estimation were developed by using linear mixed model, which could solve the universality of forest biomass estimation among different scales. The fitting result of subject-specific models shows that the above-ground biomass estimation of trees with the same diameter is varied by different origins and regions. To the Masson pine in southern China, the above-ground biomass of a tree with the same diameter in natural forest is larger than that in plantation; and the biomass estimation decreases from the eastern region (Jiangsu, Zhejiang, Fujian) to the south-central region (Jiangxi, Hunan, Guangdong), and then the north-western region (Anhui, Guangxi, Guizhou). If we consider origin and region together, different patterns of the above-ground biomass estimation would appear; for natural forests, trees with the same diameter in eastern region have the largest biomass; whereas, for plantations, trees in south-central region have the largest biomass.

In conclusion, the linear mixed model with random parameters is better than traditional model. Especially, the linear mixed model is more flexible because all the parameters in the model have certain mathematics meaning, and which can be used to solve different ecological phenomenon. In view of these advantages, the mixed model could be applied to develop other generalized models such as tree volume equations.

Key Words: single-tree biomass; Masson pine (*Pinus massoniana*); mixed model; universality

20 世纪以来,森林锐减、土地退化、环境污染、生物多样性丧失等生态问题已经成为全球关注的重大问题,特别是人类活动产生的 CO_2 浓度急剧上升和由此导致的温室效应,是目前人类面临的最严峻的全球性环境变化问题。森林生态系统在调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用,而森林生物量及其生产力的大小是评价森林循环贡献的基础^[1-5]。对生物量的研究,1964—1974 年国际林联 (IUFRO) 开展的国际生物学计划成为全球性陆地森林生态系统生物量和碳储量研究的起点^[6-9]。尤其是国际林联把生物量列为全球、区域和国家级森林资源监测的重要内容^[10],更带动了全球范围对森林生物量的研究。20 世纪 90 年代以来,国内外关于森林生物量方面的研究很多。在国外,Ter-Mikaelian 等对北美 65 个树种的生物量方程进行了综述,共给出了形如 $M = aD^b$ 803 个方程^[11];Parresol 对常用的生物量模型的评价指标、林分生物量估计值的误差成分也进行了讨论^[12];Bi 等建立了澳大利亚 2 个树种的可加性方程系统,并确定了生物量估计值的置信区间^[13];Hansen 对美国农业部林务局 FIA 项目采用的 4 种不同的蓄积量和生物量估计方法进行了比较,结果表明 4 种方法产出的结果类似,但对于特定树种和特定径级就存在很大差异,建议 FIA 建立全国一致的方法来估计蓄积量和生物量^[14]。Chojnacky 和 Jenkins 分别为美国的主要树种建立了一组国家尺度的通用性生物量方程^[15-16]。法国、冰岛、芬兰、墨西哥等国家,也相继建立了主要树种的立木生物量方程或材积方程^[17-20]。Muukkonen 还建立了欧洲 5 个主要树种组的通用性材积方程和生物量方程^[21]。另外,Case 和 Hall 对加拿大中西部地区 10 个树种的不同尺度(地方的、区域通用的、全国通用的)材积和生物量方程进行比较后发现,随着方程通用性水平的提高,用于局部地区的预估误差也相应增大^[22]。

在国内,贺东北等以中国南方马尾松为研究对象,通过线性联立方程组方法,建立了与材积兼容的可加性(相容性)立木生物量模型^[23];曾伟生以南方杉木为研究对象,研究建立了 3 种形式的非线性生物量模型系统,既考虑了与材积兼容的问题,又满足了林木总生物量等于各分量之和^[24];骆期邦等以南方杉木、马尾松和阔叶树 3 个树种组为研究对象,同时建立了可加性(相容性)的线性和非线性生物量方程系统^[25];胥辉以中国北方的落叶松、冷杉、椴树为研究对象,建立了与材积相容的林木总生物量和各分量模型^[26];唐守正等以东北落叶松为研究对象,从解决模型之间的相容性或可加性出发,对 2 种比例平差方法和 3 种非线性联合估计方法进行了对比分析和评价^[27];王仲峰研究和分析了森林生物量估计的精度评定模型,提出了由乔木材积转换生物量的非线性模型-VCD 模型,并推导出了同一地区之间生物量转换的非线性模型-CWD 模型^[9];程堂仁以甘肃小陇山地区锐齿栎、油松、栓皮栎、杨桦、落叶松、华山松、云杉、冷杉、其它阔叶混交林等 8 类林分为研究对象,建立了立木生物量与胸径、树高之间的相对生长方程^[28];陈乐蓓对平原农区广泛栽植的杨树人工林进行

了研究,运用相对生长法建立了若干个生物量模型,并估算了不同经营模式下杨树人工林的生物量和碳储量^[29]。

国内外学者主要是对森林生物量模型参数估计法和模型通用性进行研究,而针对树种生物量受不同地域的影响研究较少。在实际研究中可发现,不同地域相同的树种生物量可能差别较大^[30],因此在建立全国树种生物量通用模型及经营管理森林时,考虑地域因子对生物量的影响是十分必要的。并且,森林生物量及其生产力的大小是评价森林碳循环贡献,规划国内森林资源分布及增强森林的建设和目标的基础,这些受地域的影响较大,因此研究森林生物量受地域的影响,它不仅是估测森林碳储量和评价森林碳循环贡献的基础,也是森林生态功能评价的重要途径^[31-32]。

本文主要目的是介绍如何用混合模型来分析不同地域对树种生物量的影响并建立相应的通用性生物量模型。混合模型是指模型中部分参数或全部参数由固定效应和随机参数的混合,该模型为分析分组数据提供了灵活和强有力的工具。分组数据包括纵向数据、重复测量数据、分组设计和多水平数据。生物量调查数据正好属于纵向数据、分组设计及多水平数据,因此在理论上利用混合模型来分析生物量是可行的。由于混合模型不但比传统的回归模型拟合精度要高,而且模型中各参数具有明确的数学含义,使得模型有较强的解释性^[30],因此本文利用它的这些优点来研究生物量受地域的影响。

文中是以起源和区域作为随机因子,把幂函数形式的一元立木生物量方程作为基础模型来构建混合模型。假定随机参数方差服从一般结构,利用建模数据,对基础模型所衍生出来的所有考虑起源和区域交互作用的混合模型参数进行计算,根据这些参数的取值来分析不同区域对人工马尾松林和天然马尾松林的生物量生长影响,并且对这些衍生出来的模型进行比较分析,选择出一种精度最高、通用性最强的生物量方程。最后利用检验样本对最优模型与用于国家级森林生物量估计的总体平均模型进行比较,得到了该最优生物量模型不仅比总体平均模型预测精确高,并且通用性也强。

