

文章编号:1001-1498(2014)01-0006-05

杉木相容性立木材积表系列模型研建*

曾伟生

(国家林业局调查规划设计院,北京 100714)

摘要:以我国南方地区最重要的针叶树种杉木(*Cunninghamia lanceolata*)为研究对象,采用误差变量联立方程组方法,建立了相容性二元立木材积方程、胸径和地径一元立木材积方程、树高胸径回归模型及地径胸径回归模型。利用3种树高模型和2种地径模型组合了4个相容性立木材积表系列模型联立方程组,通过6项指标进行综合评价,结果表明由最简单的树高模型和地径模型构成的相容性系列材积模型就能取得良好效果,其二元材积表、胸径一元材积表和地径一元材积表的平均预估误差分别为1.31%、3.66%和7.39%,可用于不同目的的杉木林蓄积量估计。

关键词:二元材积方程;一元材积方程;树高模型;地径模型;误差变量联立方程组;相容性;杉木

中图分类号:S791.27

文献标识码:A

Establishment of Compatible Tree Volume Equation Systems of Chinese Fir

ZENG Wei-sheng

(Academy of Forest Inventory and Planning, State Forestry Administration, Beijing 100714, China)

Abstract: Taking Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*), the most important coniferous species in southern China, as the study object, the compatible two-entry and single-entry (diameter at breast height-DBH, and diameter at root collar-DRC) volume equations, height-DBH regression model, and DRC-DBH regression model were established using the error-in-variable simultaneous equation approach. Based on the three height-DBH models and two DRC-DBH models, four compatible volume equation systems were established simultaneously, which were compared with six statistics. The results show that the compatible volume equation system composed of simple height-DBH model and DRC-DBH model is quite sound, the mean prediction error (MPE) of two-entry volume equation is 1.31% and the MPE's of single-entry equations based on DBH and DRC are 3.66% and 7.39%, respectively. The tree volume equations developed in this paper can be applied for volume estimation of Chinese fir forests under different circumstances.

Key words: two-entry volume equation; single-entry volume equation; height-DBH model; DRC-DBH model; error-in-variable simultaneous equation; compatibility; *Cunninghamia lanceolata*

立木材积表是常用的森林调查数表,也是重要的林业基础计量数表。我国的立木材积表通常包括二元材积表和一元材积表^[1],其中一元材积表又包

括胸径一元表和地径一元表。作为林业行业标准的二元立木材积表于上世纪70年代后期由当时的农林部组织编制并颁布实施^[2],至今已经30多年。由

收稿日期:2013-02-25

基金项目:国家自然科学基金资助(编号31270697)。

作者简介:曾伟生(1966—),男,湖南涟源人,博士,教授级高工,主要从事森林资源调查监测与林业数表模型研制工作。Email:zengweisheng@sohu.com

*:本研究所用的杉木实测数据资料,由国家林业局华东林业调查规划设计院森林生物量调查建模项目组及相关省(市、区)林业主管部门负责采集,在此深表谢意。

于我国森林资源的结构发生了较大变化,部分原有的材积表在应用中可能存在难以接受的偏差,还有部分树种原来就没有适用的材积表。因此,近十年来很多地方已经开始编制新的二元材积表^[3-8],其中既涉及原已有材积表的主要树种如杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)等,也包括原来没有材积表的树种如桉树(*Eucalyptus* spp.)、湿地松(*Pinus eliottii* Engelm.)等。

一般所谓的一元立木材积表通常是指胸径一元表,近年来在这方面也发表了不少成果^[9-13]。随着查处盗伐林木案件对采伐木材积估计需求的日益增长,反映地径(或根径、基径)与材积之间相互关系的地径一元表在近年也得到了不断发展^[14-17]。由于地径与胸径之间存在紧密相关,地径一元表与胸径一元表也应该是高度相关的。为此,笔者提出利用误差变量联立方程组方法,同时建立胸径一元材积模型、地径一元材积模型和胸径—地径回归模型^[18]。而一元材积表与二元材积表之间,只要通过建立树高一胸径回归模型(或树高曲线方程)就能将二者结合起来^[1,19]。有人已经成功地利用误差变量联立方程组方法,建立了贵州省人工杉木的相容性一元和二元立木材积方程及树高曲线方程^[20]。本文将我国南方主要的针叶树种杉木为对象,对同时建立相容性二元材积方程、胸径和地径一元材积方程、树高胸径回归模型及地径胸径回归模型的方法进行探讨,并分析比较不同树高模型和地径模型的建模效果,以期能提出一种通用的相容性系列材积模型的建立方法,为各地编制不同树种的相容性系列材积表提供技术依据。

