

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第3期 Vol.32 No.3 2012

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 (SHENTAI XUEBAO)

第32卷 第3期 2012年2月 (半月刊)

目 次

夏季可可西里雌性藏原羚行为时间分配及活动节律	连新明, 李晓晓, 颜培实, 等	(663)
热带印度洋黄鳍金枪鱼渔场时空分布与温跃层的关系	杨胜龙, 张禹, 张衡, 等	(671)
洪湖水体藻类藻相特征及其对生境的响应	卢碧林, 严平川, 田小海, 等	(680)
广西西端海岸四种红树植物天然种群生境高程	刘亮, 范航清, 李春干	(690)
高浓度 CO ₂ 引起的海水酸化对小珊瑚藻光合作用和钙化作用的影响	徐智广, 李美真, 霍传林, 等	(699)
盖度与冠层水深对沉水植物水盾草光谱特性的影响	邹维娜, 袁琳, 张利权, 等	(706)
基于 C-Plan 规划软件的生物多样性就地保护优先区规划——以中国东北地区为例	.....	.....
.....	栾晓峰, 孙工棋, 曲艺	(715)
城市化对本土植物多样性的影响——以廊坊市为例	彭羽, 刘雪华, 薛达元, 等	(723)
利用红外相机调查北京松山国家级自然保护区的野生动物物种	刘芳, 李迪强, 吴记贵	(730)
基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型	李海奎, 宁金魁	(740)
千岛湖社鼠种群遗传现状及与生境面积的关系	刘军, 鲍毅新, 张旭, 等	(758)
气候变化对内蒙古草原典型植物物候的影响	顾润源, 周伟灿, 白美兰, 等	(767)
中国西北典型冰川区大气氮素沉降量的估算——以天山乌鲁木齐河源 1 号冰川为例	.....	.....
.....	王圣杰, 张明军, 王飞腾, 等	(777)
植被类型对盐沼湿地空气生境节肢动物功能群的影响	童春富	(786)
黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征	邢丹, 刘鸿雁, 于萍萍, 等	(796)
云南中南部季风常绿阔叶林恢复生态系统萌生特征	苏建荣, 刘万德, 张志钧, 等	(805)
筑坝扩容下高原湿地拉市海植物群落分布格局及其变化	肖德荣, 袁华, 田昆, 等	(815)
三峡库区马尾松根系生物量的空间分布	程瑞梅, 王瑞丽, 肖文发, 等	(823)
兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差异	.....	.....
.....	王洪岩, 王文杰, 邱岭, 等	(833)
内蒙古放牧草地土壤碳固持速率和潜力	何念鹏, 韩兴国, 于贵瑞	(844)
不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系	葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等	(852)
不同丛枝菌根真菌侵染对土壤结构的影响	彭思利, 申鸿, 张宇亭, 等	(863)
不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程	刘目兴, 聂艳, 于婧	(871)
不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间	田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等	(879)
外源铅、铜胁迫对不同基因型谷子幼苗生理生态特性的影响	肖志华, 张义贤, 张喜文, 等	(889)
温度和盐度对吉富品系尼罗罗非鱼幼鱼 $\text{Na}^+ \text{-K}^+$ -ATPase 活力的联合效应	.....	.....
.....	王海贞, 王辉, 强俊, 等	(898)
基于元胞自动机的喀斯特石漠化格局模拟研究	王晓学, 李叙勇, 吴秀芹	(907)
边缘细胞对荞麦根尖铝毒的防护效应和对细胞壁多糖的影响	蔡妙珍, 王宁, 王志颖, 等	(915)
川中丘陵区人工柏木防护林适宜林分结构及水文效应	龚固堂, 黎燕琼, 朱志芳, 等	(923)
基于 AHP 与 Rough Set 的农业节水技术综合评价	翟治芬, 王兰英, 孙敏章, 等	(931)
基于 DMSP/OLS 影像的我国主要城市群空间扩张特征分析	王翠平, 王豪伟, 李春明, 等	(942)
生态旅游资源非使用价值评估——以达赉湖自然保护区为例	王朋薇, 贾竞波	(955)
专论与综述	.....	.....
基于有害干扰的森林生态系统健康评价指标体系的构建	袁菲, 张星耀, 梁军	(964)
硅对植物抗虫性的影响及其机制	韩永强, 魏春光, 侯茂林	(974)
研究简报	.....	.....
光照条件、植株冠层结构和枝条寿命的关系——以桂花和水杉为例	占峰, 杨冬梅	(984)
Bt 玉米秸秆还田对小麦幼苗生长发育的影响	陈小文, 祁鑫, 王海永, 等	(993)
汶川大地震灾后不同滑坡体上柏木体内非结构性碳水化合物的特性	陈博, 李志华, 何茜, 等	(999)
期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 37 * 2012-02	.....	.....



封面图说:难得的湿地乔木——池杉池杉为落叶乔木,高达 25 米,主干挺直,树冠尖塔。树干基部膨大,常有屈膝状吐吸根,池杉为速生树,强阳性,耐寒性较强,耐干旱,更极耐水淹,多植于湖泊周围及河流两岸,是能在水里生长的极少数的大乔木之一,故有湿地乔木之称。池杉原产美国弗吉尼亚沼泽地,中国于本世纪初引种到江苏等地,之后大量引种南方各省,尤其是长江南北水网地区作为重要造树和园林树种而大量栽种。

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

DOI: 10.5846/stxb201106300978

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.

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.

基于树木起源、立地分级和龄组的单木生物量模型

李海奎^{1,*}, 宁金魁²

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 江西农业大学园林与艺术学院, 南昌, 330045)

摘要:以马尾松(*Pinus massoniana*)和落叶松(*Larix*)的大样本实测资料为建模样本,以独立抽取的样本为验证样本,把样本按起源、立地和龄组进行分级,采用与材积相容的两种相对生长方程,分普通最小二乘和两种加权最小二乘,对地上部分总生物量、地上各部分生物量和地下生物量进行模型拟合和验证,使用决定系数、均方根误差、总相对误差和估计精度等8项统计量对结果进行分析。结果表明:两个树种地上部分总生物量,立地分类方法,模型的拟合结果和适用性都最优;马尾松 VAR 模型较优,而落叶松 CAR 模型较好;两种加权最小二乘方法,在建模样本和验证样本中表现得不一致。在建模样本中,加权回归 2(权重函数 $1/f^{0.5}$)略优于加权回归 1(权重函数 $1/y^{0.5}$),但在验证样本中,加权回归 1 却明显优于加权回归 2。而同时满足建模样本拟合结果最优和验证样本检验结果最优的组合中,只有加权回归 1。两个树种地上部分各分量生物量,模型拟合结果和适用性,均为干材最优,树叶最差、树枝和树皮居中,样本分类、模型类型和加权最小二乘方法对干材生物量的影响,规律和地上部分总生物量相同;样本分类、模型类型和加权最小二乘方法的最优组合,用验证样本检验的结果,总相对误差树枝不超过 $\pm 10.0\%$,树皮不超过 $\pm 5.0\%$,树叶马尾松不超过 $\pm 30.0\%$,落叶松不超过 $\pm 20.0\%$ 。两个树种地下部分(根)生物量,样本按龄组分类方法,模型拟合结果最优,与材积相容的模型总体上优于与地上部分总生物量相容模型。

关键词:生物量模型; 立地分级; 龄组; 加权最小二乘; 地上部分生物量; 地下部分生物量

Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups

LI Haikui^{1,*}, NING Jinkui²

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

2 College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

Abstract: Individual tree biomass models were developed by tree origin, site classes and age groups of *Pinus massoniana* and *Larix*. Model validation was implemented using independent data. Two allometric equations, which were compatible to stem volume, were fitted by ordinary least square and two methods of weighted least square. Models for above-ground biomass, its component biomass and below-ground biomass were analyzed and evaluated through several important statistics such as coefficient of determination, root mean square error, total relative error and estimation accuracy. The results showed that above-ground biomass models of *Pinus massoniana* and *Larix* were best for fitted results and validated results by classified sites. Variable allometric ratio models is better for *Pinus massoniana*, while constant allometric ratio model is better for *Larix*. Two methods of weighted least square showed different performance for model calibration and validation. Weighted regression No. 2 model (weighted function $1/f^{0.5}$) was better for calibration data than Weighted regression No. 1 model (weighted function $1/y^{0.5}$), however, the latter was better for validation sample than the former. The No. 1 model presented best results for both construction and verification sample compared with ordinary least square.

Models of components of above-ground biomass of *Pinus massoniana* and *Larix* gave same performance order on fitted and validated results, with best estimation for stem biomass, worst for leaf biomass and moderate for branch or bark

基金项目:国家自然科学基金资助(31070485)

收稿日期:2011-06-29; 修订日期:2011-11-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hk_li@163.com

biomass. Effects of sample classification method, two allometric equations and methods of weighted least square on stem biomass were same as that of above-ground biomass. With best combination of sample classification, allometric equations and methods of weighted least square, the total relative errors of biomass models were less than $\pm 10.0\%$ for branches, $\pm 5.0\%$ for barks and $\pm 30.0\%$ and $\pm 20.0\%$ for leaves of *Pinus massoniana* and *Larix*, respectively.

Comparing with base models, below-ground biomass models of *Pinus massoniana* and *Larix* by classified age groups, which were compatible to above-ground biomass and stem volume, respectively, had significantly improved on coefficient of determination and estimation accuracy, especially, the models for *Larix* raised more than 6% in coefficient of determination, more than 3% in estimation accuracy. In general, the model compatible to stem volume was better than the model compatible to above-ground biomass. The test results by above-ground biomass and stem volume of large sample data confirmed the same regular pattern.

