

马尾松不同区域相容性立木材积和地上生物量模型

吕常笑¹, 邓华锋¹, 王少杰¹, 陈振雄², 王雪军³

(1. 北京林业大学 林学院, 北京 100083; 2. 国家林业局 中南林业调查规划设计院, 湖南 长沙 410014;
3. 国家林业局 调查规划设计院, 北京 100714)

摘要: 已有很多国内外学者研究立木材积与地上生物量相容性的问题, 但是建模过程中考虑区域因子对模型影响的研究相对较少。针对此问题, 以重庆市、四川省和湖北省 151 株马尾松 *Pinus massoniana* 的样本数据为例, 采用哑变量和非线性联立方程组的方法, 建立了不同区域马尾松通用的相容性地上生物量模型、立木材积模型和它们的转换因子模型。结果表明: 马尾松不同区域的模型之间存在差异性; 哑变量和非线性联立方程组的方法可以有效地解决不同区域模型的差异性和立木材积与地上生物量模型的相容性; 马尾松地上生物量和立木材积的二元模型均优于其对应的一元模型; 在独立拟合的地上生物量回归模型中引入立木材积因子, 可以有效地改善模型的预估效果; 构建的马尾松相容性立木材积和地上生物量哑变量模型评价指标满足中国生物量模型的精度要求(预估精度均高于 95%, 总相对误差均小于 2%, 平均预估误差均小于 5%)。表 9 参 21

关键词: 森林测计学; 非线性联立方程组; 哑变量; 相容性; 区域; 马尾松

中图分类号: S758 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2016)05-0790-08

Compatible tree volume and aboveground biomass equations for *Pinus massoniana* from different regions

LÜ Changxiao¹, DENG Huafeng¹, WANG Shaojie¹, CHEN Zhenxiong², WANG Xuejun³

(1. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Central South Forest Inventory and Planning Institute, State Forestry Administration, Changsha 410014, Hunan, China; 3. Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: To develop models of compatible tree volume and aboveground biomass equations, which for *Pinus massoniana* have been reported in the literature, while constructing models from different regions rarely. So in this paper, from different regions, sample data of *P. massoniana* from Chongqing Municipality as well as from Sichuan and Hubei Provinces were used to construct compatible tree volume equations, aboveground biomass equations, and biomass conversion factor functions using nonlinear simultaneous equations and the dummy variable model. Results showed that two-variable models were better than one-variable models for both tree volume and aboveground biomass equations. Also, by introducing a tree volume factor, accuracy and model precision for the above-ground biomass equation improved greatly, which means the accuracy of compatible tree volume and aboveground biomass equations was over 95%, the total relative errors (TRE) were within 2%, and the mean prediction errors (MPE) were within 5%. Although models for these regions differed, both one-variable and two-variable compatible models were feasible for estimating the aboveground biomass and the tree volume of *P. massoniana* in Chongqing Municipality and in Sichuan and Hubei Provinces. [Ch, 9 tab. 21 ref.]

Key words: forest mensuration; nonlinear simultaneous equations; dummy variable; compatible; region; *Pinus*

收稿日期: 2015-10-30; 修回日期: 2015-12-30

基金项目: 北京市教育委员会科学研究与科研基地建设项目(省部共建重点实验室); 国家林业公益性行业科研专项(201204510)

作者简介: 吕常笑, 从事生物量模型研究。E-mail: 413317904@qq.com。通信作者: 邓华锋, 教授, 从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: denghuafeng@bjfu.edu.cn

