

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20150108

# 华北地区栓皮栎根径相关模型及材积表研建

郑聪慧 贾黎明 孙操稳 魏松坡 段 劼

(北京林业大学林学院, 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室)

**摘要:**基于华北地区 149 株栓皮栎解析木的数据,先建立了 3 个表现良好的独立模型,包括带皮胸径-去皮根径线性模型、带皮胸径-树高幂函数模型和基于自然对数转换变量的带皮胸径、树高-去皮材积线性模型。之后基于这 3 个独立模型,运用误差变量联立方程组的方法建立了 1 个相容性根径-胸径-树高-材积模型系统,并由此得到基于根径、胸径和胸径树高的相容材积式(表)。相容性模型系统中,各模型的 6 项统计指标、模型残差图、Shapiro Wilk 检验及独立数据检验结果表明:各模型均无异方差现象,模型残差服从正态分布,且各模型在拟合阶段和检验阶段的残差范围都较因变量的范围窄。上述材积式(表)的精度在 96.9% 以上,可用于华北地区栓皮栎林木材积的估测,且为华北地区栓皮栎林区解决和处理盗伐、滥伐案件提供依据。带皮胸径-树高模型作为森林生长与收获模型系统的一个重要组分,可被用来在已知胸径的情况下推算平均树高,进而推算森林蓄积量和生物量等因子,对森林调查具有重要意义。本研究建立的模型及数表仅适用于胸径范围在 5~21 cm 之间的华北地区栓皮栎树木的估测。

**关键词:**栓皮栎; 根径-立木材积表; 根径-胸径模型; 胸径-树高模型; 相容性模型

**中图分类号:**S758.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2015)11-0026-07

ZHENG Cong-hui; JIA Li-ming; SUN Cao-wen; WEI Song-po; DUAN Jie. **Establishment of basal diameter relevant models and volume table for *Quercus variabilis* in northern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2015)37(11) 26-32 [Ch, 19 ref.] College of Forestry, Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing, 100083, P. R. China.

Based on the data of 149 analytical sample trees, we established three well-performed independent models: 1) a linear model between diameter at breast height outside bark ( $DBH_{ob}$ ) and basal diameter inside bark ( $BD_{ib}$ ) ( $DBH_{ob}-BD_{ib}$ ), 2) a power function model between  $DBH_{ob}$  and tree height ( $H$ ) ( $DBH_{ob}-H$ ), and 3) a linear model between  $DBH_{ob}$ ,  $H$  and volume inside bark ( $V_{ib}$ ) ( $DBH_{ob}, H-V_{ib}$ ) based on the variables after natural logarithmic transformation. Then, based on these three independent models, a compatible  $BD_{ib}-DBH_{ob}-H-V_{ib}$  model system was established with the method of simultaneous equations with error variables, and thus compatible volume equations (table) based on  $BD_{ib}-DBH_{ob}$  and  $DBH_{ob}-H$  were obtained. According to the results of six statistical indexes, residual plots, Shapiro Wilk tests and independent data tests for each model, heteroscedasticities were not detected in these models and residuals of these models followed a normal distribution. Ranges of residuals of these models in fitting

收稿日期: 2015-04-07 修回日期: 2015-05-18

**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(SYSB12009)、国家林业局林业科技成果推广项目(2011-44)、985 优势学科创新平台开放基金项目(000-1108003)、林业公益性行业科研专项(201004021)。

**第一作者:**郑聪慧, 博士。主要研究方向: 森林生长与收获模型。Email: zch2006341@163.com 地址: 100083 北京市海淀区清华东路 35 号北京林业大学林学院。

**责任作者:**贾黎明, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林培育理论与技术、城市林业和树木生理生态。Email: jlm@bjfu.edu.cn 地址: 同上。

**本刊网址:** <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

and testing phases were very narrow, compared with the ranges of dependent variables. The volume table had promising precisions, thus they could be used for estimating *Quercus variabilis* volume and can provide support for dealing with illegal logging or deforestation cases of cork oak forests in northern China. As an important component of forest growth and yield model system,  $DBH_{ob}-H$  model can be used to estimate average tree height given a known  $DBH_{ob}$ , and on this basis, forest volume and biomass could be calculated eventually. Therefore, the  $DBH_{ob}-H$  model is very important in forest survey. We should point out that models established in this study are only applicable for cork oak trees in northern China with a  $DBH_{ob}$  range of 5–21 cm.