Key Words: biomass model; site classification; age groups; weighted least square; above-ground biomass; below-ground biomass

在全球气候变化的背景下,精准估算森林生物量和碳储量,对于计量森林增汇能力,明确森林在全球碳循环中的作用和贡献,具有重要的意义,而分树种的单木生物量模型是估算森林生物量的基础。从 20 世纪 60—70 年代的国际生物学计划(International Biological Program;IBP)开始,国外根据地面观测和调查数据,建立了许多树种(组)的单木生物量模型^[1-7],既有地上部分生物量模型^[8-9],更多的是地上部分各分量生物量模型^[10-20],也有相当部分地下部分(根)生物量模型^[21-26];我国没有参加 IBP,从 20 世纪 70 年代末,才陆续有学者开始生物量模型方面的研究^[27-29]。目前为止,虽然建立了一些主要树种的单木生物量模型^[30-39],但和国外生物量模型研究相比,主要存在建模样本量少、抽样样本分布范围不广、人工林模型多而天然林模型少等缺陷,结果造成虽然建模样本的拟合效果很好,而实际使用时模型的适应性很差,无法满足要求。在基于森林资源连续清查资料进行中国森林植被生物量和碳储量评估时,就遇到了这样的问题,例如:在同一省份进行估算时,采用同样的模型,马尾松不同样本,差别可达 65%^[40]。从 2009 年开始的第八次全国森林资源连续清查,在国家层面上开展了生物量建模方面的工作,从建模样本的地理分布、数量、外业数据的实际采集,到建模方法的研究,以期建立区域或国家尺度上的分树种的通用立木生物量模型。

本文从建立全国性的单株立木生物量模型的需求出发,以南方马尾松和东北落叶松为例,对样本采用不分类、按起源分类等 4 种分类方法,采用与材积相容的两种模型,使用普通回归和两种加权回归方式,对地上部分总生物量、地上部分各组成部分生物量和地下部分(生物量)的最优模型和建模方法进行研究,并使用和建模样本独立的验证样本对模型进行验证,为建立分树种的全国性通用立木模型提供模型和方法的技术支撑。

1 数据与方法

1.1 数据

建模样本数据来自第八次全国森林资源连续清查生物量调查外业数据,分马尾松和落叶松两个树种,各 150 株,共计 300 株。建模样本按典型抽样方法抽取,按径阶均匀分布,天然林和人工林的比例均为 50%。全部样本均分树干、树皮、树枝和树叶四部分测定地上部分生物量,1/3 的样本测定地下部分(根)生物量。马尾松建模样本分布于安徽、广东、广西、江苏、江西、浙江、湖南、福建和贵州等 9 个省区(亚热带);落叶松建模样本分布于内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁等 4 个省区,表 1 是两个树种的建模样本统计量。

验证样本数据来自于 20 世纪 90 年代唐守正课题组“二元立木生物量模型及相容的一元自适应模型系列研究”的基础数据。验证样本按随机方法抽取,均为人工林,其中落叶松 99 株,采样地点在吉林省;马尾松 51 株,采样地点在江西省。所有样本均分树干、树皮、树枝和树叶 4 部分测定地上部分生物量,地下部分生物量没有测定,表 2 是两个树种的验证样本统计量。

表1 生物量建模样本统计量

Table 1 Sample statistics for constructing biomass model

树种 Species	变量 Variable	样本数 N	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	极差 Extreme difference
马尾松 <i>Pinus</i>	胸径 D/cm	150	16.57	12.11	1.50	47.20	45.70
	树高 H/m	150	11.96	7.20	2.00	27.60	25.60
<i>massoniana</i>	材积 V/dm ³	150	301.59	418.76	0.53	1825.45	1824.92
	树皮 Bark/kg	150	10.86	14.43	0.04	61.89	61.85
	树枝 Branch/kg	150	30.72	47.60	0.04	273.45	273.41
	树叶 Leaf/kg	150	7.72	10.23	0.02	70.20	70.18
	树干 Stem/kg	150	119.80	168.92	0.17	675.01	674.85
	地上部分 Above	150	169.10	233.74	0.32	1039.14	1038.83
	根 Root	54	41.86	65.73	0.04	285.01	284.97
落叶松 <i>Larix</i>	胸径 D/cm	150	16.60	11.92	1.60	44.10	42.50
	树高 H/m	150	12.90	7.03	2.50	28.20	25.70
	材积 V/dm ³	150	320.84	432.55	0.72	1928.26	1927.55
	树皮 Bark/kg	150	13.80	16.61	0.07	74.46	74.40
	树枝 Branch/kg	150	32.49	44.58	0.16	205.53	205.37
	树叶 Leaf/kg	150	6.29	7.43	0.05	38.33	38.28
	树干 Stem/kg	150	124.46	170.41	0.22	863.55	863.33
	地上部分 Above	150	177.04	234.02	0.61	1160.74	1160.13
	根 Root	50	62.82	88.26	0.10	346.30	346.20

表2 生物量验证样本统计量

Table 2 Sample statistics for validation biomass model

树种 Species	变量 Variable	样本数 N	平均值 Mean	标准差 SD	最小值 Min	最大值 Max	极差 Extreme difference
马尾松 <i>Pinus</i>	胸径 D/cm	51	15.73	8.07	4.80	47.60	42.80
	树高 H/m	51	13.04	3.43	7.23	24.70	17.47
<i>massoniana</i>	材积 V/dm ³	51	179.52	266.15	8.11	1746.23	1738.12
	树皮 Bark/kg	51	7.30	8.71	0.45	56.69	56.25
	树枝 Branch/kg	51	21.33	35.19	0.59	219.06	218.47
	树叶 Leaf/kg	51	4.44	4.92	0.20	20.76	20.56
	树干 Stem/kg	51	71.91	113.49	2.80	744.42	741.62
	地上部分 Above	51	104.97	161.11	4.17	1040.94	1036.77
落叶松 <i>Larix</i>	胸径 D/cm	99	14.21	7.85	2.80	33.60	30.80
	树高 H/m	99	15.08	7.24	2.55	26.40	23.85
	材积 V/dm ³	99	217.87	243.83	1.10	1009.40	1008.30
	树皮 Bark/kg	99	9.75	11.92	0.08	50.33	50.25
	树枝 Branch/kg	99	14.71	18.49	0.26	106.98	106.72
	树叶 Leaf/kg	99	3.03	2.91	0.04	12.53	12.49
	树干 Stem/kg	99	84.67	95.57	0.42	416.35	415.93
	地上部分 Above	99	112.17	125.53	0.96	560.09	559.13

1.2 方法

1.2.1 样本分类

建模样本分树种按起源分为天然林和人工林;对于立地分级,按第7次全国森林资源连续清查的树高测定资料确定,具体方法参见文献^[40],马尾松和落叶松两个树种均分为9个等级,由于每个树种样本数量都是150个,平均到每个等级的样本数量较少,所以按有序样本分类的原则,把1—5级归为一类,6—9级归为一

类。对于龄组划分,使用同样的原则,把幼龄林和中龄林划为一类,近熟林、成熟林和过熟林归为一类。表3是建模样本和验证样本的分类情况。

表3 建模样本和验证样本按起源、立地和龄组分类表

Table 3 Table of classified results by origin, site and age groups on samples for constructing model and validating model

树种 Species	样本类型 Type	起源 Origin	样本数量 N	立地分类 Site class			龄组分类 Age groups	
				I	II	R ²	I	II
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	SCM	NF	77	35	42	0.9939	53	24
	SCM	PF	73	37	36	0.9939	47	26
	SVM	PF	51	16	35	0.9815	32	19
落叶松 <i>Larix</i>	SCM	NF	76	34	42	0.9922	60	16
	SCM	PF	74	37	37	0.9943	51	23
	SVM	PF	99	26	73	0.9883	57	42

SCM sample for constructing model 建模样本; SVM sample for validating model 验证样本; NF natural forest 天然林; PF plantation forest 人工林

1.2.2 生物量模型

地上部分生物量模型使用与材积相容的生物量模型,具体的模型如下:

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + \varepsilon_1 \\ \text{Above} = b_0 d^{b_1} h^{b_2} V + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + \varepsilon_1 \\ \text{Bark} = b_0 V + \varepsilon_2 \\ \text{Branch} = \frac{c_0 dV}{h} + \varepsilon_3 \\ \text{Leaf} = \frac{d_0 dV^{a_1}}{h} + \varepsilon_4 \\ \text{Stem} = e_0 V + \varepsilon_5 \end{cases} \quad (2)$$

式中, d 、 h 分别是胸径和树高, V 、Bark、Branch、Leaf、Stem 和 Above 分别是树干材积、树皮生物量、树枝生物量、树叶生物量、干材生物量和地上部分生物量, ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 和 ε_5 是误差项; a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 c_0 、 d_0 、 d_1 和 e_0 等是待求参数。

式(1)式(2)是非线性度量误差联立方程组。式(1)是地上部分生物量模型,式(2)是地上部分各个分量的生物量模型,它们和地上部分生物量存在线性关系,即地上部分生物量等于干材生物量、树皮生物量、树枝生物量和树叶生物量之和,所以估计了各个分量的生物量,就可获得地上部分生物量。联立方程组打破了单个模型区分自变量和因变量的假设条件,取而代之为解释变量(外生变量)和被解释变量(内生变量)^[41-42],式(1)式(2)中,V、Bark、Branch、Leaf、Stem 和 Above 是被解释变量, d 、 h 是解释变量。之所以没有选择冠幅、冠长等因子作为解释变量,一是因为相对于树高和胸径,它们的测定更不准确,二是样本分类后每个类型的样本数量有限,增加变量后会增加参数个数,降低模型的自由度。式(1)和式(2)中各个分量生物量方程综合考虑参数的稳定性,按照单个方程采用双重筛选逐步回归的方法确定。

式(1)(2)中的材积模型是 CAR (constant allometric ratio) 模型,而材积模型的精度对与材积相容的生物量模型的精度有着直接的影响^[43-45],扩展材积模型为 VAR (variable allometric ratio) 模型,式(1)式(2)变为式(3)式(4):

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} e^{a_3 dh} + \varepsilon_1 \\ \text{Above} = b_0 d^{b_1} h^{b_2} V + \varepsilon_2 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} e^{a_3 dh} + \varepsilon_1 \\ \text{Bark} = b_0 V + \varepsilon_2 \\ \text{Branch} = \frac{c_0 dV}{h} + \varepsilon_3 \\ \text{Leaf} = \frac{d_0 dV^{d_1}}{h} + \varepsilon_4 \\ \text{Stem} = e_0 V + \varepsilon_5 \end{cases} \quad (4)$$

由于建模样本分布的广泛性,样本间存在异方差^[46-47]。除了使用普通最小二乘法拟合两类生物量模型(CAR模型和VAR模型)外,还使用加权最小二乘拟合模型,其中权重函数为 $1/\sqrt{f(x)}$ 、 $1/\sqrt{y}$, $f(x)$ 为模型本身, y 为内生变量(材积或生物量)的实测值。

地下部分(根)生物量由于样本获得较为困难,模型通常是用根茎比方程,当地上部分生物量采用与材积相容的模型时,地下部分生物量模型为:

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + \varepsilon_1 \\ \text{Above} = b_0 d^{b_1} h^{b_2} V + \varepsilon_2 \\ \text{Root} = c_0 d^{c_1} \text{Above} + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (5)$$

式中, d 、 h 分别是胸径和树高, V 、Above和Root分别是树干材积、地上部分生物量和地下部分生物量(根), ε_1 、 ε_2 和 ε_3 是误差项; a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 c_0 、 c_1 等是待求参数。

根据误差传递的原理,式(5)中地上部分生物量的估计误差会影响根的生物量,为此,式(5)简化为式(6),并对两个模型的进行对比分析:

$$\begin{cases} V = a_0 d^{a_1} h^{a_2} + \varepsilon_1 \\ \text{Root} = c_0 d^{c_1} V + \varepsilon_3 \end{cases} \quad (6)$$