massoniana

森林是最大的陆地生态系统，对维系全球生态平衡，减缓大气温室气体的增加具有重要意义。森林生物量是森林生产力的重要表现，因此，森林生物量的监测和评估越来越受到世界各国的重视^[1-4]。由于地上生物量与立木材积存在高度相关^[5]，地上生物量建模应考虑与立木材积是否相容的问题，为此，中国学者开始了大量的研究。例如：胥辉^[6]将立木材积以自变量形式引入地上生物量模型可以有效地提高其模型预估精度；曾伟生等^[7]以贵州省杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林为例，利用度量误差模型的方法解决了立木材积和地上生物量模型之间相容性的问题；王为斌等^[8]以东北落叶松 *Larix spp.* 为例，在误差变量非线性联立方程组方法的基础上，通过增加截距常数对模型进行了优化改进；曾鸣等^[9]以杉木为例，在误差变量非线性联立方程组方法的基础上，通过哑变量构建了不同总体的通用模型；刘琼阁等^[10]以东北云杉 *Picea spp.* 为研究对象，构建了地上生物量与立木材积和各分项生物量相容的通用模型。尽管这些学者对地上生物量和立木材积的相容性做了大量研究，但在构建模型时考虑地域因子对生物量模型影响的研究相对较少。分析地域因子对生物量模型参数的影响是中国开展全国森林生物量监测与评估必须面临的问题^[11]。在实际研究中也发现，同一树种在不同区域的生物量差异较大^[12]。因此，考虑地域因子对生物量模型的影响对建立全国主要树种立木生物量通用模型是具有重要意义的。本研究以重庆市、四川省和湖北省 151 株马尾松 *Pinus massoniana* 地上生物量和立木材积的样本数据为例，在非线性联立方程组的基础上，利用哑变量构建不同区域马尾松与材积相容的一元、二元地上生物量通用模型和转换因子通用模型，以期对中国马尾松地上生物量和立木材积的估计提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究数据来源是国家林业局全国第 7 次森林资源连续清查生物量调查建模项目。数据共有 151 株马尾松样木，采集于 2009 年的重庆市、四川省和湖北省，按各省(市)马尾松资源的多少分配样本的单元数。为保证样本在大尺度范围内具有广泛的代表性，全部样木按 2, 4, 6, 8, 12, 16, 20, 26, 32 和 38 cm 以上共 10 个径阶均匀分布，每个径阶的样木数也尽量相等。对全部样木进行每木检尺，测量其胸径、地径和冠幅以及样木伐倒后的树高和冠长。然后，称取样木各分量(干材、干皮、树枝、树叶)的鲜质量，并对其分别抽样，放在实验室 85 °C 恒温下烘干至质量稳定，算出立木各部分生物量的干质量和地上部分总干质量。样本数据按地域的分布情况见表 1。

表 1 马尾松生物量建模数据的基本情况

Table 1 Summary statistics of masson pine modelling data

地域	样本量/株	项目	胸径/cm	树高/m	冠幅/m	地上生物量/kg	立木材积/dm ³
重庆市	50	平均值	16.46	14.57	3.94	175.89	342.61
		最小值	2.10	2.00	0.75	0.96	1.30
		最大值	38.80	30.30	9.06	706.23	1 429.86
		标准差	11.51	7.65	2.10	207.56	433.62
		变动系数/%	69.93	52.12	53.16	118.00	126.56
四川省	51	平均值	16.43	11.60	4.63	202.59	277.01
		最小值	1.40	1.60	0.60	0.21	0.33
		最大值	40.10	24.50	10.05	1 079.26	1 456.65
		标准差	11.65	6.86	2.64	271.89	384.07
		变动系数/%	70.88	59.09	57.03	134.21	138.65
湖北省	50	平均值	16.46	10.53	4.37	145.58	267.06
		最小值	1.70	2.10	0.85	0.70	0.65
		最大值	39.70	22.50	9.77	691.37	1 326.29
		标准差	11.83	6.37	2.37	183.84	355.49
		变动系数/%	71.87	60.50	54.27	126.28	133.11

1.2 传统回归模型

对于生物量模型,国内外学者已经做了大量研究,并提出了多种精度较高的经验模型^[13-16]。在立木地上生物量方面,考虑到林木的年龄测定工作繁琐复杂,且国内外的大部分生物量模型都是以胸径、树高、冠幅为解释变量,故本研究的一元地上生物量模型:

$$M_1 = a_0 D^{a_1} \quad (1)$$

二元地上生物量模型:

$$M_2 = a_0 D^{a_1} H^{a_2} \quad (2)$$

模型(1)和模型(2)中: M_1 为根据一元模型估计的地上生物量, M_2 为根据二元模型估计的地上生物量, D 为胸径, H 为树高, a_0 , a_1 , a_2 为各模型参数。