**Key words** *Quercus variabilis*; basal diameter-volume table; basal diameter-diameter at breast height model; diameter at breast height-tree height model; compatible model

林业执法机关在处理乱砍滥伐、盗伐林木案件时,经常需对被伐木材积作出估计。由于不能得到胸径和树高的数值,以往一元或二元立木材积表(或模型)不能用于材积的测算,因此通过根径来推算被伐木体积非常必要,编制根径立木材积表可为此类事件的立案和量刑提供重要依据<sup>[1-2]</sup>。

目前,许多学者已对落叶松(*Larix gmelinii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、柞木(*Quercus* spp.)、马尾松(*Pinus massoniana*)根径立木材积表(或模型)进行了研究<sup>[1, 3-11]</sup>。上述研究根据其所用方法可分为 2 类:1) 建立根径-材积模型,由此直接推算得到根径立木材积表<sup>[10]</sup>; 2) 建立根径-胸径模型、胸径-树高模型(根径-树高模型),再结合一元胸径材积表(或模型)或二元胸径、树高材积表(或模型),间接推算得到根径立木材积表<sup>[1, 3-9, 11]</sup>。栓皮栎(*Quercus variabilis*)作为华北地区的一个重要组成树种,未见类似报道。本研究旨在运用上述第(2)类方法建立基于根径、胸径及胸径和树高的相容性材积式(表)。

## 1 数据来源

在华北地区一些代表性较强的林场中做 149 株栓皮栎解析木(具体为山西中条山地区的皋落林场 32 株、祁家河林场 2 株、北坛林场 7 株和横河林场 4 株;河北邢台大戈廖村集体林 56 株;北京平谷四座楼林场 48 株)。其中,64 株解析木来自栓皮栎人工林,85 株解析木来自栓皮栎天然林。树木伐倒后,先测量各株解析木的树高( $H$ );之后各株解析木以 1 m 为 1 个区分段,在各段中央部位分别截取圆盘;对于长度不足 1 m 的剩余树干(梢头),于梢头底部截取圆盘;此外,于根颈处(离地面 0 m 位置)和胸高处也分别截取一个圆盘,测得树木去皮根径( $BD_{ib}$ )和带皮胸径( $DBH_{ob}$ )。各圆盘以 5 年为 1 个龄阶,查数年轮数,测量平均直径。运用中央断面积区分求积式计算各株解析木的去皮材积( $V_{ib}$ )。运用其中 117 株树木的数据进行建模,剩余 32 株树木的数据用于后边模型的检验。建模数据和检验数据的基本信息见表 1。

表 1 建模变量的变化范围

Tab. 1 Ranges of modelling variables

数据组	解析木数目	带皮胸径	树高	去皮根径	去皮材积
Data sets	Analytic tree number	Diameter at breast height outside bark ( $DBH_{ob}$ )/cm	Tree height ( $H$ )/m	Basal diameter inside bark ( $BD_{ib}$ )/cm	Stem total volume inside bark ( $V_{ib}$ )/m <sup>3</sup>
建模数据	117	5.2 ~ 20.9	6.3 ~ 16.0	5.9 ~ 21.0	0.006 ~ 0.161
Fitted data set		(12.8)	(10.6)	(12.7)	(0.052)
检验数据	32	5.9 ~ 22.6	6.3 ~ 16.0	6.4 ~ 23.1	0.007 ~ 0.188
Tested data set		(13.2)	(11.2)	(13.1)	(0.059)

注:括号内数值为相应变量的均值。Note: data in brackets is mean value of corresponding variable.

## 2 研究方法

首先,运用 R<sup>[12]</sup> 软件建立 3 个独立模型,包括

带皮胸径-去皮根径模型、带皮胸径-树高模型和带皮胸径、树高-去皮材积模型。其中,不同形式的非线性带皮胸径-树高模型在最优模型选择时,是基

于易在 R 软件中得到的赤池信息量值(AIC)和贝叶斯信息量值(BIC)的;之后,以上述独立模型为基础,在 ForStat 软件中运用误差变量联立方程组的方法建立相容性根径-胸径-树高-材积模型系统<sup>[3,13]</sup>;最后根据相容性模型结果,得到适用于华北地区栓皮栎的材积表。

## 2.1 独立模型的选建

带皮胸径-去皮根径模型( $DBH_{ob} - BD_{ib}$ )选用线性方程<sup>[3]</sup>(式(1));带皮胸径-树高模型( $DBH_{ob} - H$ )备选幂函数方程、理论方程或抛物线方程(式(2)~(6));为了克服异方差,带皮胸径、树高-去皮材积模型( $DBH_{ob}, H - V_{ib}$ )选用基于自然对数转换变量的线性方程(式(7)):