1.2.3 模型的评价和验证

使用决定系数(R^2)、均方根误差(RSME, root mean square error)、平均误差(ME, mean error)、平均绝对误差(MAE, mean absolute error)、总相对误差(TRE, Total-relative-error)、平均相对误差(MRE, mean relative error)、平均相对误差绝对值(MARE, mean absolute relative error)和估计精度(EA, Estimation accuracy)等8项统计指标对模型进行评价,使用验证样本对拟合模型的适用性进行验证和分析:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (7)$$

$$\text{RSME} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-1}} \quad (8)$$

$$\text{ME} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (9)$$

$$\text{MAE} = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (10)$$

$$\text{TRE} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{\sum_{i=1}^n \hat{y}_i} \times 100 \quad (11)$$

$$\text{MRE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)}{\hat{y}_i} \times 100 \quad (12)$$

$$\text{MARE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{\hat{y}_i} \times 100 \quad (13)$$

$$\text{EA} = 1 - \frac{t_a}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n(n-p)}}} \quad (14)$$

式中, y_i 为实际观测值, \hat{y}_i 为模型估计值, \bar{y} 为样本平均值, n 为样本数, p 为参数个数, 待求参数。 t_a 为置信水平 a 时的 t 值。

对地上部分总生物量采用决定系数(R^2)、均方根误差(RSME)、平均误差(ME)等8项统计指标对模型拟合结果进行评价,采用决定系数(R^2)、均方根误差(RSME)、平均误差(ME)和总相对误差(TRE)对模型适用性进行分析和验证;对地上部分生物量各分量使用决定系数(R^2)、均方根误差(RSME)、总相对误差(TRE)和估计精度(EA)等4项指标进行模型拟合结果进行评价,使用决定系数(R^2)和总相对误差(TRE)对模型适用性进行分析和验证;地下部分生物量由于样本量较小,且没有验证样本,使用式(5)和式(6)进行拟合模型后,用大样本(地上部分生物量建模样本)拟合的材积和地上部分总生物作为自变量,用拟合的模型对建模样本进行验证,采用(R^2)、均方根误差(RSME)和估计精度(EA)等3项统计指标分析模型的稳定性和可靠性。

采用 F 统计检验来确定模型间是否存在显著性差异:

$$F = \frac{(SSE_2 - SSE_1) / (df_2 - df_1)}{SSE_1 / df_1} \quad (15)$$

式中, SSE_1 、 SSE_2 分别为模型 1 和模型 2 残差平方和, df_1 、 df_2 为分别为模型 1 和模型 2 自由度。

2 结果与分析

2.1 地上部分生物量

2.1.1 地上部分总生物量

两个树种、不同分类方法地上部分总生物量模型的拟合结果见表 4。

(1) 样本分类对模型拟合结果的影响

从表 4 中可以发现:当模型采用式(1)时,马尾松的拟合结果中,决定系数、均方根误差,3 种权重函数的 4 类样本分类方法,表现出明显的规律,即立地优于龄组、龄组优于起源、起源优于基本;精度由于不同分类方法,模型的参数个数不同,造成结果略有差异,但也基本上是立地分级的结果最好。其余 5 项统计量中,平均绝对误差变化不大;平均相对误差和平均相对误差绝对值除普通回归变动幅度较大外,两种加权回归虽然有所差别,但四种样本分类方法之间差别不大,且没有明显的规律性;平均误差,普通回归 4 种样本分类结果均在 ± 1.5 之间,加权回归方法 1(权重函数 $1/y^{0.5}$)均在 ± 5.0 附近,加权回归方法 2(权重函数 $1/f^{0.5}$)基本为 0;总相对误差,普通回归在 $\pm 1.0\%$ 之间,加权回归方法 1 均在 $\pm 3.5\%$ 附近,加权回归方法 2 基本为 0%。

当模型采用式(1)时,落叶松的拟合结果中,决定系数、均方根误差和估计精度,表现出明显的规律,即龄组优于立地、立地优于起源、起源优于基本,和马尾松略有不同;平均绝对误差和平均相对误差绝对值,3 种权重函数的 4 类样本分类方法的结果都相差不大;平均相对误差也基本上在 10% 之内;总相对误差和平均误差的规律也和马尾松类似。

当模型采用式(2)—(4)时,马尾松和落叶松 8 个统计指标都和相应树种采用式(1)结果相似。

(2) 不同模型拟合结果

比较表 4 中马尾松式(1)和式(2)3 种权重函数 4 种样本分类方法相对应的结果,可以发现:除了两种加权回归方法平均相对误差和平均相对误差绝对值式(2)优于式(1),其余指标基本上都是值式(1)优于

表4 马尾松、落叶松不同模型、不同分类方法地上部分总生物量模型拟合结果(部分)

Table 4 Fitted results of above-ground biomass models for *Pinus massoniana* and *Larix* by different model and classification method (part)

树种 Species	模型 Model	权重函数 Weighted functions	分类方法 Classification	统计量 Statistics							
				R ²	RSME	ME	MAE	TRE	MRE		
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	式(1)	1	基本(不分类)	0.9670	42.45	-0.10	20.63	-0.06	0.25	15.85	0.9588
			起源	0.9672	42.32	-1.35	22.02	-0.79	1.50	20.04	0.9580
			立地	0.9720	39.14	0.35	21.47	0.21	22.23	40.15	0.9593
		1/y ^{0.5}	龄组	0.9688	41.28	-0.48	21.06	-0.28	7.96	23.82	0.9572
			基本(不分类)	0.9645	44.06	5.39	21.75	3.30	16.20	26.03	0.9572
			起源	0.9654	43.46	5.32	21.71	3.25	17.82	27.09	0.9554
	式(2)	1/f ^{0.5}	立地	0.9687	41.36	5.05	21.28	3.08	18.13	27.94	0.9587
			龄组	0.9669	42.51	4.99	20.61	3.04	13.49	24.07	0.9558
			基本(不分类)	0.9657	43.30	0.00	21.53	0.00	8.44	22.25	0.9580
		1/y ^{0.5}	起源	0.9667	42.65	0.00	21.42	0.00	9.41	22.90	0.9577
			立地	0.9691	41.09	0.05	20.98	0.03	5.08	20.33	0.9573
			龄组	0.9680	41.82	0.00	20.53	0.00	3.89	19.40	0.9566
落叶松 <i>Larix</i>	式(3)	1	基本(不分类)	0.9653	43.53	0.16	21.59	0.10	-0.89	16.38	0.9574
			起源	0.9666	42.69	0.90	21.99	0.54	8.84	22.52	0.9570
			立地	0.9681	41.72	2.78	21.23	1.67	25.69	36.46	0.9552
		1/y ^{0.5}	龄组	0.9661	43.04	1.56	21.17	0.93	11.03	21.03	0.9538
			基本(不分类)	0.9550	49.60	14.63	23.85	9.47	23.12	29.33	0.9515
			起源	0.9628	45.07	8.44	22.25	5.25	13.69	23.35	0.9546
	式(4)	1/f ^{0.5}	立地	0.9634	44.70	8.04	21.65	4.99	15.21	23.85	0.9520
			龄组	0.9658	43.21	4.95	21.19	3.01	8.54	19.13	0.9536
			基本(不分类)	0.9653	43.54	0.14	21.40	0.08	2.45	18.08	0.9574
		1/y ^{0.5}	起源	0.9656	43.34	0.12	21.59	0.07	3.05	18.52	0.9564
			立地	0.9657	43.30	0.28	21.27	0.16	2.11	18.15	0.9564
			龄组	0.9664	42.82	0.03	20.87	0.02	1.64	17.69	0.9540
落叶松 <i>Larix</i>	式(3)	1	基本(不分类)	0.9692	41.10	-1.02	19.24	-0.57	-4.01	16.41	0.9618
			起源	0.9696	40.78	-0.08	19.55	-0.04	10.72	30.31	0.9611
			立地	0.9742	37.62	0.52	17.48	0.29	53.21	66.38	0.9620
		1/y ^{0.5}	龄组	0.9742	37.60	0.63	19.05	0.36	30.37	39.13	0.9621
			基本(不分类)	0.9687	41.40	3.73	18.81	2.15	8.87	18.83	0.9615
			起源	0.9694	40.94	3.63	18.55	2.10	8.75	18.67	0.9609
	式(4)	1/f ^{0.5}	立地	0.9726	38.74	3.29	17.47	1.89	14.59	23.46	0.9609
			龄组	0.9731	38.36	3.32	18.10	1.91	12.09	21.51	0.9613
			基本(不分类)	0.9691	41.17	-0.01	18.50	-0.01	4.76	17.53	0.9617
		1/y ^{0.5}	起源	0.9698	40.68	-0.07	18.36	-0.04	3.65	16.94	0.9612
			立地	0.9727	38.69	-0.03	17.44	-0.02	5.04	17.49	0.9610
			龄组	0.9736	38.01	-0.02	18.24	-0.01	5.14	17.97	0.9616
落叶松 <i>Larix</i>	式(3)	1	基本(不分类)	0.9664	42.87	3.77	19.83	2.18	16.42	23.08	0.9598
			起源	0.9659	43.23	4.02	20.23	2.33	22.72	30.40	0.9581
			立地	0.9689	41.28	3.38	19.47	1.95	44.71	53.83	0.9569
		1/y ^{0.5}	龄组	0.9682	41.73	4.44	19.95	2.57	49.93	53.82	0.9564
			基本(不分类)	0.9558	49.18	18.75	25.86	11.84	43.42	44.86	0.9539
			起源	0.9487	53.02	19.61	26.33	12.46	36.77	39.11	0.9486
	式(4)	1/f ^{0.5}	立地	0.9678	41.97	1.25	19.22	0.71	19.53	26.37	0.9562
			龄组	0.9603	46.64	10.86	21.78	6.54	33.37	36.47	0.9513
			基本(不分类)	0.9660	43.17	-0.10	18.72	-0.05	15.78	22.89	0.9595
		1/y ^{0.5}	起源	0.9662	43.00	-0.18	19.36	-0.10	13.03	20.87	0.9583
			立地	0.9676	42.11	-0.09	19.16	-0.05	10.92	20.40	0.9560
			龄组	0.9635	44.73	-0.05	20.13	-0.03	20.19	26.67	0.9533

权重函数为1代表普通最小二乘,权重函数1/y^{0.5}中为内生变量(材积或生物量)的实测值,权重函数1/f^{0.5}中f为模型本身

式(2),但差别不大,例如:决定系数、精度最大不超过0.01;比较表4中马尾松式(3)和式(4)3种权重函数4种样本分类方法相对应的结果,和式(1)和式(2)有相似的结果,这说明对马尾松来讲,无论是材积是CAR模

型还是 VAR 模型,地上部分总量与分量相容的模型,和直接估计地上部分总量的模型比,并没有太多的降低模型的精度。

比较表 4 中马尾松式(1)和式(3)3 种权重函数 4 种样本分类方法相对应的结果,可以发现:平均误差、平均绝对误差、总相对误差、平均相对误差和平均相对误差绝对值互有优劣,但决定系数、均方根误差和精度,基本上是式(3)优于式(1),但差别不大,例如:决定系数、精度最大不超过 0.5 个百分点;比较表 4 中马尾松式(2)和式(4),可以发现:对于普通最小二乘,式(4)的决定系数、精度和均方根误差优于式(2),其余指标,虽然互有优劣,但基本上式(4)的 4 种样本分类方法变化幅度较小,更为稳定。两种加权回归方法,则没有显示出明显的规律。这说明 VAR 模型在总体上优于 CAR 模型。

