

广西桉树人工林二元立木材积动态模型研究

岑巨延

(广西林业勘测设计院, 广西 南宁 530011)

摘要:以广西速生丰产桉树人工林 156 块样地的 305 株伐倒木数据为基础,运用现代建模思想和方法,优化模型结构,研究建立了速生丰产桉树人工林二元立木材积动态模型。经模型自检,总相对误差为 -0.2% ,平均相对误差为 -0.26% ,预估精度达 98.7% ;适用性检验,立木材积估计的总相对误差、平均相对误差均在 $\pm 1\%$ 以内,远小于规定的 $\pm 3\%$,满足林业数表建模要求。

关键词:桉树人工林;立木材积;动态模型

中图分类号:S758.62

文献标识码:A

文章编号:1001-411X(2007)01-0091-05

Study on Two-Way Tree Volume Dynamic Model of *Eucalyptus* Plantations in Guangxi

CEN Ju-yan

(Guangxi Forestry Survey & Design Institute, Nanning 530011, China)

Abstract:Based on the data of 305 sample trees in 156 standard plots of *Eucalyptus* plantations in Guangxi, the two-way tree volume dynamic model for *Eucalyptus* plantations was established by applying modern modeling theory. The result of self-test of the model shows that the total relative error is -0.2% , and the mean relative error is -0.262% , and the precision of estimates is up to 98.7% . The result of applicability test shows that the total relative error and the mean relative error are between $\pm 1\%$, far less than the permission of $\pm 3\%$.

Key words:*Eucalyptus* plantation; tree volume; dynamic model

尾叶桉 *Eucalyptus urophylla*、巨桉 *Eucalyptus grandis* 及其为亲本的巨尾桉、尾巨桉、尾园桉、尾赤桉等杂交无性系桉树是广西及华南地区桉树速生丰产人工林的主要栽培树种,其生长迅速、产量高,已成为我国华南地区工业原料林基地的当家树种^{[1]22-24}。2004年底,广西速生丰产桉树林面积已超过 40 万 hm^2 。由于经营数表模型研制工作跟不上,用其他树种数表模型代替,估测误差很大^{[1]280-283},研究表明,如用以往采用的广西桉树二元材积表(广西林业勘测设计院,广西农学院林学院。森林调查手册,1986)估测现有速生丰产桉树人工林的蓄积量,相对误差一般都超过 3%,最大的可超过 10%。因此,研制速生丰产桉树人工林立木材积数表模型,以

满足生产经营管理需要,已成为广西林业亟待解决的重大问题。立木材积表是重要的林业经营数表之一。自 19 世纪中叶始,人们就致力于建立立木材积模型的研究,基本上是采用目的抽样的方法,通过收集样本资料(样本数量一般在数百株至数千株),预先建立超抽样总体概念的通用性模型^{[2]4,[3-5]}。目前,已发表的二元立木材积模型有几十个,其中以山本式函数最为常用^[3-6],但大多立木材积模型在样本采集上都不同程度地存在盲目性、不均匀性、不正确性等问题^{[2]14-16,[4]};非线性模型采取对数线性化进行拟合常导致模型估计偏差等^{[2]23-24};采用多项式逼近方法建模的,常导致模型病态^[6];分段拟合常导致相邻模型之间出现交叉矛盾等^[6]。本研究在吸收国内外

收稿日期:2006-04-13

作者简介:岑巨延(1964—),男,高级工程师,硕士,E-mail:yancen820@sina.com

基金项目:广西“十五”林业科技攻关项目(2002-54)

已有的研究成果基础上,重点探索:(1)通过合理配置较少的样本量建立优质的立木材积模型;(2)通过引入可变参数建立动态模型,以反映立木材积随胸径、树高的复杂变化规律,提高模型精度。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