1 数据与方法

1.1 数据资料

所用数据为我国南方的杉木实测数据,采集自杉木主要分布区的浙江、安徽、福建、江西、湖北、湖南、广东、广西、重庆、四川、贵州11省(市、区)。样木数按6、8、12、16、20、26、32、38 cm以上8个径阶均匀分配,每个径阶不少于30株,共计242株。样木按胸径、树高、地径、材积4项因子的主要统计指标见表1。通过绘制散点图对材积与胸径、材积与地径、树高与胸径、地径与胸径之间的关系进行分析,发现材积与胸径的关系比材积与地径的关系更为紧密,而树高与胸径、地径与胸径之间也是高度相

关的。

表1 建模样本的主要统计指标

统计指标	胸径/cm	树高/m	地径/cm	材积/m ³
最小值	5.2	3.5	6.3	0.004 5
最大值	42.4	33.0	64.0	1.815 2
平均值	19.8	13.6	26.1	0.370 1
标准差	10.8	6.4	14.7	0.429 5
变动系数/%	54.7	47.0	56.3	116.1

1.2 方法简介

二元立木材积表一般都是基于以下形式的二元材积方程^[2]:

$$V = a_0 D^{a_1} H^{a_2} + \varepsilon \quad (1)$$

式中, V 为立木材积(m³), D 为胸径(cm), H 为树高(m), a_i 为参数, ε 为误差项。

一元立木材积表与二元材积表之间通过树高胸径回归模型建立相关。树高胸径回归模型的形式很多,此处选用以下3种^[1,19-20]:

$$H = b_0 D^{b_1} + \varepsilon \quad (2)$$

$$H = D / (b_0 + b_1 D) + \varepsilon \quad (3)$$

$$H = b_0 (1 - e^{-b_1 D})^{b_2} + \varepsilon \quad (4)$$

式中, b_i 为参数,其它符号同前。

地径一元表与胸径一元表之间通过地径胸径回归模型建立相关。地径胸径回归模型的形式一般为简单的线性方程^[15,17-18],此处采用以下2种形式:

$$D_0 = c_1 D + \varepsilon \quad (5)$$

$$D_0 = c_0 + c_1 D + \varepsilon \quad (6)$$

式中, D_0 为地径(cm), c_i 为参数,其它符号同前。

1.2.1 相容性材积系列模型的建立 对于二元立木材积表和胸径及地径一元立木材积表,以往的做法基本都是单独建立模型,很少考虑它们之间的相关性。事实上,以树高胸径回归模型和地径胸径回归模型作为桥梁,就可以将三者紧密联系到一起。根据前述3种树高胸径回归模型和2种地径胸径回归模型,这里组合成以下4种联合估计方案:

$$\hat{D}_0 = c_1 \hat{D}, \hat{H} = b_0 \hat{D}^{b_1}, \hat{V} = a_0 \hat{D}^{a_1} \hat{H}^{a_2} \quad (7)$$

$$\hat{D}_0 = c_0 + c_1 \hat{D}, \hat{H} = b_0 \hat{D}^{b_1}, \hat{V} = a_0 \hat{D}^{a_1} \hat{H}^{a_2} \quad (8)$$

$$\hat{D}_0 = c_0 + c_1 \hat{D}, \hat{H} = D / (b_0 + b_1 \hat{D}), \hat{V} = a_0 \hat{D}^{a_1} \hat{H}^{a_2} \quad (9)$$

$$\hat{D}_0 = c_0 + c_1 \hat{D}, \hat{H} = b_0 (1 - e^{-b_1 \hat{D}})^{b_2}, \hat{V} = a_0 \hat{D}^{a_1} \hat{H}^{a_2} \quad (10)$$

式中, $\hat{D}_0, \hat{H}, \hat{V}$ 为地径、树高、材积的模型预估值,其它符号同前。通过(7)、(8)式之间的对比可

以反映出2种地径胸径回归模型的差异,通过(8)、(9)、(10)式之间的对比可以反映3种树高胸径回归模型的差异。要注意的一点是,上述4式中的材积式,集一元和二元材积模型于一体;树高 \hat{H} 采用实测值 H 代替,它就是二元材积式;树高 \hat{H} 采用树高胸径模型的预估值,它就是胸径一元材积式;如果胸径 D 用地径胸径回归模型换算为地径的表达式,它就是地径一元材积式。以(7)式为例,其对应的胸径和地径一元材积式可分别表示为:

$$\hat{V} = d_0 D^{d_1} \quad (11)$$

$$\hat{V} = e_0 D_0^{e_1} \quad (12)$$

式中,参数 d_i 、 e_i 与(7)式的参数之间满足以下关系:

$$d_0 = a_0 b_0^{a_2}, d_1 = a_1 + b_1 a_2 \quad (13)$$

$$e_0 = d_0 c_1^{-d_1}, e_1 = d_1 \quad (14)$$

由于(8)到(10)式越来越复杂,除(8)式对应的胸径一元材积式能表达为(11)式以外,其它对应的胸径和地径一元材积式均难以进行简化。对于(7)到(10)式的求解,采用误差变量联立方程组方法^[18,20-21],其中 D 作为无误差变量, $\hat{D}_0, \hat{H}, \hat{V}$ 作为误差变量。由于立木材积数据普遍存在着异方差性,在求解模型参数时必须采取措施消除异方差的影响。这里采用非线性加权回归方法,材积方程的权函数根据其独立拟合的方程确定^[18,20]。

1.2.2 回归模型的评价 用于回归模型评价的统计指标主要包括以下6个: R^2 (确定系数)、 SEE (估

计值的标准误)、 TRE (总相对误差)和 MSE (平均系统误差)、 MPE (平均预估误差)、 $MPSE$ (平均百分标准误差),其计算公式为^[20,22]:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (15)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p}} \quad (16)$$

$$TRE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i} \times 100 \quad (17)$$

$$MSE = \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)}{\sum \hat{y}_i / n} \times 100 \quad (18)$$

$$MPE = t_\alpha \cdot (SEE / \bar{y}) / \sqrt{n} \times 100 \quad (19)$$

$$MPSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |(y_i - \hat{y}_i) / \hat{y}_i| \times 100 \quad (20)$$

式中, y_i 和 \hat{y}_i 分别为第 i 株样木的实测值和预估值, \bar{y} 为全部样木实测值的平均数, n 为样木总数, p 为参数个数, t_α 为自由度 $n-p$ 、置信水平 α 时的 t 值(此处取 $\alpha = 0.05$)。这6项指标中, R^2 和 SEE 是回归模型的常用指标; TRE 和 MSE 是反映拟合效果的重要指标,二者都应该控制在一定范围内(如 $\pm 3\%$ 或 $\pm 5\%$),趋向于0时效果最好; MPE 是反映平均估计值的精度指标, $MPSE$ 是反映单个估计值的精度指标,二者越小回归模型的精度就越高。

2 结果与分析

利用242株杉木的实测数据,对4个方程组(7)、(8)、(9)、(10)式,用误差变量联立方程组方法进行拟合,其参数估计结果见表2。

表2 不同联立方程组模型的拟合结果

模型	材积方程			树高模型			地径模型	
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1
(7)	0.000 062 40	1.852	1.008	1.48	0.754	/	/	1.32
(8)	0.000 062 73	1.835	1.015	1.32	0.788	/	-0.172	1.33
(9)	0.000 076 29	2.208	0.530	1.06	0.0161	/	-0.144	1.32
(10)	0.000 075 77	2.208	0.533	49.7	0.0140	0.881	-0.155	1.32

注:材积模型的权重变量为 $1/D^{1.24}$ 。

通过联合估计,相当于同时得到了相容性二元材积式、胸径和地径一元材积式、树高胸径回归模型及地径胸径回归模型,对这5个模型的统计指标进行计算,结果见表3。

从表3可以看出,4种不同联立方程组模型中,地径模型和树高模型的统计指标相差不大;胸径一元材积式和地径一元材积式也相差不大,但二元材积式则(9)、(10)式明显比(7)、(8)式要差,从表2

的材积方程参数估计值也看出(9)、(10)式出现了一些异常, a_1 比通常的取值要大,而 a_2 则比通常的取值要小。而从(7)、(8)式的对比看,(7)式的各项指标几乎都要好于(8)式,尤其是 TRE 、 MSE 、 $MPSE$ 等指标的差异更加明显。由此说明,尽管(7)式中的地径模型和树高模型最为简单,但拟合效果反而比复杂的模型要好。根据(7)式的拟合结果,可以得到以下一组相容性材积表系列模型:

表3 不同联立方程组模型的统计指标

模型	方程	R^2	SEE	$TRE/\%$	$MSE/\%$	$MPE/\%$	$MPSE/\%$
(7)	D_0	0.954 1	3.15	-0.23	0.06	1.53	8.65
	H	0.855 1	2.44	-0.32	-1.28	2.28	13.59
	V_0	0.750 6	0.21	-2.53	4.76	7.39	25.78
	V_1	0.965 2	0.11	0.16	0.08	3.66	14.80
	V_2	0.995 6	0.04	-0.30	1.01	1.31	6.02
(8)	D_0	0.954 1	3.15	-0.33	0.26	1.54	8.72
	H	0.854 1	2.45	0.67	0.55	2.29	13.51
	V_0	0.769 1	0.21	2.60	10.27	7.11	27.98
	V_1	0.964 5	0.11	4.37	5.53	3.70	15.69
	V_2	0.994 6	0.04	3.11	3.72	1.43	6.80
(9)	D_0	0.954 1	3.15	0.32	0.87	1.54	8.74
	H	0.858 6	2.41	-0.04	-0.05	2.25	13.18
	V_0	0.753 5	0.21	-4.38	2.07	7.35	24.84
	V_1	0.964 8	0.11	-1.14	-0.56	3.66	14.55
	V_2	0.988 1	0.06	-0.68	-0.90	2.14	8.42
(10)	D_0	0.954 1	3.15	0.36	0.93	1.54	8.75
	H	0.857 9	2.42	-0.11	-0.57	2.26	13.24
	V_0	0.748 5	0.22	-4.67	1.57	7.42	24.79
	V_1	0.964 5	0.11	-1.31	-0.93	3.67	14.57
	V_2	0.988 1	0.06	-0.91	-0.90	2.14	8.39

注: D_0 - 地径方程; H - 树高方程; V_0 - 地径一元材积方程; V_1 - 胸径一元材积方程; V_2 - 二元材积方程。

$$\begin{aligned}
 V_2 &= 0.000\ 062\ 40D^{1.852}H^{1.008} \\
 V_1 &= 0.000\ 092\ 60D^{2.611} \\
 V_0 &= 0.000\ 044\ 97D_0^{2.611} \\
 H &= 1.48D^{0.754} \\
 D_0 &= 1.32D
 \end{aligned}
 \quad (21)$$

需要指出的一点是,(21)式中的地径模型在实际应用中更多是利用地径按 $D=0.758 D_0$ 来推算胸径。如果独立拟合胸径与地径的无截距线性回归模型,则其结果为 $D=0.750 D_0$,与(21)式的结果大约相差1%。在实际应用中胸径和地径哪个是自变量、哪个是因变量很难定论,如果不考虑其它因素,建立二者之间的回归关系最好采用对偶回归技术^[23]。考虑到地径的测量误差通常大于胸径,建立由胸径推算地径的回归模型是合适的。因此,(21)式中的参数1.32应该更能客观地表述胸径和地径之间的数量换算关系,将其反过来推算胸径所产生的影响可以忽略不计。

从表3的统计指标可以看出,(21)式所表述的二元材积表、胸径一元材积表和地径一元材积表的平均预估误差 MPE 分别为1.31%、3.66%和7.39%,说明其总体预估精度可分别达到98%、96%和92%以上。当然这只是针对林木群体(如林分)材积估计的总体平均状况而言的。如果针对林木单株材积估计,则要考虑平均百分标准误差 $MPSE$ 这

一指标,3个材积方程的 $MPSE$ 分别为6.02%、14.80%和25.78%。不管是针对林木单株还是群体,其预估值也存在一定的置信区间,具体计算方法可参见文献[22],本文不予详述。

为了验证所建模型(21)式,用相关参考文献^[2,5,20]的杉木二元立木材积模型作简要对比分析。首先以本研究的建模样本实测值为对比基础,按部颁杉木二元材积式(一)、(二)和广东、贵州的杉木二元材积式来估算材积,总相对误差分别为1.48%、-5.32%、-4.24%和1.14%,部颁杉木二元材积式(一)和贵州的材积式误差在允许范围内,而部颁杉木二元材积式(二)和广东的材积式估计结果偏小,且超出3%的误差范围。然后再用参考文献[5]中的全部1840株样木实测数据为对比基础,按(21)式和贵州的材积式分别计算材积,总相对误差分别为-0.26%和-0.04%,几乎都接近于0,说明(21)式中的二元立木材积模型用于贵州是完全可行的。其它模型的实用性如何,有待于作进一步检验。

3 结论与讨论

本研究以我国南方地区的最重要针叶树种杉木为研究对象,采用误差变量联立方程组方法,建立了相容性二元立木材积方程、胸径和地径一元立木材积方程、树高胸径回归模型及地径胸径回归模型,解