对于落叶松,地上部分总量与分量相容的模型,和直接估计地上部分总量的模型比,决定系数和精度,都有所降低,但降低的幅度不大,总体趋势和马尾松相似;但 CAR 模型在总体上优于 VAR 模型,这一点和马尾松正好相反。

(3) 最优模型选择

以式(1)、权重函数为 1(普通最小二乘)、分类方法为基本(不分类)的模型为基础,以决定系数、均方根误差和精度为主要指标,并辅助考虑总相对误差等 5 个指标,从马尾松和落叶松各 48 个组合的模型中选择最优的 12 个模型(均优于基础模型,如果优于基础模型的组合个数少于 12 个,则只选择到最后一个优于基础模型的组合),结果见表 5。

表 5 马尾松、落叶松最优的 12 个模型

Table 5 Twelve models with accurate fitted results for *Pinus massoniana* and *Larix*

序号 No.	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>			落叶松 <i>Larix</i>		
	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification
1	式(3)	1	立地	式(1)	1	龄组
2	式(1)	1	立地	式(3)	1	龄组
3	式(3)	$1/f^{0.5}$	立地	式(3)	1	立地
4	式(3)	$1/y^{0.5}$	立地	式(1)	1	立地
5	式(3)	1	龄组	式(1)	$1/f^{0.5}$	龄组
6	式(1)	$1/y^{0.5}$	立地	式(1)	$1/y^{0.5}$	龄组
7	式(3)	1	起源	式(3)	$1/f^{0.5}$	龄组
8	式(3)	$1/f^{0.5}$	龄组	式(3)	$1/y^{0.5}$	龄组
9	式(1)	$1/f^{0.5}$	立地	式(1)	$1/f^{0.5}$	立地
10	式(1)	1	龄组	式(3)	$1/f^{0.5}$	立地
11	式(3)	1	基本	式(3)	$1/y^{0.5}$	立地
12				式(1)	$1/y^{0.5}$	立地

F 检验显示:马尾松的 11 个最优模型和落叶松的 12 个最优模型和它们的基础模型比较均不存在显著性差异。

(4) 模型验证

使用验证样本,对马尾松和落叶松 4 种模型、3 种权重函数、4 种样本分类方法的 48 组合进行验证,结果见表 6。

从表 6 中,可以发现:样本分类在其他条件相同的情况下,马尾松、落叶松,决定系数和均方差误差皆为立地或龄组分类的方法最优,总相对误差立地或龄级分类的方法也均为最小或不超过 $\pm 5.0\%$,平均误差也有相同的规律;不同权重函数,均是加权回归优于普通回归,而加权回归方法中,加权回归 1(权重函数 $1/y^{0.5}$) 优于加权回归 2(权重函数 $1/f^{0.5}$),这和建模样本完全不同,而且 4 种统计指标均呈现出相同的规律;模型之间的关系,马尾松均为 VAR 模型优于 CAR 模型,和建模样本相同,而落叶松则两种模型各有优劣,和建模样本略

有不同,但两者差别非常小。

表6 马尾松、落叶松不同模型、不同分类方法地上部分总生物量模型验证结果(部分)

Table 6 Validated results of above-ground biomass models for *Pinus massoniana* and *Larix* by different model and classification method (part)

模型 Model	权重函 Weighted functions	分类方法 Classification	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>				落叶松 <i>Larix</i>			
			R ²	RSME	ME	TRE	R ²	RSME	ME	TRE
式(1) Equation(1)	1/y ^{0.5}	基本(不分类)	0.9760	24.95	-10.22	-8.87	0.9860	14.84	-6.07	-5.14
		起源	0.9729	26.53	-9.09	-7.97	0.9882	13.64	-0.91	-0.80
		立地	0.9758	25.05	-11.21	-9.65	0.9884	13.54	-1.46	-1.29
		龄组	0.9796	23.01	-8.16	-7.21	0.9873	14.17	-2.28	-1.99
	1/f ^{0.5}	基本(不分类)	0.9806	22.42	-3.26	-3.01	0.9876	13.96	-4.07	-3.50
		起源	0.9797	22.93	-1.17	-1.11	0.9878	13.84	-0.93	-0.83
		立地	0.9788	23.45	-2.47	-2.30	0.9886	13.41	-2.01	-1.76
		龄组	0.9843	20.18	-3.16	-2.92	0.9882	13.66	-0.81	-0.72
	1/f ^{0.5}	基本(不分类)	0.9772	24.34	-7.69	-6.82	0.9876	13.96	-4.07	-3.50
		起源	0.9768	24.52	-5.78	-5.22	0.9878	13.84	-0.93	-0.83
		立地	0.9783	23.73	-5.03	-4.58	0.9880	13.76	-3.34	-2.89
		龄组	0.9830	21.01	-6.25	-5.62	0.9880	13.74	-1.91	-1.67
式(2) Equation(2)	1/y ^{0.5}	基本(不分类)	0.9766	24.64	-6.93	-6.19	0.9801	17.73	-8.96	-7.40
		起源	0.9764	24.77	-8.73	-7.68	0.9881	13.69	-3.00	-2.61
		立地	0.9849	19.83	0.29	0.28	0.9890	13.19	-2.07	-1.81
		龄组	0.9809	22.26	-6.41	-5.76	0.9880	13.74	-2.94	-2.55
	1/f ^{0.5}	基本(不分类)	0.9813	22.05	3.61	3.56	0.9862	14.76	3.99	3.69
		起源	0.9806	22.46	3.72	3.67	0.9890	13.20	0.78	0.70
		立地	0.9807	22.38	5.31	5.32	0.9889	13.20	-0.29	-0.26
		龄组	0.9847	19.93	3.79	3.74	0.9888	13.26	-1.74	-1.52
	1/f ^{0.5}	基本(不分类)	0.9775	24.15	-7.22	-6.43	0.9827	16.49	-7.69	-6.42
		起源	0.9800	22.76	-5.02	-4.56	0.9877	13.90	-2.79	-2.42
		立地	0.9820	21.63	-1.35	-1.27	0.9837	16.02	3.31	3.05
		龄组	0.9843	20.16	-4.15	-3.81	0.9879	13.78	-1.81	-1.59

权重函数为1代表普通最小二乘,权重函数 $1/y^{0.5}$ 中为内生变量(材积或生物量)的实测值,权重函数 $1/f^{0.5}$ 中 f 为模型本身

总体上讲,用建模样本建立的模型,在用验证模型进行检验时,落叶松、马尾松的决定系数优于模型。和最优模型选择相同,以式(1)、权重函数为1(普通最小二乘)、分类方法为基本(不分类)的模型为基础,以决定系数、均方根误差和总相对误差为主要指标,从马尾松和落叶松各48个组合的验证结果中选择最优的12个,用F检验确定其与基础模型的差异显著性,结果见表7。马尾松和落叶松同时满足拟合模型最优和验证结果最优的模型见表8。

表7 马尾松、落叶松验证模型结果最优的12个模型

Table 7 Twelve models with accurate estimation for *Pinus massoniana* and *Larix*

序号 No.	模型 Model	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>			落叶松 <i>Larix</i>			
		权重函数 Weighted functions	分类方法 Classification	差异显著性 Sig.	模型 Model	权重函数 Weighted functions	分类方法 classification	差异显著性 Sig.
1	式(3)	1/y ^{0.5}	立地	* *	式(2)	1/y ^{0.5}	起源	* *
2	式(3)	1	立地	* *	式(4)	1/y ^{0.5}	起源	* *
3	式(1)	1/y ^{0.5}	龄组	* *	式(2)	1	立地	* *
4	式(4)	1	立地		式(1)	1/y ^{0.5}	立地	* *
5	式(4)	1	基本	* *	式(3)	1/y ^{0.5}	基本	* *
6	式(2)	1	立地		式(2)	1/y ^{0.5}	龄组	*
7	式(3)	1/y ^{0.5}	起源		式(2)	1/y ^{0.5}	立地	* *
8	式(2)	1/y ^{0.5}	龄组		式(3)	1	起源	* *
9	式(4)	1	起源	* *	式(3)	1/y ^{0.5}	起源	* *
10	式(3)	1/f ^{0.5}	立地		式(1)	1	立地	* *
11	式(2)	1/f ^{0.5}	龄组		式(3)	1/y ^{0.5}	立地	*
12	式(1)	1/f ^{0.5}	龄组	*	式(2)	1	起源	* *

* * 表示在置信水平0.05上与基础模型差异显著,* 表示在置信水平0.10上与基础模型差异显著

表8 同时满足拟合模型最优和验证结果最优的模型

Table 8 The models with best fitted results for construction data and accurate estimation for validation data

树种 Specie	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	验证排序 Order for validation	差异显著性 Sig.	>R ²	建模排序 Order for construction
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	式(3)	$1/\gamma^{0.5}$	立地	1	* *	1.02	4
	式(3)	1	立地	2	* *	0.96	1
	式(3)	$1/f^{0.5}$	立地	10		0.72	3
落叶松 <i>Larix</i>	式(1)	$1/\gamma^{0.5}$	立地	4	* *	0.26	12
	式(1)	1	立地	10	* *	0.24	4
	式(3)	$1/\gamma^{0.5}$	立地	11	*	0.24	11

* * 表示在置信水平 0.05 上与基础模型差异显著, * 表示在置信水平 0.10 上与基础模型差异显著; 验证排序是指模型在 12 个最优验证结果中的排序, 建模排序时指使用的模型在 12 个最优拟合模型中的排序, >R² 表示验证结果比基础模型验证结果提高的决定系数百分点。

表 8 显示: 立地分类可以显著提高模型的精度和适用性; 加权回归方法 1 也可以提高模型的精度, 而加权回归方法 2 并不能显著提高模型的精度; 对于马尾松 VAR 模型较优, 而对落叶松 CAR 模型较好。

2.1.2 地上部分各组成部分生物量

表 9 是马尾松不同模型、不同分类方法地上部分各分量生物量模型拟合结果。

从表 9 中, 可以发现: 对于马尾松, 决定系数和均方根误差, 按起源、立地和龄组的分类, 无论是干材、树枝、树叶还是树皮, 在其他条件(模型和权重函数)相同的情况下, 拟合结果均优于没有分类的, 且最优的结果多集中于立地或龄组的方法; 总相对误差, 也是分类的结果多优于未分类的结果; 估计精度, 干材分类的方法略低于未分类的方法, 但最大的降低程度仅为 0.5 个百分点, 树皮、树枝和树叶, 分类的方法和未分类的方法, 精度高低各有不同, 但分类精度高于未分类的多在加权回归 1(权重函数 $1/\gamma^{0.5}$) 中。对于落叶松, 决定系数和均方根误差, 树枝和树叶, 在其他条件(模型和权重函数)相同的情况下, 分类的拟合结果均优于没有分类的, 且最优结果多集中于立地或龄组的方法, 但干材和树皮, 按龄组分类的方法均优于未分类的方法, 按起源分类的方法均不如未分类的方法, 按立地分类的方法和未分类的方法互有优劣, 但精度高于未分类的, 多在加权回归 1(权重函数 $1/\gamma^{0.5}$) 方法中。