在立木材积方面,考虑到中国常用的主要是一元材积表(胸径)和二元材积表(树高和胸径)^[17],故本研究的一元立木材积模型:

$$V_1 = b_0 D^{b_1} \quad (3)$$

二元立木材积模型:

$$V_2 = b_0 D^{b_1} H^{b_2} \quad (4)$$

模型(3)和模型(4)中: V_1 为根据一元模型估计的立木材积, V_2 为根据二元模型估计的立木材积, b_0 , b_1 , b_2 为各模型参数。

1.3 哑变量模型

地上生物量和立木材积不仅与胸径、树高等因子高度相关,在一定程度上还会受到地域因子的影响^[11]。为区别重庆市、四川省和湖北省不同区域马尾松立地、气候和环境等因素的差异,需要在模型(1)~(4)中引入2个反映地域影响的哑变量 S_1 和 S_2 , 即当 $S_1=1$, $S_2=0$ 时为重庆市; 当 $S_1=0$, $S_2=1$ 时为湖北省; 当 $S_1=0$, $S_2=0$ 时为四川省。则一元地上生物量哑变量模型:

$$M_1 = (a_0 + e_0 S_1 + f_1 S_2) D^{(a_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} \quad (5)$$

二元地上生物量哑变量模型:

$$M_2 = (a_0 + e_0 S_1 + f_1 S_2) D^{(a_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} H^{(a_2 + e_2 S_1 + f_2 S_2)} \quad (6)$$

一元立木材积哑变量模型:

$$V_1 = (a_0 + e_0 S_1 + f_1 S_2) D^{(b_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} \quad (7)$$

二元立木材积哑变量模型:

$$V_2 = (a_0 + e_0 S_1 + f_1 S_2) D^{(b_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} H^{(b_2 + e_2 S_1 + f_2 S_2)} \quad (8)$$

模型(5)~(8)中: e_0 , e_1 , e_2 , f_0 , f_1 , f_2 分别为哑变量 S_1 和 S_2 的特定参数。

1.4 相容性模型

考虑到树干生物量与立木材积的高度相关性,且树干生物量是地上生物量的主要组成部分,在构建地上生物量模型时,也可将立木材积以自变量形式引入其模型结构。一元模型的结构形式:

$$M_1 = R_1 V = c_0 D^{c_1} V \quad (9)$$

二元模型的结构形式:

$$M_2 = R_2 V = c_0 D^{c_1} H^{c_2} V \quad (10)$$

模型(9)和模型(10)中: $R_1 = F_1(D) = c_0 D^{c_1}$, $R_2 = F_2(D, H) = c_0 D^{c_1} H^{c_2}$, 分别为地上生物量与立木材积之间的一元转换因子模型和二元转换因子模型; c_0 , c_1 , c_2 为模型参数。则模型(1), 模型(3)和模型(9); 模型(2), 模型(4)和模型(10)系数存在如下关系:

$$c_0 = a_0 / b_0, \quad c_1 = a_1 - b_1, \quad c_2 = a_2 - b_2 \quad (11)$$

如果采用传统回归模型独立拟合模型(1), 模型(3)和模型(9); 模型(2), 模型(4)和模型(10), 则其模型参数很难满足式(11)。因此,为了保证地上生物量模型、立木材积模型及其转换因子模型参数的一致性,利用非线性度量误差联立方程组将模型(3)与模型(9), 模型(4)与模型(10)联立,其中地上生物量和立木材积为含有度量误差的变量,胸径和树高为不含度量误差的变量,并利用统计软件 Forstat 2.2^[18]求解模型参数。一元相容性模型表达式如下:

$$\begin{cases} V_1 = b_0 D^{b_1} \\ M_1 = c_0 D^{c_1} V_1 \end{cases} \quad (12)$$