项目研究区域为桉树速生丰产人工林在广西的适生区——桂中以南大部分地区,东西横跨590 km(东经 $106^{\circ}35' \sim 111^{\circ}25'$),南北纵越390 km(北纬 $21^{\circ}18' \sim 24^{\circ}50'$)。根据地理位置可划分为沿海区、桂南区、桂东南区、桂西南区、桂中区,各分区年平均气温在 $18 \sim 23^{\circ}\text{C}$,最冷月(1月)平均气温 $10 \sim 15^{\circ}\text{C}$,最热月(7月)平均气温在 28°C 左右。全区地貌形态有盆地、边缘山地,盆地内的弧形山地,弧形山脉内外侧是丘陵、台地、平原、小盆地、谷地。桉树速生丰产人工林分布地土壤多为砖红壤、赤红壤、红壤、山地红壤,亦有部分是紫色土、滨海盐土和风沙土。pH $3.6 \sim 6.5$,土壤肥力一般在中等以上。

1.2 材料选择标准与条件

采用模型解释变量数据全面覆盖、定点均匀配置的方法选定样本。二元立木材积模型的样本选取主要考虑径幅分布和高径比这2个因素,通过这2个因素控制,实现样本在各径阶取样点的不同树高级上的均匀分布。

①径幅分布和径阶:根据研究区已有的标准地调查材料,桉树速生丰产人工林的胸径分布范围为 $6 \sim 30\text{ cm}$,根据径阶分布,选取 $6、10、14、18、22、26、30\text{ cm}$ 等7个取样径阶点位。

②高径比:即样本树高与胸径的比值。根据已有的标准地调查资料,桉树速生丰产人工林的高径比范围在 $0.8 \sim 1.7$,再考虑高径比向两端的延伸性,则

各径阶取样点的大、中、小3个档次高径比取样范围确定如表1。

表1 样木的3个高径比取样范围

Tab.1 Three different groups of height to diameter ratio

取样径阶 diameter	H : D		
	小 small	中 middle	大 large
6	<1.42	1.42 ~ 1.78	>1.78
10	<1.23	1.23 ~ 1.50	>1.50
14	<1.11	1.11 ~ 1.32	>1.32
18	<1.04	1.04 ~ 1.23	>1.23
22	<0.96	0.96 ~ 1.11	>1.11
26	<0.96	0.96 ~ 1.11	>1.11
30	<0.96	0.96 ~ 1.11	>1.11

1.3 材料收集方法

根据上述材料选择标准,在5个样本采集区域(沿海区、桂南区、桂西南区、桂东南区、桂中区)中的好、中、差3个生长类型等级,密、中、疏3个密度等级的林分中取样,在每个不同类型的林分中选取生长正常的样本 $4 \sim 5$ 株,一般选取林分平均木为样本,极值样本(胸径特别大的、高径比特别大或特别小的)则要从林分优势木、林分边缘木中选取,确保样本在各取样点均匀分布。

1.4 材料处理方法

调查样本被伐倒并测量树高(H)后,将树干等分为10段并用围径尺测定各段的分接处、胸高处(1.3 m处)、第一段中部的带皮直径,计算各部位的断面积($G_0、G_{0.5}、G_1、G_2 \cdots G_9$),然后根据以下算式计算单株木材积(V): $V = (G_0/4 + G_{0.5}/2 + 3G_1/4 + G_2 + G_3 + G_4 + G_5 + G_6 + G_7 + G_8 + G_9/6)H/10$,绘制胸径(D)与材积、树高与材积、 D^2H 与材积散点图进行分析(图1),没有发现有异常的样本数据。

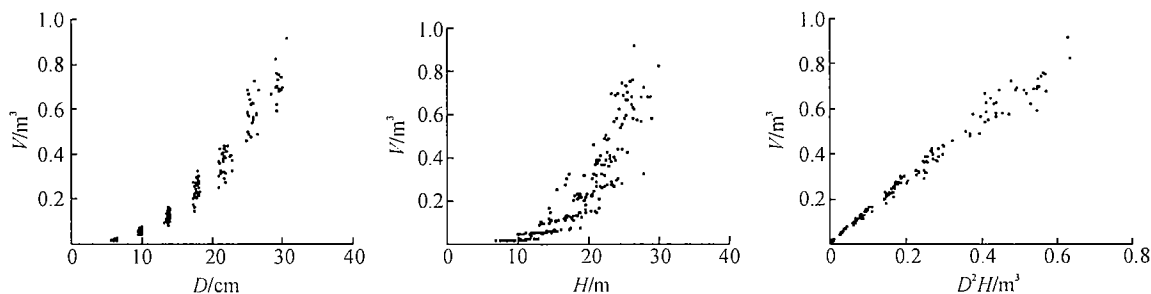


图1 桉树立木胸径(D)、树高(H)、 D^2H 与主干材积(V)散点图

Fig.1 Scatterplots between *Eucalyptus* volume (V) and diameter(D), height(H), D^2H