表 9 显示: 马尾松树皮、树枝和树叶的生物量, 决定系数、均方根误差和精度, CAR 模型(式(2))的拟合结果均优于 VAR 模型(式(4)), 总相对误差则互有优劣; 干材生物量, 决定系数、均方根误差和精度在普通回归、加权回归 1(权重函数 $1/\gamma^{0.5}$) 的立地或龄组分类的情况下, VAR 模型的拟合结果优于 CAR 模型, 这和地上部分总生物量模型一样, 在其余情况下, CAR 模型优于 VAR 模型, 总相对误差则互有优劣, 但差别不大。对落叶松, 无论是树皮、树枝, 还是树枝、干材的生物量, 决定系数、均方根误差和精度, CAR 模型的拟合结果均优于 VAR 模型, 总相对误差则互有优劣, 但相差不大。

由表 9 也可见: 马尾松和落叶松, 树皮、树枝、树叶和干材, 在其余条件相同的情况下, 基本上都是普通回归优于加权回归, 而加权回归的两种方法中, 均为加权回归 2 优于加权回归 1。这和建模样本地上部分总生物量的规律相同。

由于树皮、树枝, 树枝和干材等生物量是在模型系中联合估计的, 且各部分在地上部分总生物量中的比例不同, 总的来讲, 干材比重最大, 估计的决定系数和精度也最高, 树叶比重最小, 估计的决定系数和精度也最低, 树枝的生物量一般大于树皮的生物量, 估计的决定系数和精度, 确是树皮略高于树枝, 同时不同的分类方法, 在树皮、树枝, 树枝和干材等 4 部分生物量的拟合结果, 优劣顺序各有不同, 很难发现其规律, 所以地上部分生物量总量为主要依据, 同时兼顾各个分量的生物量, 以不分类、普通回归的 CAR 模型(式(2))为基础, 在 24 个组合中, 选择 10 个(如果优于基础模型的组合个数少于 10 个, 则只选择到最后一个优于基础模型的组合)最优的组合, 结果见表 10。

表 9 马尾松不同模型 不同分类方法地上部分各分量生物模型拟合结果

Table 9 The fitted results of models for components of above-ground biomass for *Pinus massoniana* by different model and classification method

模型 Model	权重函数 Weighted	分类方法 Classification	树皮 Bark			树枝 Branch			树叶 Leaf			干材 Bole		
			R ²	TRE	EA	R^{2}	TRE	EA	R^{2}	TRE	EA	R^{2}	TRE	EA
Equation (2)	1	基本	0.9148	4.56	0.9359	0.8771	2.49	0.9102	0.6019	-2.40	0.8617	0.9541	-0.72	0.9501
		起源	0.9245	5.18	0.9378	0.8828	1.87	0.9097	0.6348	-0.63	0.8636	0.9554	-0.12	0.9493
		立地	0.9247	6.10	0.9338	0.8789	3.14	0.9020	0.6153	-1.49	0.8506	0.9620	1.13	0.9500
	1/ $\gamma^{0.5}$	龄组	0.9255	4.08	0.9341	0.8818	0.78	0.9032	0.6334	-1.04	0.8541	0.9554	0.83	0.9459
		基本	0.9045	10.96	0.9321	0.8411	23.20	0.8979	0.4985	47.53	0.8448	0.9505	4.62	0.9481
		起源	0.9205	-0.03	0.9362	0.8768	4.68	0.9074	0.5407	34.93	0.8470	0.9504	4.42	0.9465
	1/ $\gamma^{0.5}$	立地	0.9330	-0.06	0.9375	0.8778	5.32	0.9016	0.5452	33.51	0.8375	0.9541	3.96	0.9451
		龄组	0.9238	-0.06	0.9334	0.8797	0.55	0.9023	0.6321	-0.26	0.8539	0.9548	4.18	0.9455
		基本	0.9106	-0.01	0.9343	0.8762	0.03	0.9099	0.5966	1.31	0.8608	0.9542	0.02	0.9501
Equation (4)	1	起源	0.9219	0.03	0.9368	0.8771	0.06	0.9075	0.6018	1.62	0.8575	0.9542	-0.02	0.9486
		立地	0.9320	-1.41	0.9410	0.8737	-1.57	0.9062	0.6074	0.43	0.8585	0.9544	0.75	0.9487
		龄组	0.9224	-0.09	0.9327	0.8818	-0.11	0.9032	0.6302	0.24	0.8535	0.9557	0.05	0.9461
	1/ $\gamma^{0.5}$	基本	0.9134	5.76	0.9351	0.8729	3.64	0.9083	0.6010	-1.23	0.8610	0.9572	0.30	0.9516
		起源	0.9222	6.26	0.9364	0.8763	4.33	0.9065	0.6089	-1.38	0.8577	0.9568	0.67	0.9497
		立地	0.9233	5.49	0.9320	0.8813	2.82	0.9013	0.6108	-1.28	0.8470	0.9637	0.53	0.9503
	1/ $\gamma^{0.5}$	龄组	0.9242	4.31	0.9324	0.8772	1.11	0.8996	0.6320	-0.11	0.8513	0.9598	0.93	0.9477
		基本	0.9044	10.88	0.9318	0.8421	23.01	0.8979	0.4991	47.35	0.8443	0.9499	4.67	0.9477
		起源	0.9172	-0.07	0.9344	0.8803	4.54	0.9080	0.5403	34.88	0.8457	0.9484	4.54	0.9450
	1	立地	0.9275	-0.23	0.9339	0.8763	2.09	0.8993	0.5977	4.32	0.8445	0.9594	1.18	0.9474
		龄组	0.9228	3.24	0.9317	0.8692	7.73	0.8964	0.5488	32.57	0.8353	0.9573	3.76	0.9461
		基本	0.9074	-0.89	0.9329	0.8767	-1.00	0.9097	0.5960	1.08	0.8602	0.9520	0.66	0.9487
1/ $\gamma^{0.5}$	起源	0.9173	-1.07	0.9344	0.8785	-1.20	0.9073	0.6009	1.35	0.8563	0.9515	0.73	0.9467	
	立地	0.9180	-0.71	0.9296	0.8792	-0.48	0.9004	0.6292	0.16	0.8507	0.9526	0.41	0.9433	
	龄组	0.9224	-0.09	0.9316	0.8818	-0.11	0.9015	0.6302	0.24	0.8509	0.9557	0.05	0.9451	

表 10 马尾松、落叶松建模样本拟合结果最优的 10 个模型

Table 10 Ten models with best fitted results for *Pinus massoniana* and *Larix*

序号 No.	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>			落叶松 <i>Larix</i>		
	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	模型 model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification
1	式(4)	1	立地	式(2)	1	龄组
2	式(4)	1	龄组	式(4)	1	立地
3	式(2)	1	立地	式(2)	1	立地
4	式(4)	$1/y^{0.5}$	立地	式(4)	1	龄组
5	式(4)	1	起源	式(2)	$1/y^{0.5}$	立地
6	式(2)	1	起源	式(4)	$1/y^{0.5}$	立地
7	式(4)	1	基本	式(2)	$1/f^{0.5}$	立地
8	式(4)	$1/f^{0.5}$	龄组	式(4)	$1/f^{0.5}$	立地
9	式(2)	$1/f^{0.5}$	龄组	式(2)	$1/f^{0.5}$	起源
10	式(2)	1	龄组			

F 检验显示:除了马尾松第 7 个最优模型(不分类、普通回归的 VAR 模型)外,其余 9 个最优模型和落叶松的 9 个最优模型和它们的基础模型比较均不存在显著性差异。

使用验证样本,对马尾松和落叶松两种模型、3 种权重函数、4 种样本分类方法的 24 组合进行验证,结果见表 11。

从表 11 中可以发现:总体上讲,落叶松马尾松都呈现出了建模样本相同的规律,干材的决定系数最高,树叶的最低,树皮和树枝处于中间,但马尾松和落叶松的顺序略有不同。具体到各个组成部分,对于马尾松干材,按立地或龄组分类的方法,决定系数和总相对误差,均优于未分类的方法,按起源分类的方法则不一定优于未分类的;在其他条件相同的情况下,基本上 VAR 模型(式(4))在两个指标方面都优于 CAR 模型(式(2));按立地分类的情况下,普通回归决定系数最优,加权回归 1 在总相对误差方面最优,在其他分类的情况下,加权回归 1(权重函数 $1/y^{0.5}$),在两个指标方面均最优,这和验证样本地上总生物量的规律相同。对比建模样本(表 9),可以看到验证样本的决定系数优于建模样本,总相对误差验证样本大于建模样本,但分类后明显降低,最优的几个组合均不大于 $\pm 5\%$ 。对于落叶松干材,基本规律和马尾松相似,效果比马尾松更好:验证样本的决定系数优于建模样本,总相对误差分类最优的几个组合均不大于 $\pm 2\%$ 。

对于马尾松树枝生物量,样本分类的结果对决定系数等 4 项指标的影响没有明显的规律;在其他条件相同的情况下,总体上 CAR 模型(式(2))在决定系数、均方根误差和精度 3 个指标方面都优于 VAR 模型(式(4)),而总相对误差则不一定;普通回归在决定系数、均方根误差和精度 3 个指标方面优于加权回归,而总相对误差上优于加权回归 1(权重函数 $1/y^{0.5}$),而不如加权回归 2(权重函数 $1/f^{0.5}$),这一点和地上部分生物量总量不同。对比建模样本(表 9),可以看到:验证样本的决定系数都优于建模样本,从 1 个百分点到 5 个百分点不等,验证样本变化幅度较大,但精度验证样本均小于建模样本,且变化幅度较大,从 3 个百分点到将近 12 个百分点不等,但最优的几个组合,验证样本和建模样本精度差别却不超过 5 个百分点,总相对误差,验证样本和建模样本的差别较大。对于落叶松树枝生物量,样本分类对决定系数等 4 项指标的影响没有明显的规律;在其他条件相同的情况下,总体上 VAR 模型(式(4))和 CAR 模型(式(2))在决定系数等 4 个指标方面优劣互现,没有明显的规律;除了不分类的方法外,决定系数等 4 项指标基本上都是加权回归 1 优于加权回归 2,加权回归 2 优于普通回归。对比建模样本(表 9),可以看到:验证样本和建模样本的决定系数和精度,优劣互现,验证模型优于建模样本的主要出现在未分类的方法或加权回归 1,精度变化幅度远远小于决定系数,总相对误差,基本上是加权回归 1,验证样本优于建模样本,普通回归和加权回归 2,建模样本优于验证样本。类似地,可以对马尾松和落叶松树皮生物量、树枝生物量和树叶生物量验证结果进行相应的分析。

表 11 落叶松不同模型、不同分类方法地上部分各分量生物模型验证结果

Table 11 The validated results of models for components of above-ground biomass for *Larix* by different model and classification method