二元相容性模型：

$$\begin{cases} V_2 = b_0 D^{b_1} H^{b_2} \\ M_2 = c_0 D^{c_1} H^{c_2} V_2 \end{cases} \quad (13)$$

一元相容性哑变量模型：

$$\begin{cases} V_1 = (b_0 + e_0 S_1 + f_0 S_2) D^{(b_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} \\ M_1 = (c_0 + e_0 S_1 + f_0 S_2) D^{(c_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} V_1 \end{cases} \quad (14)$$

二元相容性哑变量模型：

$$\begin{cases} V_2 = (b_0 + e_0 S_1 + f_0 S_2) D^{(b_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} H^{(b_2 + e_2 S_1 + f_2 S_2)} \\ M_2 = (c_0 + e_0 S_1 + f_0 S_2) D^{(c_1 + e_1 S_1 + f_1 S_2)} H^{(c_2 + e_2 S_1 + f_2 S_2)} V_2 \end{cases} \quad (15)$$

1.5 模型评价

为了对不同模型进行对比分析，本研究采用确定系数(R^2)，总相对误差(E_{TR})，估计值的标准误差(E_{SE})，平均预估误差(E_{MP})，平均百分标准误差(E_{MPS})和预估精度(P)等 6 项统计指标^[19-21]对模型进行评价分析，同时把考虑地域因子的哑变量模型与之相对应的传统回归模型进行比较分析。其计算公式：

$$\begin{aligned} R^2 &= 1 - \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2 / (W_i - \bar{W})^2; \\ E_{TR} &= \sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2 / \sum_{i=1}^n \hat{W}_i \times 100\%; \\ E_{SE} &= \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2 / (n-k)}; \\ E_{MP} &= \frac{t_\alpha \left(\frac{E_{SE}}{\bar{W}} \right)}{\sqrt{n}} \times 100\%; \\ E_{MPS} &= \sum_{i=1}^n |(W_i - \hat{W}_i) / \hat{W}_i| / n \times 100\%; \\ P &= \left(1 - \frac{t_\alpha \sqrt{\sum_{i=1}^n (W_i - \hat{W}_i)^2}}{\bar{W}_i \sqrt{n-k}} \right) 100\%。 \end{aligned}$$

其中： W_i 为第*i*株样木的实测值， \hat{W}_i 为第*i*株样木的估计值， \bar{W} 为全部样木实测值的平均值， \bar{W}_i 为全部样木估计值的平均值， n 为全部样木总数， k 为模型参数个数， t_α 为自由度 $n-k$ ，置信水平 α ($\alpha=0.05$) 时的 t 分布值。

2 结果与分析

2.1 传统回归模型

以重庆市、四川省和湖北省 151 株马尾松立木材积和地上生物量的样本数据为例，利用软件 Forstat 2.2 分别构建一元和二元立木材积、地上生物量独立回归模型，相容的地上生物量模型、立木材积模型和转换因子模型，并利用哑变量分析了地域因子对其模型参数的影响。

马尾松地上生物量和立木材积独立回归模型[模型(1)~(4)]统计指标见表 2。从表 2 可以看出：独立拟合的回归模型对马尾松地上生物量和立木材积的预估效果均较好。总体上看，立木材积模型的预估效果要优于地上生物量的预估效果。另外，从表 2 还可以看出：地上生物量和立木材积二元模型的预估效果要优于一元模型的预估效果，其中以立木材积模型的改进效果较好：确定系数由 0.949 7 提高到 0.984 8，估计值的标准误差由 88.57 下降到 48.84，平均预估误差由 4.75% 下降到 2.62%，平均百分标准误差由 27.10% 下降到 12.29%。这说明，地上生物量和立木材积一元模型在引入树高因子后，改善了模