线性方程:

$$BD_{ib} = b_1 + b_2 \cdot DBH_{ob} \quad (1)$$

幂函数方程:

$$H = b_1 \cdot DBH_{ob}^{b_2} \quad (2)$$

舒马赫方程:

$$H = 1.3 + b_1 \exp(-b_2/DBH_{ob}) \quad (3)$$

堪派兹方程:

$$H = 1.3 + b_1 \exp(-b_2 b_3^{DBH_{ob}}) \quad (4)$$

逻辑斯蒂方程:

$$H = 1.3 + b_1 / (1 + \exp((b_2 - DBH_{ob})/b_3)) \quad (5)$$

抛物线方程:

$$H = b_1 + b_2 \cdot DBH_{ob} + b_3 \cdot DBH_{ob}^2 \quad (6)$$

线性方程:

$$\ln V_{ib} = b_1 + b_2 \ln DBH_{ob} + b_3 \ln H \quad (7)$$

式中: $BD_{ib}$ 是去皮根径,cm; $DBH_{ob}$ 是带皮胸径,cm; $H$ 是树高,m; $V_{ib}$ 是去皮材积, $m^3$ ;  $b_1 \sim b_3$ 是参数。

对于带皮胸径-树高模型,通过比较式(2)~(6)的 AIC、BIC、带有 loess 线的残差分布图,选择具有较小的 AIC、BIC 及无偏差的模型作为最优模型。残差图的 loess 线在 0 水平轴附近波动,表明模型无偏<sup>[14]</sup>。

对于选出的 3 个独立模型,尝试将定义林分起源的哑变量 NATURAL 以线性模型形式或幂函数形式引入到原模型参数中,NATURAL 等于 1 时为天然林,等于 0 时为人工林。保留变量 NATURAL 与否取决于  $t$  检验结果( $P > 0.05$  时,剔除变量)。

## 2.2 相容性根径-胸径-树高-材积模型系统的建立

基于独立模型,运用误差变量联立方程组的方法建立相容性根径-胸径-树高-材积模型系统<sup>[3,13]</sup>。方程组形式为:

$$\begin{aligned} BD_{ib} &= f(DBH_{ob}) \\ H &= f(DBH_{ob}) \\ V_{ib} &= f(DBH_{ob}, H') \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $H'$ 是树高模型的估计值。各模型形式与即将选出的最优独立模型相同。

## 2.3 相容性根径-胸径-树高-材积模型的检验

基于建模数据,计算方程组中 3 个模型的决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、总相对误差(TPE)、平均系统误差( $E$ )、平均预估误差(MPE)和平均百分标准误差(MPSE),这 6 项统计指标的公式见文献[15-16]。观察模型的带有 loess 线的残差分布图以确认其是否存在异方差现象及模型是否有偏。对模型残差进行 Shapiro Wilk 检验,判断模型残差是否服从正态分布,Shapiro Wilk 检验的  $P > 0.05$  表示模型残差服从正态分布。之后,基于独立数据对模型作进一步检验,对比各模型在拟合阶段和检验阶段的残差图散点分布、拟合值范围与残差值范围。

## 3 结果与分析

### 3.1 独立模型

运用式(2)~(6)分别建立带皮胸径-树高模型,由表 2 可知,幂函数模型的 AIC 和 BIC 最小,且该模型残差图的 loess 线在 0 水平轴附近波动,表明模型无偏(由于篇幅所限,此处残差图略),故带皮胸径-树高模型( $DBH_{ob} - H$ )选用幂函数方程作为最优方程。之后,在最优独立模型方程(1)、(2)和(7)中,以线性函数形式或幂函数形式引入哑变量 NATURAL 后,该变量均不显著,故本研究最终没有在模型中引入这个哑变量。

表 2 不同形式胸径-树高模型比较

Tab. 2 Comparisons for several diameter-height models

模型 Model	AIC	BIC
幂函数方程 Power function equation	402.564	410.851
舒马赫方程 Schumacher equation	410.549	418.836
堪派兹方程 Compertz equation	403.446	414.494
逻辑斯蒂方程 Logistic equation	408.712	416.998
抛物线方程 Parabola equation	403.286	414.335

### 3.2 相容性根径-胸径-树高-材积模型系统

按照式(8),运用误差变量联立方程组的方法建立相容性根径-胸径-树高-材积模型系统,其结果见表 3。表 3 中, $P$  来自 Shapiro Wilk 检验,其中,