1 数据来源

本文所用建模数据和部分检验样本数据是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 至 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。其中拿出 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 65 株,人工 55 株;福建 18 株,浙江、江西、湖南、广西、贵州各 16 株,安徽、广东各 8 株,江苏 6 株。样木数按 2、4、6、8、12、16、20、26、32、38cm 以上共 10 个径阶均匀分配(除 26、32cm 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。样木按起源、省份和径阶的分配情况见表 1,各省不同起源的样木生物量与胸径的关系见图 1。

2 研究方法

2.1 外业调查

2.1.1 样本选取和采伐

根据建模样本的分配要求,选定胸径和树高 2 项主要因子进行控制,分别按不同的树高级选取标准样木。选择的标准样木,应为没有发生断梢、分叉的生长正常的林木,且其冠幅、冠长也基本具有代表性,原则上尽量不选林缘木和孤立木。

样木采伐前,要认真确定地面以上 1.3m 处的位置,并再次准确测量胸径 D ,同时测定根颈处直径 D_0 (根径或地径);然后再分南北、东西(或最宽,最窄)两个方向测量冠幅。伐前测量完成之后,才可以对样木实施采伐。样木伐倒后,用皮尺准确测量树高 H (树干长度)和树干基部至第一正常活枝处长度(枝下高)。

表 1 南方马尾松立木地上生物量实测样本分配统计表

Table 1 The distribution of sample trees of Masson pine in southern China by origins, provinces, and diameter classes		径阶 Diameter/cm										合计 Sum
类型 Types		2	4	6	8	12	16	20	26	32	≥38	
省份 provinces	江苏	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	6
	浙江	1	2	2	1	2	2	1	2	2	1	16
	安徽	0	1	1	1	1	1	0	1	1	1	8
	福建	2	1	2	2	1	2	2	1	3	2	18
	江西	1	2	2	2	1	1	2	2	2	1	16
	湖南	2	2	1	2	1	2	1	2	2	1	16
	广东	1	1	0	1	1	1	1	0	2	0	8
	广西	2	1	2	1	2	2	2	1	3	0	16
	贵州	2	2	2	1	2	1	2	1	2	1	20
起源 Origins	天然 Natural	5	6	6	7	5	7	5	6	9	5	61
	人工 Planted	7	7	6	5	7	5	7	4	8	3	59
合计 Total		12	13	12	12	12	12	10	17	8	120	

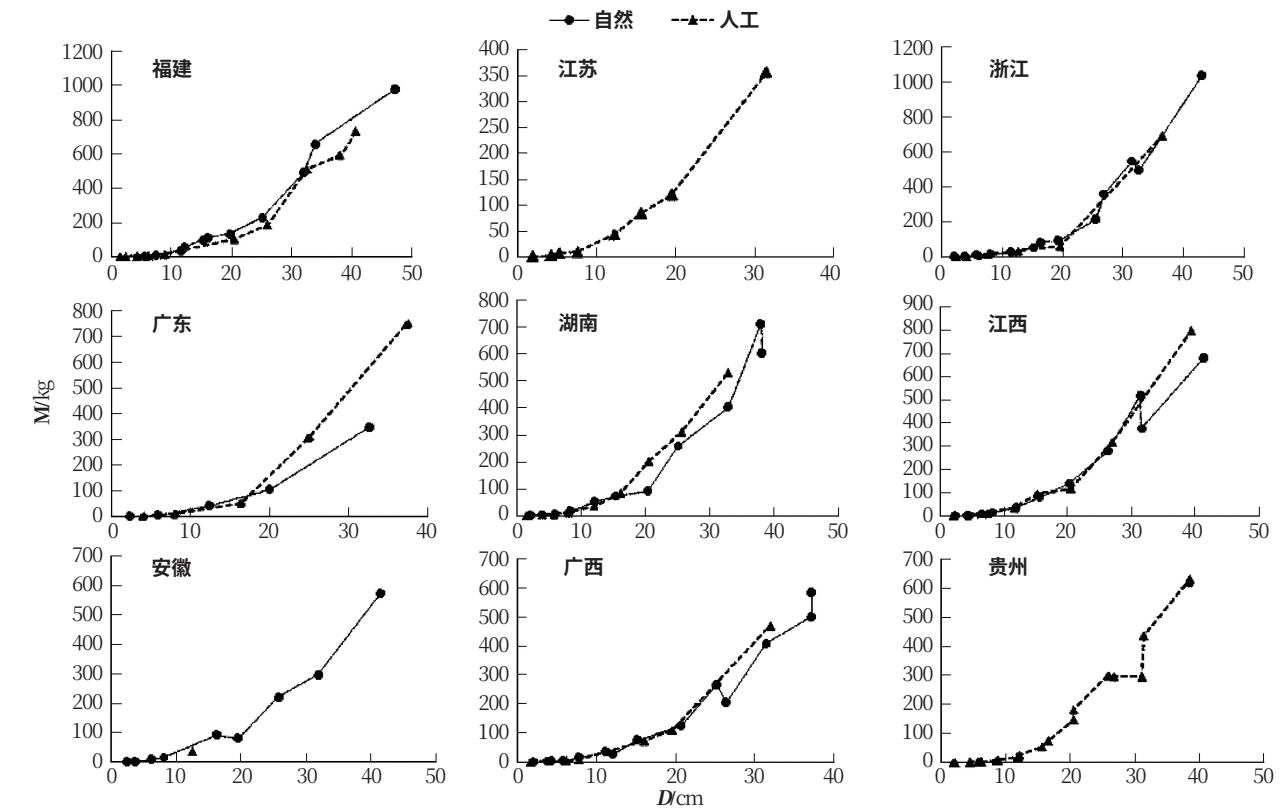


图 1 各省不同起源样木生物量-胸径关系图

Fig. 1 The relations between biomass and DBH for different origins in the nine provinces

2.1.2 树干鲜重测定

将全部枝条砍掉后测量树干鲜重,一般采用全干称重法。在称重之前,先根据所测树高将树干分为 11 个区分段,测定各个区分位置(0,0.5/10、1/10、2/10、3/10、⋯、9/10H)的带皮直径和皮厚,并推算去皮直径(等于带皮直径减去 2 陪皮厚)。对于小径阶样木,可以一次性称取整个树干的重量;对于大径阶样木,一般需分段称重。不论样木大小,都要分成上(5/10H 以上)、中(2/10—5/10H 之间)、下(0—2/10H 之间)3 段,然后再分别称其鲜重。如果树干过大过重,还可考虑将上中下各段按 1m 或其整数倍锯成规格原木后分段称重。在