模型 Model	权重函数 Weighted	分类方法 Classification	统计量 Statistics					
			树皮 Bark		树枝 Branch		树叶 Leaf	
			R ²	TRE	R ²	TRE	R ²	TRE
Equation (2)	式(2) $1/y^{0.5}$	基本	0.7706	4.10	0.8821	-0.42	0.6992	-18.52
		起源	0.7484	9.21	0.8069	-17.30	0.6022	-18.70
		立地	0.7628	2.68	0.8004	-17.71	0.2717	-29.37
		龄组	0.7465	7.69	0.8036	-16.62	0.5742	-22.14
		基本	0.7452	15.89	0.8177	29.76	0.7551	25.46
	$1/f^{0.5}$	起源	0.7552	5.76	0.8754	-6.66	0.7128	-0.54
		立地	0.7650	-0.71	0.8893	0.32	0.4803	-25.11
		龄组	0.7563	4.02	0.8603	-9.60	0.6169	-18.80
		基本	0.7660	-2.45	0.8650	-8.84	0.6793	-15.78
		起源	0.7539	-0.91	0.8010	-17.38	0.5627	-20.27
Equation (4)	式(4) $1/y^{0.5}$	立地	0.7245	10.06	0.8758	-8.84	0.6417	-17.89
		龄组	0.7505	2.94	0.8269	-15.53	0.5545	-21.00
		基本	0.7703	4.08	0.8823	-0.41	0.7004	-18.54
		起源	0.7526	9.16	0.7944	-17.38	0.5762	-19.61
		立地	0.7050	18.95	0.8557	-11.13	0.6453	-17.23
	$1/f^{0.5}$	龄组	0.7522	7.11	0.7917	-17.20	0.5525	-22.95
		基本	0.7451	15.92	0.8175	29.80	0.7550	25.50
		起源	0.7550	5.80	0.8755	-6.65	0.7129	-0.51
		立地	0.7297	9.60	0.8718	-9.27	0.6743	-15.02
		龄组	0.7585	2.96	0.8579	-10.37	0.6109	-19.41
	式(4) $1/y^{0.5}$	基本	0.7665	-2.21	0.8667	-8.62	0.6806	-15.68
		起源	0.7528	-1.31	0.7974	-17.82	0.5622	-20.07
		立地	0.7246	9.93	0.8750	-8.96	0.6410	-17.79
		龄组	0.7495	2.57	0.8258	-15.98	0.5568	-20.96
		基本	0.7711	4.08	0.8823	-0.41	0.7004	-18.54

由于样本分类、模型类型和回归方式对地上各部分的生物量影响的方式并不一致,马尾松和落叶松的规律并不完全相同,和建模样本相似,以地上部分生物量总量为主要依据,同时兼顾各个分量的生物量,以不分类、普通回归的 CAR 模型(式(2))为基础,在 24 个组合中,选择 10 个(如果优于基础模型的组合个数少于 10 个,则只选择到最后一个优于基础模型的组合)最优的组合,结果见表 12。

表 12 马尾松、落叶松验证样本结果最优的 10 个模型

Table 12 Ten models with accurate estimation for *Pinus massoniana* and *Larix*

序号 No.	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>				落叶松 <i>Larix</i>		
	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	
1	式(4)	1	立地	式(2)	1	立地	
2	式(2)	1	立地	式(2)	$1/y^{0.5}$	起源	
3	式(2)	$1/y^{0.5}$	龄组	式(2)	$1/y^{0.5}$	立地	
4	式(2)	$1/f^{0.5}$	龄组	式(4)	$1/y^{0.5}$	起源	
5	式(4)	1	龄组	式(2)	$1/y^{0.5}$	龄组	
6	式(4)	1	起源	式(4)	$1/y^{0.5}$	龄组	
7	式(4)	1	基本	式(2)	1	起源	
8	式(2)	$1/f^{0.5}$	立地	式(2)	1	龄组	
9	式(2)	$1/y^{0.5}$	基本	式(2)	$1/f^{0.5}$	龄组	
10	式(4)	$1/y^{0.5}$	基本	式(4)	$1/f^{0.5}$	起源	

考虑表 10, 获得同时满足建模样本拟合最优和验证结果最优的组合(表 13), 并和基础模型进行 F 检验, 比较差异显著性。

表 13 同时满足拟合模型最优和验证结果最优的模型

Table 13 The models with best fitted results for construction data and accurate estimation for validation data

树种 Species	模型 Model	权重函数 Weighted function	分类方法 Classification	验证排序 Order for validation	差异显著性 Sig.	$>R^2$	建模排序 Order for construction
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	式(4)	1	立地	1	*	0.96	1
	式(2)	1	立地	2	*	0.89	3
	式(2)	$1/y^{0.5}$	龄组	4		0.83	9
	式(4)	1	龄组	5		0.81	2
	式(4)	1	起源	6	**	0.65	5
	式(4)	1	基本	7	**	0.65	7
	式(4)	1	立地	1	*	0.96	1
落叶松 <i>Larix</i>	式(2)	1	立地	1	**	0.89	3
	式(2)	$1/y^{0.5}$	立地	3	**	0.88	5
	式(2)	1	龄组	8	**	0.79	1

* * 表示在置信水平 0.05 上与基础模型差异显著, * 表示在置信水平 0.10 上与基础模型差异显著; 验证排序是指模型在 10 个最优验证结果中的排序, 建模排序时指使用的模型在 10 个最优拟合模型中的排序, $>R^2$ 表示验证结果比基础模型验证结果提高的决定系数百分点

表 13 显示: 对于马尾松, 立地分类可以提高决定系数, 同时可以增强适用性, 这和地上部分总生物量模型一致; VAR 模型优于 CAR 模型, 也和地上部分总生物量模型一致; 普通回归的方法最优。对于落叶松, 立地分类可以提高决定系数, 同时可以增强适用性, 也和地上部分总生物量模型一致; CAR 模型优于 VAR 模型, 也同落叶松地上部分总生物量模型相同; 和马尾松类似, 普通回归的方法最优, 但同总生物量模型略有不同。

在其他条件相同的情况下, 式(2)是式(1)细化和扩展(CAR 模型), 式(4)是式(3)细化和扩展(VAR 模型), 所以, 比较表 13 和表 8, 可以发现: 马尾松, 普通回归、样本立地分类的 VAR 模型, 同时满足在地上部分总生物量、地上部分各分量生物量的建模样本拟合结果、验证样本检验结果最优; 落叶松, 普通回归、样本立地分类的 CAR 模型, 同时满足在地上部分总生物量、地上部分各分量生物量的建模样本拟合结果、验证样本检验结果最优。

2.2 地下部分(根)生物量

马尾松、落叶松地下部分生物量拟合结果见表 14。

表 14 马尾松、落叶松不同分类方法地下部分(根)生物量模型拟合结果

Table 14 The fitted results of above-ground (root) biomass model for *Pinus massoniana* and *Larix* by different classification

树种 Species	分类方法 Classification	式(5) Equation (5)			式(6) Equation (6)		
		R^2	RSME	EA	R^2	RSME	EA
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	基本	0.9439	15.56	0.8919	0.9416	15.88	0.8932
	起源	0.9551	13.93	0.8947	0.9568	13.66	0.9041
	立地	0.9551	13.92	0.8918	0.9570	13.62	0.9008
	龄组	0.9592	13.28	0.8953	0.9612	12.94	0.9058
落叶松 <i>Larix</i>	基本	0.8692	31.92	0.8434	0.8689	31.96	0.8488
	起源	0.8989	28.06	0.8483	0.8974	28.28	0.8557
	立地	0.8983	28.14	0.8429	0.8960	28.47	0.8547
	龄组	0.9365	22.25	0.8758	0.9354	22.44	0.8855

表 14 显示: 无论马尾松还是落叶松, 与地上部分生物量相容的模型(式(5))还是仅与材积相容的模型(式(6)), 样本分类后的地下部分生物量拟合结果均优于未分类。3 种分类方法中, 以龄组最好, 对马尾松,

两种模型的决定系数分别提高 1.53 和 1.93 个百分点,精度也提高 0.35 和 1.26 个百分点;对落叶松,两种模型的决定系数分别提高 6.73 和 6.65 个百分点,精度提高 3.24 和 3.67 个百分点,效果更明显;起源分类方法,虽可提高决定系数和精度幅度不大;立地也可提高决定系数,但由于参数个数的增加,也可能降低模型的精度(减小的残差不足于抵消参数个数的增加的影响)。

进一步使用 F 检验发现:对于马尾松,式(5)的 4 种分类方法间不存在显著差异,式(6)起源和龄组与未分类之间在置信区间 0.05 水平上存在显著差异,立地与未分类在置信区间 0.10 水平上存在显著差异;对于落叶松,式(5)、式(6)起源、立地和龄组,都与未分类在置信区间 0.01 水平上存在显著差异。

两种模型之间差别不大。对马尾松未分类方法,式(5)决定系数优于式(6),但精度不如(6),但 3 种方法的分类后,式(6)的决定系数和精度都优于式(5)。

对落叶松,4 种分类方法的结果,都是决定系数,式(5)优于式(6),但精度式(6)优于式(5),但差别都不大,均不超过 1 个百分点。

表 15 是用大样本(150 个建模样本)预测的地上部分总生物量和材积,采用拟合的模型进行验证。从中可以发现:分类方法对决定系数和精度的影响和建模样本一样,但同样的条件下,无论是精度还是决定系数,都是式(6)优于式(5)。这可能是由材积估计地上部分总生物量,再由地上部分总生物量估计地下部分生物量过程的误差传递的结果。考虑到式(6)参数较少,可以认为式(6)优于式(5)。

表 15 马尾松、落叶松不同分类方法地下部分(根)生物量模型对比结果

Table 15 The comparison of above-ground (root) biomass model for *Pinus massoniana* and *Larix* by different classification

树种 Species	分类方法 Classification	式(5) Equation (5)			式(6) Equation (6)		
		R ²	RSME	EA	R ²	RSME	EA
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	基本	0.9377	16.41	0.8861	0.9374	16.44	0.8894
	起源	0.9339	16.91	0.8721	0.9494	14.78	0.8961
	立地	0.9299	17.40	0.8647	0.9518	14.43	0.8962
落叶松 <i>Larix</i>	龄组	0.9346	16.81	0.8693	0.9520	14.40	0.8952
	基本	0.8674	32.14	0.8442	0.8691	31.93	0.8507
	起源	0.8893	29.36	0.8412	0.8970	28.33	0.8610
	立地	0.8833	30.15	0.8394	0.8966	28.38	0.8571
	龄组	0.9116	26.25	0.8602	0.9250	24.17	0.8783