型的精度和预估效果。

表3为马尾松地上生物量和立木材积独立回归哑变量模型[模型(5)~(8)]的统计指标。从表3可以看出：地上生物量和立木材积的二元模型预估效果依然优于一元模型的预估效果。与表2对比可以看出：引入代表区域的哑变量后，地上生物量和立木材积模型的评价指标均有提高，预估效果得到改善。其中以地上生物量模型改善效果比较明显，确定系数调高了4个百分点，估计值得标准误差下降了28%左右，平均预估误差也由6%左右下降到4%左右，这说明在地上生物量和立木材积独立回归模型建模过程中，引入代表地域的哑变量可以有效地改善模型精度和预估效果。

2.2 相容性模型

为解决地上生物量与材积相容性问题，胥辉首次提出将立木材积以自变量形式引入地上生物量传统幂函数模型[模型(9)~(10)]^[6]，模型评价指标见表4。

由表4可以看出：将立木材积以自变量的形式引入地上生物量独立拟合回归模型后，地上生物量模型的评价指标均有提高，预估效果明显得到改善。引入代表地域的哑变量后，模型的确定系数更是达到0.9800，平均预估误差也下降到2.5%左右，这说明独立拟合立木生物量模型时增加立木材积因子尽管不能保证地上生物量模型、立木材积模型和转换因子函数模型系数的一致性，但是可以有效地改善模型精度和预估效果。

为保证地上生物量模型、立木材积模型和转换因子函数模型系数的一致性，学者又逐渐提出了非线性度量误差模型[模型(12)~(13)]^[18]，模型评价指标见表5。由表5可以看出：相容的地上生物量和立木材积模型各项评价指标与独立拟合的传统回归模型相差不大，都能很好地达到预估效果，其中立木材积模型预估效果要优于地上生物量的预估效果。相容后的地上生物量模型的预估效果明显低于含有立木材积因子的独立回归模型[模型(9)~(10)]，但由表6可以看出非线性度量误差联立方程组方法不但保证了地上生物量与立木材积的相容性，还有效地解决了地上生物量模型、立木材积模型和转换因子模型系数不统一的问题。

表7为马尾松立木材积和地上生物量含哑变量的相容性模型[模型(14)~(15)]的统计指标。由表7

表2 马尾松地上生物量和立木材积独立回归模型的统计指标

模型	R^2	E_{SE}	$E_{TV}/\%$	$E_{MV}/\%$	$E_{MVS}/\%$	$P/\%$
M_1	0.913 4	66.87	-1.02	6.15	27.65	93.91
M_2	0.924 9	62.50	-0.33	5.75	22.86	94.27
V_1	0.949 7	88.57	-1.37	4.75	27.10	95.31
V_2	0.984 8	48.84	-0.22	2.62	12.29	97.38

表3 马尾松地上生物量和立木材积独立回归哑变量模型的统计指标

模型	R^2	E_{SE}	$E_{TV}/\%$	$E_{MV}/\%$	$E_{MVS}/\%$	$P/\%$
M_1	0.953 9	48.81	-0.97	4.49	23.26	95.56
M_2	0.962 9	43.92	-0.37	4.04	22.25	95.98
V_1	0.966 4	72.37	-1.27	3.88	22.88	96.17
V_2	0.986 4	46.18	-0.18	2.48	17.37	97.53

表4 马尾松引入立木材积自变量的地上生物量模型统计指标

模型	R^2	E_{SE}	$E_{TV}/\%$	$E_{MV}/\%$	$E_{MVS}/\%$	$P/\%$
M_1	0.944 7	53.45	1.44	4.91	22.34	95.01
M_2	0.951 7	50.10	-0.47	4.61	16.97	95.41
M_1 (哑)	0.983 9	28.87	0.59	2.65	17.88	97.32
M_2 (哑)	0.986 8	26.13	-0.47	2.40	14.39	97.61

表5 立木材积和地上生物量相容性总体模型的统计指标

模型	R^2	E_{SE}	$E_{TV}/\%$	$E_{MV}/\%$	$E_{MVS}/\%$	$P/\%$
M_1	0.913 4	66.87	-1.10	6.15	27.80	93.92
V_1	0.949 7	88.57	-1.39	4.75	27.14	95.32
M_2	0.924 9	62.30	-0.43	5.73	22.95	94.30
V_2	0.984 8	48.69	-0.22	2.61	12.34	97.40