伐倒样木和锯断树干过程中产生的木屑、木片也应计入树干鲜重,具体操作时可用相同大小与厚度的圆盘来折算。

2.1.3 树冠鲜重测定

综合考虑树枝所处位置及其大小和数量,将树冠分上、中、下3层,先将全部死枝单独挑出来,称其总重量;然后分别称取各层带叶活枝(含花、果,下同)的总鲜重。从每一层枝条中选取大小和长度居中、生长良好、叶量中等的3个标准枝,将标准枝摘叶(含花,下同)后,分别称其枝重和叶重,再根据每层标准枝的枝、叶的鲜重比例和各层枝叶总鲜重,推算每层的枝、叶鲜重和整个树冠的枝、叶鲜重。

2.1.4 样品含水率测定

含水率是指样品中水分所占百分率。测定方法是:将外业采集的样品置于烘箱内烘干至恒重。具体操作时,要求采集回来的每一个样品,按规定流程依次分批放入烘箱,先在85℃恒温下烘12h(树皮、树叶、小枝和死枝)或24h(圆盘、大枝和根茎样品)进行第一次称重,然后在85℃恒温下继续烘烤,每隔2h称重1次,当最近两次重量相对误差 $\leq 1.0\%$ 时停止烘烤,将样品取出放入玻璃干燥皿内冷却至室温再称其干重,根据每个样品的干重和鲜重计算含水率。

2.2 内业数据处理及分析

2.2.1 材积计算

按以下公式分别用各不同高度处的带皮直径、去皮直径和树高,分别计算样木的带皮材积和去皮材积及其上、中、下3个部分的材积:

$$V_{\text{总}} = \pi/40000 \times (d_0^2/4 + d_{0.5}^2/2 + 3d_1^2/4 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 + d_6^2 + d_7^2 + d_8^2 + 5d_9^2/6) \times H/10 \quad (1)$$

$$V_{\text{上}} = \pi/40000 \times (d_5^2/2 + d_6^2 + d_7^2 + d_8^2 + 5d_9^2/6) \times H/10 \quad (2)$$

$$V_{\text{中}} = \pi/40000 \times (d_2^2/2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2/2) \times H/10 \quad (3)$$

$$V_{\text{下}} = \pi/40000 \times (d_0^2/4 + d_{0.5}^2/2 + 3d_1^2/4 + d_2^2/2) \times H/10 \quad (4)$$

式中, $d_i (i=0, 0.5, 1, 2, \dots, 9)$ 分别表示0、0.5/10、1/10、2/10、 $\dots$ 、9/10H处的直径(cm),H为树高(m),V为材积(m^3), π 取值3.14159。上、中、下3个部分的材积分别是指5/10以上部分、2/10—5/10H之间、0—2/10H之间的材积,各项材积值均保留4位小数。

2.2.2 含水率计算

根据干材、干皮、树枝、树叶和死枝样品的鲜重和最后干重,计算各自的含水率:

$$p\% = (\text{鲜重} - \text{干重}) / \text{鲜重} \times 100\% \quad (5)$$

树干(干材+干皮)平均含水率根据上、中、下3个部位的含水率,按各部分的鲜重进行加权平均:

$$P\%_{\text{树干}} = (P\%_{\text{上}} \times \text{鲜重}_{\text{上}} + P\%_{\text{中}} \times \text{鲜重}_{\text{中}} + P\%_{\text{下}} \times \text{鲜重}_{\text{下}}) / \text{鲜重}_{\text{总}} \quad (6)$$

因为树干上、中、下3个部位各取了2套样本,树干的平均含水率应该取两者之和的算术平均数。

2.2.3 干重计算

分别计算树干干重和树冠干重。树干干重等于木材和树皮干重之和,树冠干重等于树枝(含死枝)和树叶干重之和;树干和树冠干重合计为地上部分干重。

(1) 树干干重和密度计算

根据树干上、中、下3部分鲜重和相应的含水率计算树干干重:

$$\text{干重}_{\text{树干}} = \sum \text{干重}_{\text{树干}i} = \sum [\text{鲜重}_{\text{树干}i} \times (1 - P_{\text{树干}i})] \quad (i=1, 2, 3) \quad (7)$$

然后再根据上、中、下3部分树干干重中干材占比 $R_{\text{干材}}$ (是指树干样品中干材干重占树干干重的比例)计算干材干重和干皮干重:

$$\text{干重}_{\text{干材}} = \sum [\text{干重}_{\text{树干}i} \times R_{\text{干材}i}] \quad (i=1, 2, 3) \quad (8)$$

$$\text{干重}_{\text{干皮}} = \text{干重}_{\text{树干}} - \text{干重}_{\text{干材}} \quad (9)$$

树干密度(基本密度)根据树干干重和树干带皮材积计算:

$$\text{树干密度} = \text{干重}_{\text{树干}} / \text{材积}_{\text{带皮}} \quad (10)$$

(2) 树冠干重计算

根据树冠上、中、下 3 层的树枝鲜重、死枝鲜重和树叶总鲜重,分别用各自的含水率计算干重:

$$\text{干重}_{\text{树枝}} = \sum [\text{鲜重}_{\text{树枝}i} \times (1 - P_{\text{树枝}i})] \quad (i = 1, 2, 3) \quad (11)$$

$$\text{干重}_{\text{死枝}} = \text{鲜重}_{\text{死枝}} \times (1 - P_{\text{死枝}}) \quad (12)$$

$$\text{干重}_{\text{树冠}} = \text{干重}_{\text{树枝}} + \text{干重}_{\text{死枝}} + \text{干重}_{\text{树叶}} \quad (13)$$

2.2.4 数据分析

本文是选用混合模型来分析不同地域对马尾松生物量的影响,对应线性混合模型的基本形式为^[33-35]:

$$Y = X\beta + Zu + \varepsilon \quad (14)$$

式中, Y 为应变量, β 为固定效应参数, u 为随机效应参数,服从正态分布 $u \sim N(0, G)$, X 为固定效应参数设计矩阵, Z 为随机效应参数设计矩阵, ε 为随机误差项,服从正态分布 $\varepsilon \sim N(0, S^2I)$ 。并且假定随机效应 U 和随机误差之间相互独立。

幂函数形式的一元立木生物量方程在全世界得到了广泛应用^[11,16,20-21],因此本文选用下列一元方程作为构建生物量混合模型的基础模型:

$$M = aD^b(1 + \varepsilon) \quad (15)$$

式中, M 为地上生物量, a 、 b 为参数, ε 为相对误差。

本文是考虑地域对两种不同起源(人工林和天然林)马尾松的影响,这种情况可等价为考虑起源和地域交互作用的两种随机因子对生物量的影响。由于常用软件如 SAS, S-PLUS 及 R 都不能计算由式(15)衍生出的两因子非线性混合模型,因此本文只能把基础模型转化为线性模型来分析。将(15)式通过对数转换得到如下线性形式:

$$y = a_0 + bx + \varepsilon \quad (16)$$

式中, $y = \ln M$, $x = \ln D$, $a_0 = \ln a$, $\varepsilon = \ln(1 + \varepsilon)$ 。