1.5 模型拟合方法

相关研究^[6]表明,在胸径和树高二元控制的条件下,材积方差随 D^2H 的增大而增大的规律是客观

存在的。为了将所有建模样本单元同等对待,消除模型中可能存在的异方差,采用 $w = 1/(D^2H)^2$ 为权函数的加权最小二乘法求解模型参数^{[2]24, [6-7]};本研究

采用 Microsoft Visual FoxPro 6.0 数据处理系统为开发平台,以二元材积基本数学模型、 $w = 1/(D^2H)^2$ 为权函数的加权最小二乘法为核心,研究建立数表模型拟合系统,利用该系统进行数表模型的结构选定、参数拟合以及数表模型的检验。

2 结果与分析

2.1 建模样本组织

为了保证广西桉树速生丰产人工林立木材积模型在研究区各区域的适用性,在样本组织方面,尽可能扩大样本变量(胸径、树高)的覆盖范围,以控制变量间相关规律的完整性、真实性和稳定性,为提高模型的预估精度、缩小模型应用的外推偏差打下基础。为此,根据已有的桉树速生丰产人工林立木样本资料,依据样本在变量变幅范围内全部覆盖、均匀取样的原则,确定取样范围:按胸径分为 6、10、14、18、22、26、30 cm 共 7 个取样点,在每点位取样时尽可能按确定的高径比分大、中、小选取样木,原则上要求每个胸径取样点取样量为 30 株,实际调查在上述取样点共取得样本 273 株(另外还收取了不在取样点位上的样本 32 株作为模型检验的补充样本),选取其中的 198 株作为建模样本,7 个径阶的株数分别为 33、30、30、32、28、23、22 株。建模样本分布如表 2。

2.2 模型建立与优化

2.2.1 模型基本结构选定 二元材积模型是以胸径、树高作为自变量,立木主干材积为因变量的相关关系式。作为通用性预测模型的结构选定,除了要比一般回归模型质量判别指标(剩余方差和 Q 与剩

表 2 建模样本数量分布
Tab. 2 The amount of sample trees

取样径阶 diameter/cm	总株数 total	3 组高径比的样本株数 sample amount of three groups of H/D		
		小 small	中 middle	大 large
6	33	11	11	11
10	30	10	10	10
14	30	10	10	10
18	32	8	12	12
22	28	8	13	7
26	23	10	9	4
30	22	10	7	5
合计 total	198	67	72	59

余标准差 S 要尽量小,复相关系数 R 要尽量大)外,还要有良好的参数稳定性(参数变动系数 $< 50\%$)、良好的残差分布随机性和良好的模型外推性能^{[2]6-33, [8-9]}。为了确保模型的外推性能,要尽量选用其参数具有生物学意义的函数模型,即模型参数具有可解释性。常用的二元立木材积数学模型有 14 个^{[1]274-283, [6]},通过模型拟合系统对相关数学模型采用麦夸尔特迭代法分别、反复进行拟合,根据模型质量指标判断,发现效果较好的是以下 3 个函数模型:

$$V = c_0 + c_1H + c_2D^2, \quad (1)$$

$$V = c_0 + c_1D^2 \times H, \quad (2)$$

$$V = c_0D^{c_1}H^{c_2}, \quad (\text{山本式}) \quad (3)$$

其中, c_0 、 c_1 、 c_2 为模型参数。从表 3 所示的模型拟合结果看,拟合效果最好的是式(3),即山本式,其复相关系数最大,剩余方差和、剩余标准差、参数变动系数最小;拟合结果残差图(图 2)也显示山本式拟合效果最好。