表6 立木材积、地上生物量模型和转换系数相容性模型参数估计值

Table 6 Parameter estimates of compatible tree volume, aboveground biomass and BCF models

模型	地上生物量			立木材积			转换系数(BCF)		
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
一元	0.266 3	2.147 1		0.327 7	2.247 1		0.812 5	-0.100 0	
二元	0.138 2	1.895 9	0.508 9	0.092 0	1.820 2	0.914 1	1.501 4	0.075 7	-0.405 3

可以看出：立木材积和地上生物量的相容性模型在引入代表区域因子的哑变量后，预估精度和稳定性都有明显改善。其中，地上生物量模型的改善效果更为明显：确定系数提高了 4 个百分点，平均预估误差由 5% 左右降到 4% 左右。这说明在马尾松不同区域地上生物量和立木材积的相容性模型中，引入地域因子的影响是具有重要意义的。

表 7 马尾松含哑变量的立木材积和地上生物量相容性模型统计指标

Table 7 Statistics of compatible tree volume and aboveground biomass dummy models

模型	R^2	E_{SE}	$E_{WJ}/\%$	$E_{M1}/\%$	$E_{MS}/\%$	$P/\%$
M_1	0.953 9	48.81	-1.10	4.49	23.38	95.56
V_1	0.966 4	72.37	-1.25	3.88	22.93	96.17
M_2	0.962 9	43.79	-0.28	4.03	24.22	95.98
V_2	0.986 4	46.03	-0.09	2.47	17.87	97.53

表 8 为马尾松含哑变量的立木材积和地上生物量相容性模型的参数估计值。由表 8 可以看出：在含哑变量的地上生物量和立木材积含相容性模型参数中， $e_0 \sim e_1, f_0 \sim f_1$ 都显著不为 0，这进一步证明了马尾松地上生物量和立木材积不同区域模型之间的差异性。同时，也说明了地域因子对立木材积和地上生物量模型的所有参数都有影响。因此，在利用哑变量方法建模时应考虑对模型所有参数引入哑变量进行分析。表 9 为重庆市、四川省和湖北省马尾松的一元、二元相容的立木材积模型、地上生物量模型和转换因子模型。

表 8 马尾松立木材积和地上生物量含哑变量相容性模型的参数估计值

Table 8 Parameter estimates of compatible tree volume and aboveground biomass dummy models

模型	b_0	e_0	f_0	b_1	e_1	f_1	b_2	e_2	f_2
M_1	0.698 4	0.494 5	0.108 1	-0.001 5	-0.250 5	-0.117 2			
V_1	0.178 2	0.365 1	0.088 6	2.416 5	-0.277 4	-0.145 5			
M_2	0.066 2	0.080 4	-0.001 5	1.696 0	0.051 0	0.373 9	1.170 5	-0.322 0	-0.440 5
V_2	1.024 6	0.958 5	0.498 0	0.250 8	-0.383 8	-0.261 8	-0.421 3	0.129 1	0.073 1

表 9 马尾松不同区域的一元和二元相容性模型

Table 9 Compatible one-and two-variable models of masson pine for different region

模型	区域	立木材积方程	地上生物量模型	生物量转换因子函数
一元	四川	$V_2=0.178 2D^{2.416 5}$	$M_2=0.124 5D^{2.428 0}$	$F_1(D)=0.698 4D^{-0.001 3}$
	重庆	$V_2=0.543 3D^{2.139 2}$	$M_2=0.648 1D^{2.887 0}$	$F_1(D)=1.192 9D^{-0.232 0}$
	湖北	$V_2=0.266 8D^{-0.243 3}$	$M_2=0.215 2D^{-0.264 2}$	$F_1(D)=0.806 4D^{-0.220 7}$
二元	四川	$V_2=0.066 2D^{2.696}H^{2.270 3}$	$M_2=0.067 8D^{2.948 3}H^{0.749 2}$	$F_2(D, H)=1.024 6D^{-0.230 3}H^{-0.422 2}$
	重庆	$V_2=0.146 6D^{2.747}H^{0.845 3}$	$M_2=0.290 7D^{2.834}H^{0.556 3}$	$F_2(D, H)=1.983 1D^{-0.133}H^{-0.292 2}$
	湖北	$V_2=0.064 7D^{2.070}H^{0.730 0}$	$M_2=0.098 6D^{2.038 9}H^{0.381 7}$	$F_2(D, H)=1.522 6D^{-0.011}H^{-0.249 2}$