根据(16)式拟合结果,可由下式得到生物量的估计值:

$$\hat{M} = \exp(\hat{a}_0 + \hat{b}x) \quad (17)$$

式中, $\hat{a}_0$, $\hat{b}$ 分别为参数 a_0 , b 的估计值。

但是由于对数转换存在偏差,还必需对(17)式进行修正,其中最常用的校正因子为 $\exp(S^2/2)$ ^[36-37],这时校正后的生物量估计值为:

$$\hat{M} = \exp(\hat{a}_0 + \hat{b}x + S^2/2) \quad (18)$$

式中, S 为随机误差 ε 的方差。

起源分为天然林和人工林 2 个类型,类型代码分别为 1 和 2,样本单元数分别为 61 和 59。因为区域涉及 9 个省区,且样本单元数差异较大(表 1 和图 2),综合考虑区域的水热条件和样本单元数的平衡,进一步将区域分为 3 个类型:东部地区(江、浙、闽)、中南部地区(赣、湘、粤)、西部和北部地区(皖、黔、桂),类型代码分别为 1、2、3,每个类型的样本单元数均为 40。

线性混合模型的计算是利用 ForStat 软件(V2.1)“统计分析”功能模块中的“线性混合模型”求解参数,其中参数估计方法为限制性极大似然法^[35]。文中其它计算都是在 ForStat 软件(V2.1)上实现的。

3 结果与讨论

3.1 模型参数计算

本文把(16)式作为构建混合模型的基础模型,该基础模型包含 2 个固定参数,由于把起源和区域作为随机效应因子并考虑它们之间的交互作用,因此可衍生出 15 种混合模型(表 2)。

表 2 模型混合参数
Table 2 The mixed parameters of models

模型号 Models	混合参数 Mixed parameter	模型号 Models	混合参数 Mixed parameter	模型号 Models	混合参数 Mixed parameter	模型号 Models	混合参数 Mixed parameter	模型号 Models	混合参数 Mixed parameter
1	(1+2+3,0)	4	(1+2+3,3)	7	(2,1+2+3)	10	(1+3,1+2+3)	13	(1+2+3,1+3)
2	(1+2+3,1)	5	(0,1+2+3)	8	(3,1+2+3)	11	(2+3,1+2+3)	14	(1+2+3,2+3)
3	(1+2+3,2)	6	(1,1+2+3)	9	(1+2,1+2+3)	12	(1+2+3,1+2)	15	(1+2+3,1+2+3)

混合参数含义为:逗号前面表达式为参数 a 的结构,逗号后面表达式为参数 b 的结构;其中 0 表示不考虑随机因子,1 表示起源,2 表示地域,3 表示起源和地域之间的交互作用;例如模型号 1 中(1+2+3,0)表示为参数 a 考虑第四种情况即为起源+区域+起源 * 区域,参数 a 不考虑随机效应

利用建模数据,对回归模型和 15 种衍生出的混合模型参数进行计算,结果见表 3 和表 4。其中表 3 列出了所有模型的固定效应参数值和两个随机效应因子主效应值,表 4 列出了 15 种混合模型中两个随机效应因子交互作用产生的随机效应值。

表 3 模型的固定效应参数和随机主效应参数估计值
Table 3 The fixed effects and random main effects parameters estimates of models

模型号 Models	固定效应 Fixed effects		$u^{①}$			
	a	b	u_{a1}	u_{a2}	u_{a3}	u_{a4}
回归模型 Reg-Model	-2.2592	2.3780	—	—	—	—
1	-2.2469	2.3729	0.0268	-0.0268	—	—
2	-2.2483	2.3734	0	0	0.0083	-0.0083
3	-2.468	2.3729	0.0269	-0.0269	—	—
4	-2.2570	2.3755	0.0279	-0.0279	—	—
5	-2.2526	2.3745	—	—	0.0063	-0.0063
6	-2.2512	2.374	0.0173	-0.0173	0.0020	-0.0020
7	-2.2526	2.3745	—	—	0.0006	-0.0006
8	-2.2587	2.3761	—	—	0.0107	-0.0107
9	-2.2512	2.3740	0.0173	-0.0173	0.002	-0.002
10	-2.2571	2.3755	0.0243	-0.0243	0.0017	-0.0017
11	-2.2587	2.3761	—	—	0.0107	-0.0107
12	-2.2483	2.3733	0	0	0.0083	-0.0083
13	-2.2571	2.3755	0.0243	-0.0243	0.0017	-0.0017
14	-2.257	2.3755	0.0279	-0.0279	—	—
15	-2.2571	2.3755	0.0243	-0.0243	0.0017	-0.0017
模型号 Models	$v^{②}$					
	v_{a1}	v_{a2}	v_{a3}	v_{b1}	v_{b2}	v_{b2}
回归模型 Reg-Model	—	—	—	—	—	—
1	0	0	0	—	—	—
2	0	0	0	—	—	—
3	-0.0011	-0.0055	0.0066	0.0058	0.003	-0.0036
4	0	0	0	—	—	—
5	—	—	—	0	0	0
6	—	—	—	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
8	—	—	—	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
10	—	—	—	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0
12	-0.0003	-0.0014	0.0017	0.0002	0.0008	-0.0010
13	0	0	0	—	—	—
14	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0

① u 为起源产生的随机效应, u_{ai} 为起源作用在参数 a 上面的随机效应; u_{bi} 为起源作用在参数 b 上面的随机效应;其中 $i = 1$ 代表天然林, $i = 2$ 代表人工林; ② v 为地域产生的随机效应, v_{ai} 为地域作用在参数 a 上面的随机效应; v_{bi} 为地域作用在参数 b 上面的随机效应;其中 $i = 1$ 代表区域 1, $i = 2$ 代表区域 2, $i = 3$ 代表区域 3

表 4 模型的交互随机效应参数估计值*

Table 4 The interaction random effects parameters estimates of models						
模型号 Models	a					
	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}
1	0.0433	-0.0174	-0.0028	-0.0209	0.02235	-0.0246
2	0.0478	-0.150	-0.0005	-0.0249	0.0215	-0.0289
3	0.0428	-0.0180	-0.002	-0.0207	0.0216	-0.0236
4	-0.081	0.0004	0.0527	0.0592	-0.0466	0.0154
5	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—
7	—	—	—	—	—	—
8	-0.0756	0.0050	0.0541	0.0537	-0.0489	0.0118
9	—	—	—	—	—	—
10	-0.0795	0.0016	0.0532	0.0578	-0.0473	0.0143
11	-0.0756	0.005	0.0541	0.0537	-0.049	0.0118
12	0.0476	-0.0152	-0.0002	-0.025	0.0212	-0.0286
13	-0.0795	0.0016	0.05318	0.0578	-0.0473	0.0143
14	-0.0810	0.0004	0.0527	0.0593	-0.0466	0.0153
15	-0.0795	0.0016	0.0532	0.0578	-0.0473	0.0143