表 3 模型拟合初步结果

Tab. 3 Elementary results of modeling

模型编号 model's number	参数 parameters			Q	S	R	参数变动系数 coefficients of variation/%		
	c_0	c_1	c_2				v_{c_0}	v_{c_1}	v_{c_2}
(1)	$-2.058\ 73 \times 10^{-2}$	$9.487\ 30 \times 10^{-4}$	$7.308\ 77 \times 10^{-4}$	0.598 81	0.054 99	0.969 82	10.86	27.01	2.02
(2)	$3.770\ 73 \times 10^{-3}$	$3.494\ 95 \times 10^{-5}$		0.186 50	0.030 61	0.986 74	6.45	0.69	
(3)	$6.342\ 38 \times 10^{-5}$	1.810 72	0.992 82	0.125 85	0.025 40	0.993 61	5.12	1.43	3.78

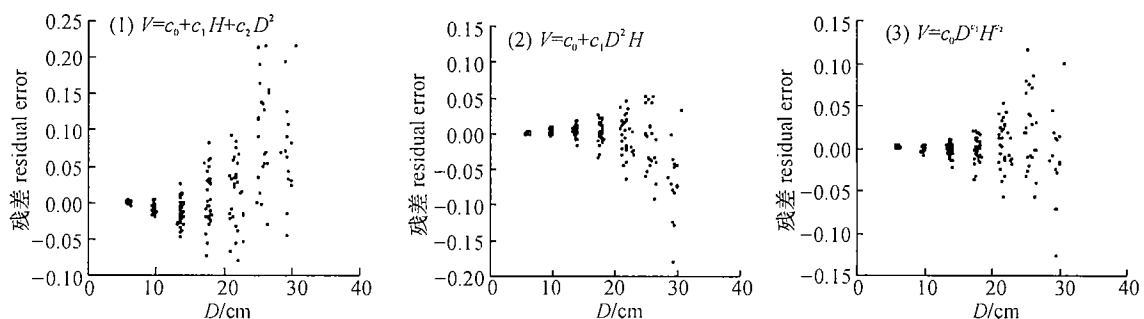


图 2 主干材积模型残差随胸径(D)的分布

Fig. 2 Scattergram of model's residual errors according to diameter(D)

2.2.2 模型结构优化和模型参数拟合 为了提高模型精度,本研究通过引入可变参数对山本式模型进行优化,建立动态模型,以反映立木材积随胸径、树高的复杂变化规律.相关资料^{[1]103-105,[6]}证明,树干材积随胸径和树高而变化的变化率与2个自变量的量值相关.根据分7个径阶和6个树高阶对所建的山本式模型的参数分析可知,参数 c_1 、 c_2 与 D 及 H 大体呈线性相关,模型为:

$$c_1 = 2.012\ 04 - 0.0160\ 67D,$$

$$c_1 = 1.994\ 60 - 0.0126\ 88H;$$

$$c_2 = 0.818\ 00 + 0.0147\ 60D,$$

$$c_2 = 0.818\ 15 + 0.0120\ 83H;$$

并且,参数 c_1 与 D 、 H 呈负相关,变化率比较接近;参数 c_2 与 D 、 H 呈正相关,其变化率也比较接近.因而,可以确定二元材积动态模型的合理结构式为:

$$V = c_0 D^{[c_1 - c_2(D+H)]} H^{[c_3 + c_4(D+H)]}.$$

利用建模样本数据,通过计算机模型拟合系统对上述数学模型采用麦夸尔特迭代法拟合模型,模型参数估计值分别为: $c_0 = 1.091\ 54 \times 10^{-4}$, $c_1 = 1.878\ 92$, $c_2 = 5.691\ 86 \times 10^{-3}$, $c_3 = 0.652\ 598$, $c_4 = 7.847\ 54 \times 10^{-3}$.

模型拟合效果指标为: $Q = 0.124\ 31$, $S = 2.537\ 95 \times 10^{-2}$, $R = 0.993\ 66$;参数变动系数为: $v_{c_0} = 14.86\%$, $v_{c_1} = 3.74\%$, $v_{c_2} = 34.42\%$, $v_{c_3} = 18.01\%$, $v_{c_4} = 26.40\%$.