决了系列材积模型之间不相容的问题。通过对3种树高模型和2种地径模型组合的4个材积表系列模型联立方程组的拟合结果进行对比分析,表明由最简单的树高模型和地径模型构成的相容性系列材积模型就能取得良好效果,其二元立木材积方程、胸径一元立木材积方程的平均预估误差分别为1.31%和3.66%,达到了二元材积表和一元材积表的预定精度要求,可用于不同森林调查的杉木林蓄积量估计;地径一元立木材积方程的平均预估误差为7.39%,相当于其预估精度能达到92%以上,可为林木盗伐案件中采伐木的材积估计提供计量依据。但是,所建模型只是我国杉木的总体平均模型,没有考虑地域分布之间的差异。如果要减少或消除地域差异带来的影响,可以将整个杉木分布区分成2个以上建模总体,再分别总体来建立相容性系列材积模型。

本文所述方法,适用于利用同一套样本编制二元和一元系列材积表的情形。但是,编制二元表和编制一元表是否适宜采用同一套样本,这一点尚未达成广泛共识。如果认为可以采用一套样本同时编制二元表和一元表,则可以采用本文所述方法,且该方法可以推广应用到其它树种相容性系列材积模型的建立。本文所述方法的核心是误差变量联立方程组的应用,只要研究对象的各个方程之间存在内在相关,就可以参照这一方法来建立相容性联立方程系统。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国林业部. 林业专业调查主要技术规定[S]. 北京:中国林业出版社,1990
- [2] 中华人民共和国农林部. 立木材积表(LY208—77)[S]. 北京:中国标准出版社,1978
- [3] 廖业佳,叶金盛,龙永彬. 尾叶桉类树种二元立木材积模型的编制[J]. 安徽农业科学, 2005, 33(9): 1633—1635
- [4] 叶金盛. 广东省湿地松二元立木材积模型的编制[J]. 广东林业科技, 2006, 22(2): 27—30
- [5] 岑巨延. 广西桉树人工林二元立木材积动态模型研究[J]. 华南农业大学学报, 2007, 28(1): 91—95
- [6] 章裕超,杜传奇,黄庆丰,等. 皖北杨树二元立木材积表的编制[J]. 林业科技开发, 2007, 21(2): 32—34
- [7] 侯长谋,叶金盛. 广东省杉木树种二元立木材积可变参数模型研究[J]. 林业资源管理, 2008(4): 64—69
- [8] 夏忠胜,朱松,张江平,等. 贵州省人工马尾松二元立木材积模型研究[J]. 林业资源管理, 2009(4): 30—34
- [9] 曾伟生. 西藏自治区一元立木材积模型的研究[J]. 中南林业调查规划, 2003, 22(2): 17—20
- [10] 曾伟生,陈雪峰. 论广西一元立木材积表的改进方法[J]. 中南林业调查规划, 2006, 25(2): 1—3
- [11] 李建斌. 四川巨桉短周期工业原料人工林一元材积表的编制[J]. 四川林业科技, 2007, 28(4): 113—114
- [12] 周旭,杜传奇,唐雪海,等. 杨树一元立木材积表的编制研究[J]. 安徽农业大学学报, 2008, 35(4): 486—489
- [13] 魏建祥,曾伟生. 论北京市一元立木材积表的数式化方法[J]. 林业资源管理, 2009(6): 44—45
- [14] 卢昌泰,冯永林,蒋成益. 盗伐立木材积测算方法及其应用[J]. 四川林业科技, 2005, 26(2): 84—87
- [15] 孙亚峰,尹立辉. 落叶松根径立木材积表的编制[J]. 长春大学学报:自然科学版, 2008, 18(3): 91—94
- [16] 黎良财,邓利. 柳州市马尾松地径一元材积表的编制[J]. 林业调查规划, 2011, 36(1): 1—3
- [17] 苏杰南,黎良财. 杉木人工林地径材积表编制方法研究[J]. 湖北农业科学, 2011, 50(16): 3342—3345
- [18] 曾伟生. 利用误差变量联立方程组建立一元立木材积模型和胸径地径回归模型[J]. 中南林业调查规划, 2012, 31(4): 1—4
- [19] 曾伟生. 论一元立木材积模型的研建方法[J]. 林业资源管理, 2004(1): 21—23
- [20] 夏忠胜,曾伟生,朱松,等. 贵州省人工杉木立木材积方程研建[J]. 北京林业大学学报, 2012, 34(1): 1—5
- [21] 唐守正,郎奎建,李海奎. 统计和生物数学模型计算(ForStat教程)[M]. 北京:科学出版社,2008
- [22] 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
- [23] 唐守正. 利用对偶回归和结构关系建立林分优势高和平均高模型[J]. 林业科学研究, 1991, 4(增刊): 57—62