模型号 Models	b					
	ρ_{11}	ρ_{12}	ρ_{13}	ρ_{21}	ρ_{22}	ρ_{23}
1	—	—	—	—	—	—
2	—	—	—	—	—	—
3	—	—	—	—	—	—
4	0.0528	-0.0003	-0.0344	-0.0386	0.0304	-0.010
5	0.0274	-0.0031	-0.0072	-0.0179	0.0129	-0.0121
6	0.0256	-0.0042	-0.0079	-0.0163	0.0133	-0.0106
7	0.0274	-0.0031	-0.0072	-0.0179	0.0129	-0.0121
8	0.0502	-0.0033	-0.0359	-0.0356	0.0325	-0.0078
9	0.0256	-0.0042	-0.0079	-0.0163	0.0133	-0.0106
10	0.052	-0.001	-0.0348	-0.0378	0.0309	-0.0093
11	0.0502	-0.0033	-0.0359	-0.0356	0.0325	-0.0078
12	—	—	—	—	—	—
13	0.0520	-0.0010	-0.0348	-0.0378	0.0309	-0.0093
14	0.0528	-0.0003	-0.0344	-0.0386	0.0304	-0.010
15	0.052	-0.001	-0.0348	-0.0378	0.0309	-0.0093

* 对于起源,天然林用 1 表示,人工林用 2 表示;对于区域,区域 1(东部地区)用 1 表示,区域 2(中南部地区)用 2 表示,区域 3(西部和北部地区)用 3 表示; ρ_{ij} 表示起源 i 与地域 j 之间交互作用产生的随机效应,其中 $i=1,2, j=1,2,3$

3.2 地域对马尾松生物量的影响

由于混合模型中各参数有明确的生物学意义,因此可利用衍生出的全部混合模型的参数取值来分析地域对马尾松的影响。根据模型(16)可知,马尾松生物量与两个形参(a_0 和 b)成正比,由于形参中固定效应参数恒取一个值,因此对于相同直径大小的马尾松,两个形参取值越大则对应的生物量也大。由于各个随机因子所生产的随机效应之和都为 0(如表 3 中每个模型随机效应的取值都满足 $u_{11}+u_{21}=0;u_{21}+u_{22}=0;v_{11}+v_{12}+v_{13}=0;v_{21}+v_{22}+v_{23}=0$,交互作用同样也满足),因此根据各自随机效应取值大小可反映出相应的随机效应因子对马尾松生物量的影响程度。从表 3 可得,由起源产生的随机效应,在 15 个混合模型中,天然林全为正,人工林全为负(二者刚好是正负相抵),说明相同直径林木的地上生物量,天然类型要大于人工类型。当不考虑马尾松的起源,单纯从区域来看,模型 3、模型 12 中所产生的随机效应不为 0,其它模型均为零,因此可说明相同直径

林木的地上生物量,从东部类型到中南、西部和北部类型,有逐渐减少的迹象,但是这种迹象非常不明显,这可能是由于不同区域对天然林和人工林两类林木生物量强度正好正负相抵消。因此在分析地域对马尾松生物量的影响时考虑林木的起源是很有必要的。

表 4 为 15 种模型中考虑随机效应因子起源和地域之间交互作用所产生的随机效应值。其中, ρ_{11} 表示东部地区马尾松天然林对应的随机效应; ρ_{12} 表示中南部地区马尾松天然林对应的随机效应; ρ_{13} 表示西部和北部地区马尾松天然林对应的随机效应; ρ_{21} 表示东部地区人工马尾松林对应的随机效应; ρ_{22} 表示中南部地区人工马尾松林对应的随机效应; ρ_{23} 表示西部和北部地区人工马尾松林对应的随机效应;在表 3 和表 4 中,根据 15 种模型各自形参对应的随机效应值可得知,对于天然林,东部地区产生的随机效应值比另外两个区域要大,而中南部地区相应的随机效应值最小并且全为负值。由此说明,相同直径林木的地上生物量,东部地区最大,其次是西部和北部地区,最小是中南部。这可能是由于对于天然林东南沿海地区水热条件比较好,林木的生长空间相对较为充分、并且当地护林措施较好从而使得该地区最有利于马尾松天然林生物量的生长,而中南部地域对天然林生物量生长的负面影响较大。对于人工林,中南部地区对应的随机效应值全为正值且最大,而另外两个区域全为负值,这可能是因为在该地区近些年政府对人工马尾松林比较重视,抚育措施比较合理引发的。

3.3 最优模型选择

利用建模数据对基础模型所衍生出的 15 种混合模型进行计算,得到它们相应的 3 个评价指标 AIC、BIC 及对数似然值,见表 5。根据评价指标 AIC 和 BIC“越小越好”的原则,可确定模型 5 为最优模型(在 15 种混合模型中,该模型对应的 AIC 和 BIC 值最小,分别为 AIC=37.9905, BIC=54.6146)。模型 5 的数学表达式为:

$$y_{ijk} = a + (b + u_{2i} + v_{2j} + \rho_{2ij})x_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (19)$$

式中, y_{ijk} 表示起源为 i 地域为 j 对应的第 k 棵马尾松地上生物量的对数值; x_{ijk} 表示起源为 i 地域为 j 对应的第 k 棵马尾松直径的对数值; u_{2i} 、 v_{2j} 和 ρ_{2ij} 分别表示为起源、地域及起源和地域之间交互作用在参数 b 上产生的随机效应, $i = 1, 2, j = 1, 2, 3, k = 1, 2, \dots, n_{ij}$ 。

表 5 衍生模型对应的评价指标

Table 5 The evaluation indexes for each derived models

模型号 Models	AIC	BIC	logLik	模型号 Models	AIC	BIC	logLik	模型号 Models	AIC	BIC	logLik
1	38.8073	55.4314	-13.4036	6	41.8642	64.0296	-12.9321	11	45.5415	73.2484	-12.7708
2	42.9292	65.0946	-13.4646	7	41.9905	64.1560	-12.9952	12	46.9287	74.6355	-13.4643
3	42.8005	64.9660	-13.4002	8	41.5416	63.7070	-12.7708	13	45.3687	73.0755	-12.6843
4	41.3732	63.5387	-12.6866	9	45.8642	73.5710	-12.9321	14	45.3732	73.0801	-12.6866
5	37.9905	54.6146	-12.9953	10	45.3687	73.0755	-12.6843	15	49.3687	82.6169	-12.6843