2.3 模型检验

2.3.1 检验指标 除了 Q 、 S 、 R 和参数可解释性等指标外,还要考虑参数的稳定性和残差分布的随机性.对于以预测为目的的二元立木材积模型,另外还要考察总相对误差(RS)、平均相对误差(E)、平均相对误差绝对值(RMA)和预估精度(P)这4项指标^{[2]30-33,[8-9]}.

2.3.2 检验方法 (1)自检:即利用建模样本整体数据对模型进行检验,以及将样本按主要解释变量的变化幅度,分为数个区段对模型进行检验,检验的主要指标有RS、 E 、 P 等,其中的 $|RS| \leq 3\%$, $|E| \leq 3\%$, $P \geq 97\%$ ^{[2]269-278,[10]}. (2)适用性检验:在建模单元内立地条件极好和立地条件差的地区分别收集2套检验样本,计算总相对误差、平均相对误差是否在 $\pm 3\%$ 以内^{[2]269-278,[10]}.

2.3.3 自检结果 从拟合结果可知,模型的相关系数很高,而且参数稳定(变动系数均在50%以下),残差分布图也呈现随机性分布(图3、图4).另外4项

指标的检验结果为:RS = -0.20%, $E = -0.26\%$, RMA = 5.14%, $P = 98.71\%$.通过分树种(尾叶桉、巨桉、巨尾桉、尾巨桉、以尾叶桉和巨桉为亲本的其他杂交桉)、分区域和胸径分段检验,其RS、 E 均在 $\pm 3\%$ 以内,说明模型对这5个树种(组)的通用性都很强.

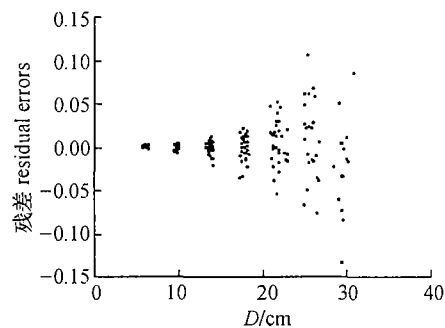


图3 主干材积山本式动态模型残差随胸径(D)分布

Fig.3 Scattergram of dynamic model's residual errors according to diameter(D)

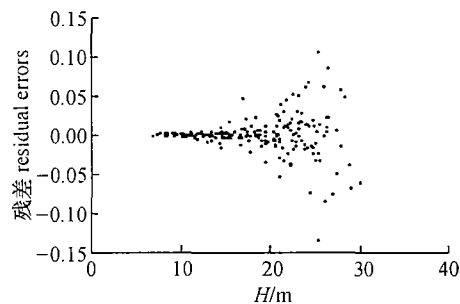


图4 主干材积山本式动态模型残差随树高(H)分布

Fig.4 Scattergram of dynamic model's residual errors according to height(H)

2.3.4 适用性检验结果 为了检验模型的使用精度,另外组织了2套检验样本,其中一套样本取自广西邕宁县苏圩镇个体林场立地条件好的标准地数据,共有样木48株,其中6径级8株、10径级9株、14径级9株、18径级8株、22径级6株、26径级5株、30径级3株;另一套取自广西来宾市铁帽山林场立地条件差的标准地数据,共59株样木,分布于6、8、10、12、14、16、18、20、22共9个径阶中.利用2套检验样本对模型进行使用精度检验,其RS和 E 均在 $\pm 1\%$ 以内,远小于规定的 $\pm 3\%$,效果良好.

3 结论

(1)本研究通过对样本胸径和高径比这2个因素控制,其中胸径设7个取样点位,高径比设大、中、小3个取样区间,实现样本在立木主干材积的解释变量胸径、树高上的全面覆盖、定点均匀配置,使样

本构成有效地表现立木主干随胸径、树高的变化规律,实现了以较小的样本量建立高质量模型的目的。

(2)本研究根据胸径(D)和树高(H)二元控制条件下的材积方差随 D^2H 的增大而增大的规律,采用 $w = 1/(D^2H)^2$ 为权函数的加权最小二乘法求解模型参数,消除不等方差在建模中的影响,使模型总相对误差(-0.20%)远小于规定的 $\pm 3\%$ 。