3 结论

本研究以重庆市、四川省和湖北省不同区域马尾松地上生物量和立木材积的样本数据为例，对其立木材积和地上生物量模型做了相关研究，可以得到以下结论：

不同区域马尾松的地上生物量和立木材积在模型统计上存在较大差异。哑变量和非线性联立方程组的方法可以有效地解决不同区域模型的差异性和立木材积与地上生物量模型的相容性。另外，地域因子对地上生物量和立木材积传统回归模型的所有参数都有影响。因此，在利用哑变量方法构建不同区域通用模型时，应考虑对模型所有参数进行哑变量分析。

引入哑变量前后，通过非线性联立方程组构建的立木材积和地上生物量相容性模型与独立拟合的传统回归模型评价结果均相差不大，但是它不仅有效地保证了立木材积和地上生物量的相容性，还解决了立木材积模型、地上生物量模型和其转换因子模型系数不统一的问题。

不管是独立拟合的传统回归模型还是其相容性模型,地上生物量和立木材积的一元模型在引入树高因子后,均改善了模型的精度和预估效果,并且立木材积模型的改进效果要大于地上生物量模型的预估效果。

将立木材积以自变量的形式引入独立拟合的地上生物量独立拟合回归模型后,可以有效地改善模型的预估精度预估效果。

本研究构建的马尾松包含地域因子的相容性立木材积和地上生物量哑变量模型评价指标均满足中国生物量模型的精度要求(预估精度均高于95%,总相对误差均小于2%,平均预估误差均小于5%)。