根据模型 5 中各自参数的取值(表 3 和表 4),可得到用它来预测东部地区天然马尾松林生物量、中南部地区天然马尾松林生物量、西部和北部地区天然马尾松林生物量、东部地区人工马尾松林生物量、中南部地区人工马尾松林生物和西部和北部地区人工马尾松林各自的拟合效果见图 2。根据公式(17),利用回归模型和混合模型 5 分别对检验样本的地上生物量进行估计,并计算出两种模型相应的评价指标。结果为:混合模型 5 对应的平均相对误差 $\bar{E}$ 、均方根误差 δ 和相关指数 R^2 分别为: $\bar{E} = 0.1624, \delta = 15.2896, R^2 = 0.9914$;回归模型对应的平均相对误差 $\bar{E}$ 、均方根误差 δ 和相关指数 R^2 分别为: $\bar{E} = 0.1708, \delta = 21.7785, R^2 = 0.9826$ 。由于混合模型 5 对应的均方误差和平均相对误差比回归模型要小而相关指数比回归误差要大,说明当模型同时考虑两个随机因子的主效应和交互效应时,模型拟合的效果较好。

通过上面分析可得,当基础模型(16)考虑起源、地域及起源和地域之间的交互作用时,对马尾松地上生物量的拟合效果将最好。因此可利用混合模型 5 作为计算全国 3 个地区地上生物量的通用模型。模型的具体表达式为:

对于天然林:

$$\text{东部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745+0.0063+0.0274)} \quad (20)$$

$$\text{中南部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745+0.0063-0.0031)} \quad (21)$$

$$\text{西北部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745+0.0063-0.0071)} \quad (22)$$

对于人工林:

$$\text{东部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745-0.0063-0.0179)} \quad (23)$$

$$\text{中南部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745-0.0063+0.0129)} \quad (24)$$

$$\text{西北部地区} \quad \hat{M} = \exp(-2.2526) \times D^{(2.3745-0.0063-0.0121)} \quad (25)$$

4 结论

本文以南方马尾松地上生物量数据为例,介绍了如何根据混合模型理论分析不同地域对马尾松林地上生物量的影响以及构建全国通用性立木生物量模型。文中选用了幂函数形式的一元立木生物量方程作为构建混合模型的基础模型,同时假定随机效应方差类型为一般结构。实际数据中影响生物量的主要因子为起源和地域,本文中随机效应因子不仅为起源和地域,同时还包括了这两个因子之间的交互作用,由此总共可衍生出 15 种混合模型。通过对这 15 种模型进行计算,根据各模型的参数取值,可分析不同起源的马尾松地上生物量在南方 9 省的生长情况。并且,通过对 15 种混合模型进行比较,选出最优模型。最后利用检验样本对回归模型

和最优模型进行比较分析,得到模型 5 拟合效果最好。因此在实际应用中,可把模型 5 作为全国通用性马尾松立木生物量模型。该模型对应的不同起源和地域马尾松地上生物量的计算公式见式(20)一式(25)。

混合模型为建立不同尺度范围的立木生物量模型提供了有效途径。从更广泛的意义上讲,除了考虑起源、区域等因素,甚至也可以用特定参数或随机参数来体现,从而可以把不同树种的数据合并起来,建立适用于所有树种的通用性模型。并且,与总体平均模型相比,混合模型无论从提高精度还是从提高模型通用性上都有着突出的优势,总体而言,混合模型方法具有较大的灵活性和适应性。

本文偏重于方法研究,对于其它的树种可以用同样的方法来构建其相应的通用性模型。本文所有的参数估计是利用 ForStat 软件(V2.1)“统计分析”模块中的“线性混合模型”计算实现的。计算方法为 Newton-Raphson 法,参数估计方法为限制极大似然法,详细计算方法可见参考资料^[34-35]。由于基础模型(15)能化解为线性模型,因此可以通过线性混合模型来求解。如果基础模型为非线性模型且不能转化成线性模型,那么考虑两个随机效应因子的模型在其参数求解时就要受到限制。到目前为止,能计算非线性混合模型的软件,如 SAS、S-PLUS 和 R 等,都不能计算包含两个随机效应因子并考虑其交互作用的非线性混合效应模型。

References:

- [1] Fang Z, Bailey R L. Nonlinear mixed effects modeling for Slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments. *Forest Science*, 2001, 47(3): 287-300.
- [2] Cronan C S. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U. S. A. *Canadian Journal of Forest Research*, 2003, 33(2): 339-350.
- [3] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.