3 结论与讨论

3.1 结论

地上部分总生物量,样地立地分类方法,马尾松和落叶松,建模样本的拟合结果和验证样本的检验结果,都可以提高模型的精度和适用性,和基础模型相比,虽然建模样本间不存在显著性差异,但验证样本间都存在显著性差异;模型种类树种的影响,在马尾松和落叶松上的表现并不一致,马尾松 VAR 模型较优,而落叶松 CAR 模型较好;消除异方差的两种加权回归方法,在建模样本和验证样本中表现得不一致,在建模样本中,加权回归 2(权重函数 $1/f^{0.5}$)略优于加权回归 1(权重函数 $1/y^{0.5}$),但在验证样本中,加权回归 1 却明显优于加权回归 2,而同时满足建模样本拟合结果最优和验证样本检验结果最优的组合中,只有加权回归 1。

由于地上部分各分量生物量的估计是在联立方程组中联合估计的,样本分类、模型类型和回归方式对干材、树枝、树皮和树叶的影响规律并不一致。总体上讲,马尾松和落叶松,建模样本的拟合结果和验证样本的检验结果,决定系数和总相对误差,都是干材最高、树叶最低、树枝和树皮居中。马尾松和落叶松,样本分类、模型类型和回归方式对干材生物量的影响,同地上部分总生物量的规律相同;树枝、树皮和树叶,样本分类、模型类型和回归方式的最优组合,用验证样本检验的结果,总相对误差树枝不超过 $\pm 10.0\%$,树皮不超过 $\pm 5.0\%$,树叶马尾松不超过 $\pm 30.0\%$,落叶松不超过 $\pm 20.0\%$ 。

综合考虑地上部分总生物量、地上部分各分量生物量的建模样本拟合结果、验证样本检验结果,得出结

论:马尾松普通回归、样本立地分类的 VAR 模型和落叶松普通回归、样本立地分类的 CAR 模型效果最优。

地下部分(根)生物量,样本按龄组分类方法,马尾松和落叶松,与地上部分生物量相容的模型(式(5))和与材积相容的模型(式(6)),决定系数和精度,都显著高于基本模型,特别是落叶松,两种模型的决定系数都提高 6 个百分点以上,精度也提高 3 个百分点以上;与材积相容的模型(式(6))总体上优于与地上部分总生物量相容模型(式(5))。利用大样本估计的地上部分总生物量和材积进行模拟验证,也是相同的规律。

3.2 讨论

人工林和天然林都有其自身的生长规律,人工林生长速度快,但衰老得也快,天然林生长速度慢,但衰老得也慢,生长积累的树干材积在转换为干材生物量时,人工林的转换系数小于天然林;单木处于中幼林阶段和处于成过熟林阶段,在树干材积在转换为干材生物量时,几无差别;立地不同时,相同胸径的树木,立地条件好时,树干材积大,立地条件差时,树干材积小,但由材积转换为生物量时,立地条件好的转换系数较小,立地条件差的转换系数较大,天然林和人工林中的规律都是如此,然而立地条件造成的转换系数的差异,远不及材积的差异大,结果仍是生长在较好立地条件下树木的干材生物量大于生长在较差立地条件下树木的干材生物量。由于干材生物量在地上部分生物量中占的比例最大,所以地上部分总生物量也因立地产生差异。地下部分(根)生物量虽然是按龄组分类的方法,决定系数和精度最好,但按立地分类的方法也优于未分类的方法,马尾松和落叶松的决定系数分别比文献^[48](相同的数据,未分类的方法)提高 1.03 和 3.38 个百分点。

本文两个树种的建模样本和验证样本是独立抽取的,且在时间跨度上相差 10a 以上,由于树木的生物学特性在一定的时期内不可能发生根本性变化,所以认为用独立抽取的验证样本检验建模样本拟合的模型是合理的。由于建模样本是采用典型抽样的方式抽取的,所以没有使用刀切法进行建模样本的参数稳定性检验。目前,通过立地分级建立的单木生物量模型,在国内外均不多见^[11]。本文利用全国尺度上树高-胸径关系进行对建模样本和验证样本立地分级,把不同地区的样本统一到同一尺度上,产生了较好的结果:马尾松和落叶松,地上部分总生物量与地上部分各部分生物量,建模样本的模型拟合和验证样本的模型检验,立地分级的样本都同时满足最优的结果。为了保证样本分类后,每类都仍是大样本,本文把立地分为两类,随着样本数量大扩大,立地分为较多的等级后,结果可能会更好。

References:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Lambert M C, Ung C H, Raulier F. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 2005, 35(8): 1996-2018.
- [4] Cole T G, Ewel J J. Allometric equations for four valuable tropical tree species. *Forest Ecology and Management*, 2006, 229 (1/3): 351-360.
- [5] Banaticla M R N, Sales R F, Lasco R D. Biomass equations for tropical tree plantation species using secondary data for the Philippines. 2005. In: Harrison S R, Herbohn J L, Suh J, Mangaong E, Vanclay J. ACIAR smallholder forestry project-redevelopment of a timber industry following extensive land clearing: Proceeding from the End-of-Project workshop, Ormoc, the Philippines, 185-193.
- [6] Zabek L M, Prescott C E. Biomass equations and carbon content of above ground leafless biomass of hybrid poplar in Coastal British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 223 (1/3): 291-302.
- [7] Repola J, Ojansuu R, Kukkola Mikko. Biomass functions for scots pine, Norway spruce and birch in Finland. Working Papers of the Finnish Forest Research Institute, 2007. (<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp053.htm>).
- [8] Mikšys V, Varnagiryte-Kabasinskiene I, Stupak Inge, Armolaitis K, Kukkola M, Wójcik J. Above-ground biomass functions for Scots pine in Lithuania. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31 (10): 685-692.
- [9] Mani S, Parthasarathy N. Above-ground biomass estimation in ten tropical dry evergreen forest site of peninsular India. *Biomass and Bioenergy*, 2007, 31 (5): 284-290.
- [10] Muukkonen P, Lehtonen A. Needle and branch biomass turnover rates of Norway spruce (*Picea abies*). *Canadian Journal of Forest Research*,

- 2004, 34 (12) : 2517-2527.
- [11] Verónica G, Luis P P, Gerardo R. Allometric relations for biomass partitioning of *Nothofagus Antarctica* trees of different crown classes over a site quality gradient. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259 (6) : 1118-1126.
- [12] Porté A, Trichet P, Bert D, Loustau D. Allometric relationships for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster Ait.*). *Forest Ecology and Management*, 2002, (158) : 71-83.
- [13] Russell M B, Burkhardt H E, Amateis R L. Biomass partitioning in a miniature-scale loblolly pine spacing trial. *Canadian Journal of Forest Research*, 2009, 39 (12) : 320-329.
- [14] Brandeis T J, Delaney M, Parresol B R, Royer L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233 (1) : 133-142.
- [15] Tahvanainen T, Forss E. Individual tree models for the crown biomass distribution of Scots pine, Norway spruce and birch in Finland. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255 (3/4) : 455-467.
- [16] Gehring C, Park S, Denich M. Liana allometric biomass equations for Amazonian primary and secondary forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 195 (1/2) : 69-83.
- [17] Snorrason A, Einarsson S F. Single-tree biomass and stem volume functions for eleven tree species used in Icelandic forestry. *Icelandic Agricultural Science*, 2006, 19: 15-24.
- [18] Carvalho J P, Parresol B R. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd.). *Forest Ecology and Management*, 2003, 179 (1/3) : 269-276.
- [19] Salis S M, Assis M A, Mattos P P, Pião A C S. Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations. *Forest Ecology and Management*, 2006, 228 (1/3) : 61-68.
- [20] Návar J. Allometric equations for tree species and carbon stocks for forest of northwestern Mexico. *Forest Ecology and Management*, 2009, 257 (2) : 427-434.
- [21] Ribeiro S C, Fehrmann L, Soares C P B, Jacovine L A G, Kleinn C, Gaspar R O. Above- and belowground biomass in a Brazilian Cerrado. *Forest Ecology and Management*, 2011, 262 (3) : 491-499.
- [22] Xiao C W, Ceulemans R. Allometric relationships for below- and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management*, 2004, 203 (1/3) : 177-186.
- [23] Saint-André L, M'Bou A T, Mabiala A, Mouvondy W, Jourdan C, Rousard O, Deleporte P, Hamel O, Nouvellon Y. Age-related equations for above- and below-ground biomass of a *Eucalyptus* hybrid in Congo. *Forest Ecology and Management*, 2005, 205 (1/3) : 199-214.
- [24] Luo T, Brown S, Pan Y, Shi P, Ouyang H, Yu Z, Zhu H. Root biomass along subtropical to alpine gradients: global implication from Tibetan transect studies. *Forest Ecology and Management*, 2005, 206 (1/3) : 349-363.
- [25] Peichl M, Arain M A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253 (1/3) : 68-80.
- [26] Peri P L, Gargaglione V, Pastur G M. Dynamics of above- and below-ground biomass and nutrient accumulation in an age sequence of *Nothofagus Antarctica* forest of Southern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 2006, 233 (1) : 85-99.
- [27] Pang W S, Li L C, Gao Z H, Zhang X Q. Study on biomass and productivity in ecology system of China fir plantation. *Hunan Forestry Science and Technology*, 1978, (2) : 2-14.
- [28] Feng Z W, Zhang J W, Deng S J. Study on biomass production of China fir plantation//The comprehensive scientific expedition team of Chinese academy of science for agriculture modernization in Taoyuan county in Hunan province. The report set on comprehensive survey in Xiantao. Changsha: Hunan Science and Technology House. 1980;322-333.
- [29] Yu X T. Chian fir. Fuzhou: Fujian Science and Technology house. 1983; 55-58.
- [30] Chen Z S, Fang Q. A study on nutrient content and biomass of *Populus Bolleana*. *Forest Research*, 1988, 1 (5) : 535-540.
- [31] Dang C L, Wu Z L. Studies on the biomass of *Pinus Yunnanensis* forest. *Acta Botica Yunnaica*, 1991, 13 (1) : 59-64.
- [32] Wang C K. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 222 (1/3) , 9-16.
- [33] Feng Z W, Chen C Y, Zhang J W, Wang K P, Zhao J L, Gao H. Detemination of biomass of *Pinus Massonian* Stand in Huitong County, Hunan province. *Scientia Silvae Sincae*, 1982, 18(2) : 127-134.
- [34] Ma Q Y. A study on the biomass of Chinese pine forests. *Journal of Beijing Forestry Universty*, 1989, 11 (4) : 1-10.
- [35] Zhang B L. Study on biomass and Productivity of *Quercus lidotungensis* stands in ziwuling forest region of Shaanxi province. *Journal of Northwest Forestry University*, 1990, 5 (1) : 1-7.
- [36] Xu H Y, Zheng S K, Lu Y N. The biomass of (I-75/58) Poplar plantation. *Scientia Silvae Sincae*, 1990, 26 (1) : 22-29.