(3)通过分析固定参数模型的参数与解释变量(D 、 H)的相关性,引入可变参数改进传统的模型结构,建立桉树速生丰产人工林二元立木材积动态模型,有效地提高了模型的预估精度,使动态模型具有更强的切合性和外推性能。

(4)广西桉树速生丰产人工林二元立木材积预估模型质量最好的是山本式可变参数动态模型($V = c_0 D^{[c_1 - c_2(D+H)]} H^{[c_3 + c_4(D+H)]}$),其中: $c_0 = 1.091\ 54 \times 10^{-4}$, $c_1 = 1.878\ 92$, $c_2 = 5.691\ 86 \times 10^{-3}$, $c_3 = 0.652\ 598$, $c_4 = 7.847\ 54 \times 10^{-3}$),其检验分析结果表明,模型整体和各类分段检验总相对误差、平均相对误差均小于 $\pm 3\%$,预估精度大于97%,残差分布良好。能确保模型在广西桉树速生丰产人工林适生区范围内应用达到规定的精度要求。模型的应用,对准确、快速地进行林木材积测算,有效地进行桉树速生丰产人工林林木资源管理,促进桉树速生丰产人工林营林工

程建设具有十分重要的作用。

参考文献:

- [1] 祁述雄. 中国桉树[M]. 北京:中国林业出版社, 2002.
- [2] 骆期邦, 曾伟生, 贺东北. 林业数表模型—理论、方法与实践[M]. 长沙:湖南科学出版社, 2001.
- [3] 骆期邦, 贺东北, 宁辉, 等. 立木材积表编制方法的研究[J]. 中南林业调查规划, 1992, 11(1): 28-38.
- [4] 贺东北, 曾伟生, 骆期邦, 等. 通用性二元立木材积模型的建模样本研究[J]. 中南林业调查规划, 2001, 20(1): 1-9.
- [5] 骆期邦. 立木材积表编制和应用中存在的一些理论和方法问题探讨[J]. 中南林业调查规划, 1985, 4(3): 1-6.
- [6] 骆期邦, 宁辉, 贺东北, 等. 二元立木材积动态模型研究[J]. 林业科学研究, 1992, 5(3): 263-270.
- [7] 曾伟生. 关于加权最小二乘法中权函数的选择问题[J]. 中南林业调查规划, 1996, 15(1): 54-55.
- [8] 刘璋温, 吴国富. 选择回归模型的几个准则[J]. 数学的实践与认识, 1983, 13(1): 61-69.
- [9] 钟义山. 回归模型优劣评价的几个问题[J]. 中南林业调查规划, 1992, 11(4): 10-14.
- [10] 中华人民共和国林业部. 林业专业调查主要技术规定[M]. 北京:中国林业出版社, 1990: 88-90.

【责任编辑 李晓卉】

欢迎订阅 2007 年《华南农业大学学报》

《华南农业大学学报》是华南农业大学主办的综合性农业科学学术刊物。本刊主要报道农业各学科的科研学术论文、研究简报、综述等,设有农学·园艺·土壤肥料、植物保护、生物学、林业科学、动物科学与兽医学、农业工程与食品科学、信息科学、基础科学、综述、简报等栏目。本刊附英文目录和英文摘要。读者对象主要是农业院校师生、农业科研人员和有关部门的专业干部。

本刊为《中国科学引文数据库》、《中国科技论文统计源(中国科技核心期刊)》及《中国学术期刊综合评价数据库》固定刊源,并排列在中国科学引文数据库被引频次最高的中国科技期刊 500 名以内。被《中文核心期刊要目总览》遴选为综合性农业科学核心期刊、植物保护类核心期刊。为美国《化学文摘》、美国《剑桥科学文摘:生物技术与生物工程》、俄罗斯《文摘杂志》、英国《CABI》、英国《动物学记录》、《中国生物学文摘》及国内所有农业文摘期刊等国内外多家著名文摘固定刊源。

国内外公开发行、季刊、A4 幅面。每期 124 页,定价 5.00 元,全年 20.00 元、自办发行,参加全国非邮发报刊联合征订发行,非邮发代号:6573。

订阅办法:订阅款邮汇至:300385 天津市大寺泉集北里别墅 17 号,全国非邮发报刊联合征订服务部。

《华南农业大学学报》编辑部