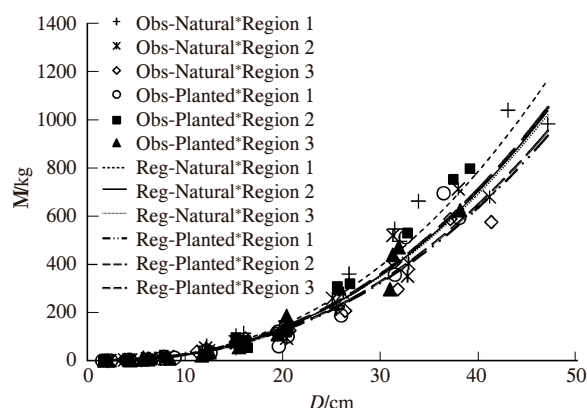


图2 混合模型5拟合效果

Fig. 2 The fitting effect of model 5

- [4] Muukkonen P. Forest inventory-based large-scale forest biomass and carbon budget assessment: new enhanced methods and use of remote sensing for verification. Helsinki: Department of Geography, University of Helsinki, 2006.
- [5] Woodbury P B, Smith J E, Heath L S. Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1/3): 14-27.
- [6] Feng Z W, Wang X K, Wu G. *Forest Ecosystem Biomass and Productivity in China*. Beijing: Science Press, 1999.
- [7] Xiang W H, Tian D L, Yan W D. Review of researches on forest biomass and productivity. *Contral South Forest Inventory and Planning*, 2003, 22(3): 57-60.
- [8] Xue L, Yang P. Summary of research on forest biomass. *Journal of Fujian College of Forestry*, 2004, 24(3): 283-288.
- [9] Wang Z F, Feng Z K. Precision of forest biomass measurement in forest sample plot. *Journal of Beijing Forestry University*, 2005, 27(S2): 173-176.
- [10] IUFRO international guidelines for forest monitoring. IUFRO World Series Vol 5. Vienna: IUFRO, 1994.
- [11] Ter-Mikaelian M T, Korzukhin M D. Biomass equations for sixty-five north American tree species. *Forest Ecology and Management*, 1997, 97(1): 1-24.
- [12] Parresol B R. Assessing tree and stand biomass: a review with examples and, critical comparisons. *Forest Science*, 1999, 45(4): 573-593.
- [13] Bi H Q, Birk E, Turner J, Lambert M, Jurskis V. Converting stem volume to biomass with additivity, bias corrections, and confidence bands for two Australian tree species. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2001, 31(3): 298-319.
- [14] Hansen M. Volume and biomass estimation in FIA: national consistency vs. regional accuracy//McRoberts R E, Reams G A, van Deusen P C, Moser J W, eds. *Proceedings of the Third Annual Forest Inventory and Analysis Symposium, GTR NC-230*. St Paul: North Central Research Station, Forest Service USDA, 2002: 109-120.
- [15] Chojnacky D C. Allometric scaling theory applied to FIA biomass estimation//McRoberts R E, Reams G A, van Deusen P C, Moser J W, eds. *Proceedings of the Third Annual Forest Inventory and Analysis Symposium, GTR NC-230*. St Paul: North Central Research Station, Forest Service USDA, 2002: 96-102.
- [16] Jenkins J C, Chojnacky D C, Heath L S, Birdsey R A. National-scale biomass estimators for United States tree species. *Forest Science*, 2003, 49(1): 12-35.
- [17] Snorrason A, Einarsson S F. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Sciences*, 2006, 19: 15-24.
- [18] Vallet P, Dhôte J F, Le Moguédec G, Ravart M, Pignard G. Development of total aboveground volume equations for seven important forest tree species in France. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229(1/3): 98-110.
- [19] Repola J, Ojansuu R, Kukkola M. Biomass functions for Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. *Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 53. 2007, http://www.metla.fi/julkaisut/working_papers/2007/mwp053.htm.
- [20] Návar J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forests of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257(2): 427-434.
- [21] Muukkonen P. Generalized allometric volume and biomass equations for some tree species in Europe. *European Journal of Forest Research*, 2007, 126(2): 157-166.
- [22] Case B S, Hall R J. Assessing prediction errors of generalized tree biomass and volume equations for the boreal forest region of west-central Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 2008, 38(4): 878-889.
- [23] He D B, Luo Q B, Zeng W S. Study on linear simultaneous model of tree biomass. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 1998, 15(3): 298-303.
- [24] Zeng W S, Luo Q B, He D B. Study on compatible nonlinear tree biomass models. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(4): 19-24.
- [25] Luo Q B, Zeng W S, He D B, Bao T H, Lin W R. Establishment and application of compatible tree above-ground biomass models. *Journal of Natural Resources*, 1999, 14(3): 271-277.
- [26] Xu H. A biomass model compatible with volume. *Journal of Beijing Forestry University*, 1999, 21(5): 32-36.
- [27] Tang S Z, Zhang H R, Xu H. Study on establish and estimate method of compatible biomass model. *Scientia Silvae Sinicae*, 2000, 36(Special 1): 19-27.
- [28] Cheng T R, Feng J, Ma Q Y, Feng Z K. Linear models with compatibility of stand biomass based on the forest resource inventory data. *Journal of Beijing Forestry University*, 2007, 29(5): 110-113.
- [29] Chen L B. *Study on Biomass and Carbon Storage of Different Poplar Agroforestry Patterns*. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2008.
- [30] 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.
- [31] IPCC. Good practice guidance for land use, land-use change and forestry. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>, 2003.

- [32] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventory. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp>, 2006.
- [33] SAS Institute Inc. SAS/STAT user's guide, Version 8. Cary: SAS Institute Inc, 1999.
- [34] Tang S Z, Li Y. Statistical Foundation for Biomathematical Models. Beijing: Science Press, 2002.
- [35] Tang S Z, Lang K J, Li H K. Statistics and Computation of Biomathematical Models (ForStat Course). Beijing: Science Press, 2009.
- [36] Baskerville G L. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian Journal of Forest Research, 1972, 2(1): 49-53.
- [37] Flewelling J W, Pienaar L V. Multiplicative regression with lognormal errors. Forest Science, 1981, 27(2): 281-289.

参考文献:

- [6] 冯宗炜, 王效科, 吴刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力. 北京: 科学出版社, 1999.
- [7] 项文化, 田大伦, 闫文德. 森林生物量与生产力研究综述. 中南林业调查规划, 2003, 22(3): 57-60.
- [8] 薛立, 杨鹏. 森林生物量研究综述. 福建林学院学报, 2004, 24(3): 283-288.
- [9] 王仲峰, 冯仲科. 样地林木生物量精度评定的研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊2): 173-176.
- [23] 贺东北, 骆期邦, 曾伟生. 立木生物量线性联立模型研究. 浙江林学院学报, 1998, 15(3): 298-303.
- [24] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 兼容性立木生物量非线性模型研究. 生态学杂志, 1999, 18(4): 19-24.
- [25] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北, 包拓华, 林文瑞. 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.
- [26] 胥辉. 一种与材积相容的生物量模型. 北京林业大学学报, 1999, 21(5): 32-36.
- [27] 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(专刊1): 19-27.
- [28] 程堂仁, 冯菁, 马钦彦, 冯仲科. 基于森林资源清查资料的林分生物量相容性线性模型. 北京林业大学学报, 2007, 29(5): 110-113.
- [29] 陈乐蓓. 不同经营模式杨树人工林生态系统生物量与碳储量的研究. 南京: 南京林业大学, 2008.
- [30] 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.
- [34] 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.
- [35] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算 (ForStat 教程). 北京: 科学出版社, 2009.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 19 October, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Ecology research and its effects on social development in China	LI Wenhua (5421)
The current mission of ecology-advancing under the situation of chaos and innovation	JIANG Youxu (5429)
Resilience thinking: development of ecological concept	PENG Shaolin (5433)
A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China	LIU Shirong, WANG Hui, LUAN Junwei (5437)
Research on carbon budget and carbon cycle of terrestrial ecosystems in regional scale: a review	YU Guirui, FANG Huajun, FU Yuling, et al (5449)
Advances in the studying of the relationship between landscape pattern and river water quality at the watershed scale	LIU Lijuan, LI Xiaoyu, HE Xingyuan (5460)
Research on the protection of <i>Davidia involucrata</i> populations, a rare and endangered plant endemic to China	CHEN Yan, SU Zhixian (5466)
Progress on water resources input-output analysis	XIAO Qiang, HU Dan, GUO Zhen, et al (5475)
Research advances of contraception control of rodent pest in China ...	LIU Hanwu, WANG Rongxin, ZHANG Fengqin, et al (5484)
Response of vegetation to climate change and human activity based on NDVI in the Three-River Headwaters region	LI Huixia, LIU Guohua, FU Bojie (5495)
Remediation of blowout pits by clonal plants in Mu Us Sandland	YE Xuehua, DONG Ming (5505)
Precipitation trends during 1961—2010 in the Loess Plateau region of China	WANG Qixiang, FAN Xiaohui, WANG Mengben (5512)
An evaluation method for forest resources sustainability	CUI Guofa, XING Shaohua, JI Wenyuan, et al (5524)
Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of loess plateau in China: landscape-level and comparison at multiscale	WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5531)
The impacts of future climatic change on agricultures and eco-environment of Loess Plateau in next decade	E Youhao, SHI Qian, MA Yuping, et al (5542)
Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: standing stock value of biological resources	DU Guoying, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5553)
Valuation of ecological capital in Shandong coastal waters: provisioning service value	WANG Min, CHEN Shang, XIA Tao, et al (5561)
The dynamics of the structure and plant species diversity of evergreen broadleaved forests in Damingshan National Nature Reserve after a severe ice storm damage in 2008, China	ZHU Hongguang, LI Yanqun, WEN Yuanguang, et al (5571)
Interactive effects of low phosphorus and drought stress on dry matter accumulation and phosphorus efficiency of soybean plants	QIAO Zhenjiang, CAI Kunzheng, LUO Shiming (5578)
The eco-efficiency evaluation of the model city for environmental protection in China	YIN Ke, WANG Rusong, YAO Liang, et al (5588)
Pollution footprint and its application in regional water pollution pressure assessment: a case study of Huzhou City in the upstream of Taihu Lake Watershed	JIAO Wenjun, MIN Qingwen, CHENG Shengkui, et al (5599)
Ecological effect of green space of Shanghai in different spatial scales in past 20 years	LING Huanran, WANG Wei, FAN Zhengqiu, et al (5607)
Assessing indicators of eco-mobility in the scale of urban communities ...	DAI Xin, ZHOU Chuanbin, WANG Rusong, et al (5616)
Spatial structure of urban ecological land and its dynamic development of ecosystem services: a case study in Changzhou City, China	LI Feng, YE Yaping, SONG Bowen, et al (5623)
The carbon emissions embodied in Chinese household consumption by the driving factors	YAO Liang, LIU Jingru, WANG Rusong (5632)
The research on eco-efficiency and carbon reduction of recycling coal mining solid wastes: a case study of Huabei City, China	ZHANG Haitao, WANG Rusong, HU Dan, et al (5638)
Effects of urban shading on photosynthesis of <i>Euonymus japonicas</i>	YU Yingying, HU Dan, GUO Erhui, et al (5646)