- [37] Xu H, Zhang H R. Study on biomass model of tree and stand. Kunming: Yunnan Science and Technology House, 2002: 116-150.
- [38] Luo Q B, Zeng W S, Hu D B, Bao T H, Lin W Z. Establishment and application of compatible tree above ground biomass models. Journal of Natural Resource, 1991, 14 (3) : 271-277.
- [39] Zeng W S, Xia Z S, Zhu S, Luo H Z. Estatblishment of tree volume and aboveground biomass equation for Masson pine plantation in Guizhou Province. Scientia Silvae Sincae, 2011, 47 (3) : 96-101.
- [40] Li H K, Lei Y C. Estimation and evalution of forest biomass carbon storage in China. Beijing: China Forestry Publishing House, 2010: 14-16, 21-23.
- [41] Tang S Z, Li Y. Statistics base of biomathematics model. Beijing: Science Press, 2002: 130-138.
- [42] Tang S Z, Lang K J, Li H K. Calculation for statistics and biomathematics model. Beijing: Science Press, 2009: 268-290.
- [43] Geron C D, Ruark G A. Comparison of constant and variable allometric ratio for predicting foliar biomass of various tree genera. Canadian Journal of Forest Research, 1988, 18 (10) : 1298-1304.
- [44] Xu H, Wang M L. Comparison of CAR and VAR Biomass Models. Forestry Studies in China, 2010, (1) : 32-36.
- [45] Ruark G A, Martin G L, Bockheim J G. Comparison of constant and variable allometric ratios for estimating Populus tremuloides biomass. Forest Science, 1987, 33 (2) : 294-300.
- [46] Zeng W S, Luo Q B, He D B. Research on weighting regression and modeling. Scientia Silvae Sincae, 1999, 35 (5) : 5-11.
- [47] Moreno E, Torres Francisco, Casella G. Testing equality of regression coefficients in heteroscedastic normal regression models. Journal of Statistical Planning and Inference, 2005, 131 (1) : 117-134.
- [48] Zeng W S, Tang S Z. Establishment of below-ground biomass equations for larch in northeastern and Masson pine in southern Chian. Journal of Beijing Forestry Universty, 2011, 33 (2) : 1-6.

参考文献:

- [27] 潘维伟, 李利村, 高正衡, 张相琼. 杉木人工林生态系统中的生物产量及其生产力的研究. 中南林业科技, 1978, (2) : 2-14.
- [28] 冯宗炜, 张家武, 邓仕坚. 杉木人工林生物产量的研究//中国科学院湖南省桃源农业现代化综合科学实验基地县考察队. 桃源综合考察报告集. 长沙:湖南科学技术出版社. 1980;322-333.
- [29] 俞新妥. 杉木. 福州:福建科学技术出版社. 1983: 55-58.
- [30] 陈章水, 方奇. 新疆杨元素含量与生物量研究. 林业科学研究, 1988, 1 (5) : 535-540.
- [31] 党承林, 吴兆录. 云南松林的生物量研究. 云南植物研究, 1991, 13 (1) : 59-64.
- [32] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 王开平, 赵吉录, 高虹. 湖南会同地区马尾松生物量的测定. 林业科学, 1982, 18(2) : 127-134.
- [33] 马钦彦. 中国油松生物量的研究. 北京林业大学学报, 1989, 11(4) : 1-10.
- [34] 张柏林. 子午岭地区辽东栎林生物生产量的研究. 西北林学院学报, 1990, 5 (1) : 1-7.
- [35] 徐鸿远, 郑世锴, 卢永农. I-72 杨人工林生物量的研究. 林业科学, 1990, 26 (1) : 22-29.
- [36] 胥辉, 张会儒. 林木生物量模型研究. 昆明:云南科技出版社, 2002: 116-150.
- [37] 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, 1991, 14 (3) : 271-277.
- [38] 曾伟生, 夏忠胜, 朱松, 罗洪章. 贵州省人工马尾松立木材积和地上生物量方程研建. 林业科学, 2011, 47 (3) : 96-101.
- [39] 李海奎, 雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估. 北京:中国林业出版社, 2010: 14-16,21-23.
- [40] 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: 130-138
- [41] 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: 268-290.
- [42] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 论加权回归与建模. 林业科学, 1999, 35(5) : 5-11.
- [43] 曾伟生, 唐守正. 东北落叶松和南方马尾松地下生物量模型研建. 北京林业大学学报, 2011, 33 (2) : 1-6.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 3 February, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

Behavioural time budgets and diurnal rhythms of the female Tibetan gazelles in the Kekexili National Nature Reserve	LIAN Ximming, LI Xiaoxiao, YAN Peishi, et al (663)
The relationship between the temporal-spatial distribution of fishing ground of yellowfin tuna (<i>Thunnus albacares</i>) and themocline characteristics in the tropic Indian Ocean	YANG Shenglong, ZHANG Yu, ZHANG Heng, et al (671)
Characteristics of algous facies of planktonic algae in lake honghu and its response to habitat	LU Bilin, YAN Pingchuan, TIAN Xiaohai, et al (680)
Tide elevations for four mangrove species along western coast of Guangxi, China	LIU Liang, FAN Hangqing, LI Chungan (690)
Effects of CO ₂ -induced seawater acidification on photosynthesis and calcification in the coralline alga <i>Corallina pilulifera</i>	XU Zhiguang, LI Meizhen, HUO Chuanlin, et al (699)
Impacts of coverage and canopy water depth on the spectral characteristics for a submerged plant <i>Cabomba caroliniana</i>	ZOU Weina, YUAN Lin, ZHANG Liquan, et al (706)
Prioritizing biodiversity in conservation planning based on C-Plan: a case study from northeast China	LUAN Xiaofeng, SUN Gongqi, QU Yi, et al (715)
Effects of urbanization on indigenous plant diversity: a case study of Langfang City, China	PENG Yu, LIU Xuehua, XUE Dayuan, et al (723)
Using infra-red cameras to survey wildlife in Beijing Songshan National Nature Reserve	LIU Fang, LI Diqiang, WU Jigui (730)
Individual tree biomass model by tree origin, site classes and age groups	LI Haikui, NING Jinkui (740)
Population genetics of <i>Niviventer confucianus</i> and its relationships with habitat area in Thousand Island Lake region	LIU Jun, BAO Yixin, ZHANG Xu, et al (758)
Impacts of climate change on phenological phase of herb in the main grassland in Inner Mongolia	GU RunYuan, ZHOU Weican, BAI Meilan, et al (767)
Atmospheric nitrogen deposition in the glacier regions of Northwest China: a case study of Glacier No. 1 at the headwaters of Urumqi River, Tianshan Mountains	WANG Shengjie, ZHANG Mingjun, WANG Feiteng, et al (777)
Effects of vegetation type on arthropod functional groups in the aerial habitat of salt marsh	TONG Chunfu (786)
The plant community distribution and migration characteristics of heavy metals in tolerance dominant species in lead/zinc mine areas in Northwestern Guizhou Province	XING Dan, LIU Hongyan, YU Pingping, et al (796)
Sprouting characteristic in restoration ecosystems of monsoon evergreen broad-leaved forest in south-central of Yunnan Province	SU Jianrong, LIU Wande, ZHANG Zhijun, et al (805)
Distribution patterns and changes of aquatic communities in Lashihai Plateau Wetland after impoundment by damming	XIAO Derong, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (815)
Spatial distribution of root biomass of <i>Pinus massoniana</i> plantation in Three Gorges Reservoir area, China	CHENG Ruimei, WANG Ruili, XIAO Wenfa, et al (823)
Differences in biomass, litter layer mass and SOC storage changing with tree growth in <i>Larix gmelinii</i> plantations in Northeast China	WANG Hongyan, WANG Wenjie, QIU Ling, et al (833)
Soil carbon sequestration rates and potential in the grazing grasslands of Inner Mongolia	HE Nianpeng, HAN Xingguo, YU Guirui (844)
Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged <i>Pinus massoniana</i> stands	GE Xiaogai, XIAO Wenfa, ZENG Lixiong, et al (852)
Compare different effect of arbuscular mycorrhizal colonization on soil structure	PENG Sili, SHEN Hong, ZHANG Yuting, et al (863)
The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents	LIU Muxing, NIE Yan, YU Jing (871)
Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems	TIAN Shenzhong, NING Tangyuan, CHI Shuyun, et al (879)
Effects of exogenous pb and cu stress on eco-physiological characteristics on foxtail millet seedlings of different genotypes	XIAO Zhihua, ZHANG Yixian, ZHANG Xiwen, et al (889)
Combined effect of temperature and salinity on the Na ⁺ -K ⁺ -ATPase activity from the gill of GIFT tilapia juveniles (<i>Oreochromis niloticus</i>)	WANG Haizhen, WANG Hui, QIANG Jun, et al (898)
Pattern simulation of karst rocky desertification based on cellular automata	WANG Xiaoxue, LI Xuyong, WU Xiuqin (907)
The role of root border cells in protecting buckwheat root apices from aluminum toxicity and their effect on polysaccharide contents of root tip cell walls	CAI Miaozen, WANG Ning, WANG Zhiying, et al (915)
The suitable stand structure and hydrological effects of the cypress protection forests in the central Sichuan hilly region	GONG Gutang, LI Yanqiong, ZHU Zhifang, et al (923)
Comprehensive evaluation of agricultural water-saving technology based on AHP and Rough Set method	ZHAI Zhifen, WANG Lanying, SUN Minzhang, et al (931)
Analysis of the spatial expansion characteristics of major urban agglomerations in China using DMSP/OLS images	WANG Cuiping, WANG Haowei, LI Chunming, et al (942)
Evaluation of non-use value of ecotourism resources: a case study in Dalai Lake protected area of China	WANG Pengwei, JIA Jingbo (955)
Review and Monograph	
Assessment indicators system of forest ecosystem health based on the harmful disturbance	YUAN Fei, ZHANG Xinyao, LIANG Jun (964)
Role of silicon in regulating plant resistance to insect herbivores	HAN Yongqiang, WEI Chunguang, HOU Maolin (974)
Scientific Note	
Relationships among light conditions, crown structure and branch longevity: a case study in <i>Osmanthus fragrans</i> and <i>Metasequoia glyptostroboides</i>	ZHAN Feng, YANG Dongmei (984)
Effects of maize straw with Bt gene return to field on growth of wheat seedlings	CHEN Xiaowen, QI Xin, WANG Haiyong, et al (993)
Studies of non-structural carbohydrates of <i>Cupressus funebris</i> in cifferent landslides after Wenchuan Earthquake	CHEN Bo, LI Zhihua, HE Qian, et al (999)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究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;新书评介和学术、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 70 元/册,全年定价 1680 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

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 32 卷 第 3 期 (2012 年 2 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 3 2012

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

主 编 冯宗炜
主 管 中国科学技术协会
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

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

印 刷 北京北林印刷厂
行 销 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

订 购 全国各地邮局
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

广告经营 许可证 京海工商广字第 8013 号

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

Editor-in-chief FENG Zong-Wei
Supervised by China Association for Science and Technology
Sponsored by Ecological Society of China
Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS
Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Bei Lin Printing House,
Beijing 100083, China

Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North
Street, Beijing 100717, China
Tel: (010) 64034563
E-mail: journal@cspg.net

Domestic All Local Post Offices in China
Foreign China International Book Trading
Corporation
Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China

ISSN 1000-0933
9 771000093125
0 3 >