4 参考文献

- [1] CRONAN C S. Belowground biomass, production, and carbon cycling in mature Norway spruce, Maine, U.S.A. [J]. *Can J For Res*, 2003, **33**(2): 339 – 350.
- [2] WOODBURY P B, SMITH J E, HEATH L S. Carbon sequestration in the U. S. forest sector from 1990 to 2010 [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **241**(1/3): 14 – 27.
- [3] HOUGHTON R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance [J]. *Global Change Biol*, 2005, **11**(6): 945 – 958.
- [4] FANG Z, BAILEY R L. Nonlinear mixed effects modeling for Slash pine dominant height growth following intensive silvicultural treatments [J]. *For Sci*, 2001, **47**(3): 287 – 300.
- [5] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 相容性立木生物量非线性模型研究[J]. *生态学杂志*, 1999, **18**(4): 19 – 24.
ZENG Weisheng, LUO Qibang, HE Dongbei. Study on compatible nonlinear tree biomass models [J]. *Chin J Ecol*, 1999, **18**(4): 19 – 24.
- [6] 胥辉. 1种与材积相容的生物量模型[J]. *北京林业大学学报*, 1999, **21**(5): 32 – 36.
XU Hui. A biomass model compatible with volume [J]. *J Beijing For Univ*, 1999, **21**(5): 32 – 36.
- [7] 曾伟生, 夏忠胜, 朱松, 等. 贵州人工杉木相容性立木材积和地上生物量方程的建立[J]. *北京林业大学学报*, 2011, **33**(4): 1 – 5.
ZENG Weisheng, XIA Zhongsheng, ZHU Song, et al. Compatible tree volume and above-ground biomass equations for Chinese fir plantations in Guizhou [J]. *J Beijing For Univ*, 2011, **33**(4): 1 – 5.
- [8] 王为斌, 党永锋, 曾伟生. 东北落叶松相容性立木材积和地上生物量方程研建[J]. *林业资源管理*, 2012(4): 69 – 73.
WANG Weibin, DANG Yongfeng, ZENG Weisheng. Compatible tree volume and above-ground biomass equations for larch (*Larix* spp.) in Northeastern China [J]. *For Resour Manage*, 2012(4): 69 – 73.
- [9] 曾鸣, 聂祥永, 曾伟生. 中国杉木相容性立木材积和地上生物量方程[J]. *林业科学*, 2013, **49**(10): 74 – 79.
ZENG Ming, NIE Xiangyong, ZENG Weisheng. Compatible tree volume and aboveground biomass equations of Chinese fir in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(10): 74 – 79.
- [10] 刘琼阁, 彭道黎, 黄国胜, 等. 东北云杉相容性立木材积和地上生物量模型研建[J]. *北京林业大学学报*, 2015, **37**(2): 8 – 15.
LIU Qiongge, PENG Daoli, HUANG Guosheng, et al. Compatible standing tree volume and above-ground biomass equations for spruce in northeastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2015, **37**(2): 8 – 15.
- [11] 符利勇, 曾伟生, 唐守正. 利用混合模型分析地域对国内马尾松生物生物量的影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(19): 5797 – 5808.
FU Liyong, ZENG Weisheng, TANG Shouzheng. Analysis the effect of region impacting on the biomass of domestic masson using mixed model [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(19): 5797 – 5808.
- [12] 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[J]. *林业科学*, 2010, **23**(6): 797 – 802.
ZENG Weisheng, TANG Shouzheng. Using measurement error modeling method to establish compatible single-tree biomass equation system [J]. *Sci Silv Sin*, 2010, **23**(6): 797 – 802.
- [13] PARRESOL B R. Additivity of nonlinear biomass equations [J]. *Can J For Res*, 2001, **31**(5): 865 – 878.
- [14] ZHANG Yujia, BORDERS B E. Using a system mixed-effects modeling method to estimate tree compartment biomass

- for intensively managed loblolly pines: an allometric approach [J]. *For Ecol Manage*, 2004, **194**(1/3): 145 – 157.
- [15] BI H, TURNER J, LAMBERT M J. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia [J]. *Trees*, 2004, **18**(4): 467 – 479.
- [16] FEHRMANN L F, LEHTONEN A L, KLEINN C K, *et al.* Comparison of linear and mixed-effect regression models and a k-nearest neighbour approach for estimation of single-tree biomass [J]. *Can J For Res*, 2008, **38**(1): 1 – 9.
- [17] 郭欣雨, 冯仲科, 曹忠, 等. 甘肃省山杏山杨相容性一元材积模型研建[J]. 林业资源管理, 2015(2): 65 – 70.
GUO Xinyu, FENG Zhongke, CAO Zhong, *et al.* Research of compatible one-way and tree volume models of *Prunus armeniaca* and aspen in Gansu Province [J]. *For Resour Manage*, 2015(2): 65 – 70.
- [18] 唐守正, 郎奎建, 李海奎. 统计和生物数学模型计算(Forstat 教程)[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [19] 曾伟生, 骆期邦, 贺东北. 论加权回归与建模[J]. 林业科学, 1999, **35**(5): 5 – 11.
ZENG Weisheng, LUO Qibang, HE Dongbei. Research on weighting regression and modelling [J]. *Sci Silv Sin*, 1999, **35**(5): 5 – 11.
- [20] 曾伟生. 再论加权最小二乘法中权函数的选择[J]. 中南林业调查规划, 1998, **17**(3): 9 – 11.
ZENG Weisheng. Again research select weighting function on the weighted least squares [J]. *Cent South For Inv Plan*, 1998, **17**(3): 9 – 11.
- [21] 曾伟生, 唐守正. 立木生物量方程的优度评价和精度分析[J]. 林业科学, 2011, **47**(11): 106 – 113.
ZENG Weisheng, TANG Shouzheng. Goodness evaluation and precision analysis of tree biomass equations [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, **47**(11): 106 – 113.