Ecological view of traditional rural settlements: a case study in Yonghan of Guangdong Province	JIANG Xueting, YAN Lijiao, HOU Deqian (5654)
The altitudinal pattern of insect species richness in the Three Gorge Reservoir Region of the Yangtze River: effects of land cover, climate and sampling effort	LIU Ye, SHEN Zehao (5663)
Spatial-temporal patterns of fishing grounds and resource of Chilean jack mackerel (<i>Trachurus murphyi</i>) in the Southeast Pacific Ocean	HUA Chengjun, ZHANG Heng, FAN Wei (5676)
Impacts of <i>Ambrosia artemisiifolia</i> invasion on community structure of soil meso- and micro- fauna	XIE Junfang, QUAN Guoming, ZHANG Jiaen, et al (5682)
Appearance in spring and disappearance in autumn of <i>Bemisia tabaci</i> in China	CHEN Chunli, ZHI Junrui, GE Feng, et al (5691)
Water use strategies of <i>Malus toringoides</i> and its accompanying plant species <i>Berberis aemulans</i>	XU Qing, WANG Haiying, LIU Shirong (5702)
Analysis of vertical profiles of soil CO ₂ efflux in Chinese fir plantation	WANG Chao, HUANG Qunbin, YANG Zhijie, et al (5711)
Eco-toxicological effects of four herbicides on typical aquatic snail <i>Pomacea canaliculata</i> and <i>Crown conchs</i>	ZHAO Lan, LUO Shiming, LI Huashou, et al (5720)
Effects of short-term cold-air outbreak on soil respiration and its components of subtropical urban green spaces	LI Xibo, ZENG Wenjing, LI Jinqian, et al (5728)
Effects of landscape pattern on watershed soil erosion and sediment delivery in hilly and gully region of the Loess Plateau of China: patch class-level	WANG Jiping, YANG Lei, WEI Wei, et al (5739)
Partitioning and mapping the sources of variations in the ensemble forecasting of species distribution under climate change: a case study of <i>Pinus tabulaeformis</i>	ZHANG Lei, LIU Shirong, SUN Pengsen, et al (5749)
Relationship between masson pine tree-ring width and NDVI in North Subtropical Region	WANG Ruili, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (5762)
Effects of species composition on canopy rainfall storage capacity in an alpine meadow, China	YU Kailiang, CHEN Ning, YU Sisheng, et al (5771)
Dynamics of soil water conservation during the degradation process of the Zoigê Alpine Wetland	XIONG Yuanqing, WU Pengfei, ZHANG Hongzhi, et al (5780)
Soil urease activity during different vegetation successions in karst peak-cluster depression area of northwest Guangxi, China	LIU Shujuan, ZHANG Wei, WANG Kelin, et al (5789)
Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic Masson pine using mixed model	FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng (5797)
Influence of fire on a <i>Pinus massoniana</i> soil in a karst mountain area at the center of Guizhou Province, China	ZHANG Xi, ZHU Jun, CUI Yingchun, et al (5809)
The growth and distrubution of <i>Platyclusus orientalis</i> Seed-base seedling root in different culture periods	YANG Xitian, DONG Nalin, YAN Dongfeng, et al (5818)
Effects of complex pollution of CTAB and Cd ²⁺ on the growth of Chinese sweetgum seedlings	ZHANG Qin, XUE Jianhui, LIU Chenggang (5824)
The influence of volatiles of three invasive plants on the roots of upland rice seedlings	ZHANG Fengjuan, XU Xingyou, GUO Aiying, et al (5832)
Age structure and regeneration strategy of the dominant species in a <i>Castanopsis carlesii</i> - <i>Schima superba</i> forest	SONG Kun, SUN Wen, DA Liangjun (5839)
A study on application of hepatic microsomal CYP1A biomarkers from <i>Sebastiscus marmoratus</i> to monitoring oil pollution in Xiamen waters	ZHANG Yusheng, ZHENG Ronghui, CHEN Qingfu (5851)
The method of measuring energy flow ϕ and p in ecological networks by input-output flow analysis	LI Zhongcai, XI Xudong, GAO Qin, et al (5860)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

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 31 卷 第 19 期 (2011 年 10 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 19 2011

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	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
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 70.00 元