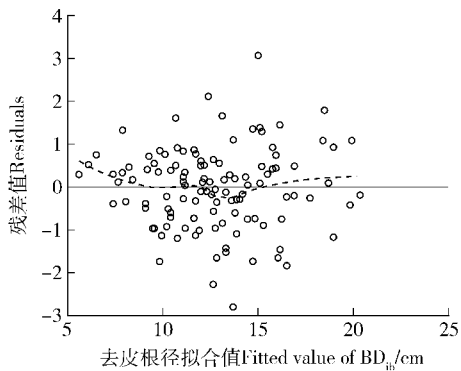
表 3 相容性根径-胸径-树高-材积模型结果

Tab. 3 Summaries of compatible  $BD_{ib} - DBH_{ob} - H - V_{ib}$  model

项目 Items	$DBH_{ob} - BD_{ib}$	$DBH_{ob} - H$	$DBH_{ob}, H - V_{ib}$
$b_1$	0.706	2.724	-10.447
$b_2$	0.941	0.538	2.004
$b_3$			0.955
$P$	0.681	0.482	0.865
$R^2$	0.918	0.568	0.935
均方根误差 RMS error (RMSE)	0.944	1.329	0.009
总相对误差 Total relative error(TPE)/%	-0.007	-0.010	-0.031
平均系统误差 Average systematic error( $E$ )/%	0.093	0.031	1.010
平均预估误差 Mean prediction error(MPE)/%	1.343	2.264	3.080
平均百分标准误差 Mean percent standard error (MPSE)/%	5.916	10.457	14.056
拟合值范围 Ranges for fitted values	5.602 ~ 20.380 (拟合阶段 Fitting phase); 6.261 ~ 21.980 (检验阶段 Testing phase)	6.613 ~ 13.980 (拟合阶段 Fitting phase); 7.078 ~ 14.580 (检验阶段 Testing phase)	0.004 ~ 0.159 (拟合阶段 Fitting phase); 0.006 ~ 0.194 (检验阶段 Testing phase)
残差值范围 Ranges for residuals	-2.798 ~ 3.084 (拟合阶段 Fitting phase); -2.015 ~ 1.702 (检验阶段 Testing phase)	-2.992 ~ 2.996 (拟合阶段 Fitting phase); -1.882 ~ 2.408 (检验阶段 Testing phase)	-0.023 ~ 0.023 (拟合阶段 Fitting phase); -0.016 ~ 0.021 (检验阶段 Testing phase)

模型  $DBH_{ob}, H - V_{ib}$  的  $P$  值为对数转换变量模型的检验结果。由表 3 可知,各模型的决定系数均较高, RMSE 与变量变化范围相比数值较小, TPE、 $E$ 、MPE 和 MPSE 数值较小,模型预估精度(即  $1 - MPE\%$ )均在 96.9% 以上,基本满足原林业部颁发的《林业专业调查主要技术规定》中蓄积量计量表的系统误差不超过  $\pm 3\%$  的要求<sup>[11, 16]</sup>。Shapiro-Wilk 检验的  $P$  值均大于 0.05,说明模型残差服从正态分布。

比较各模型在拟合阶段和检验阶段的残差图(图 1~3)可发现,二者的预测值分布范围基本一致,残差值范围较因变量范围都窄(图 1~3;表 1、



3)。  $DBH_{ob} - BD_{ib}$  模型和  $DBH_{ob} - H$  模型均无明显的异方差现象(图 1、2)。  $DBH_{ob}, H - V_{ib}$  模型基于对数变换变量时无明显异方差,而当因变量回到原始尺度后仍有异方差(图 3)。各残差图的 loess 线(图中虚线)都在 0 水平线附近波动,表明模型无偏(图 1~3)。

### 3.3 立木材积表

根据建立的相容性根径-胸径-树高-材积模型,可以得到 3 个材积式(式 9~11),分别为一元根径-材积式、一元胸径-材积式和二元胸径、树高-材积式,并由这 3 个材积式得到材积表,如表 4 所示。

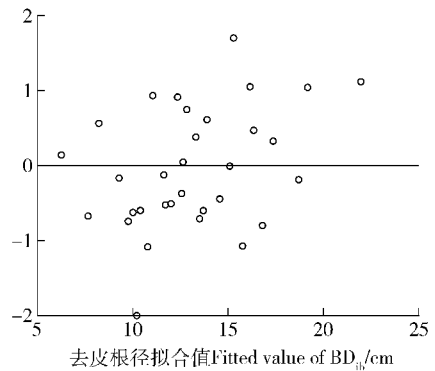


图 1 带皮胸径-去皮根径模型在拟合阶段(左)和检验阶段(右)的残差

Fig. 1 Residual plots of  $DBH_{ob} - BD_{ib}$  model in the fitting phase (left) and testing phase (right)

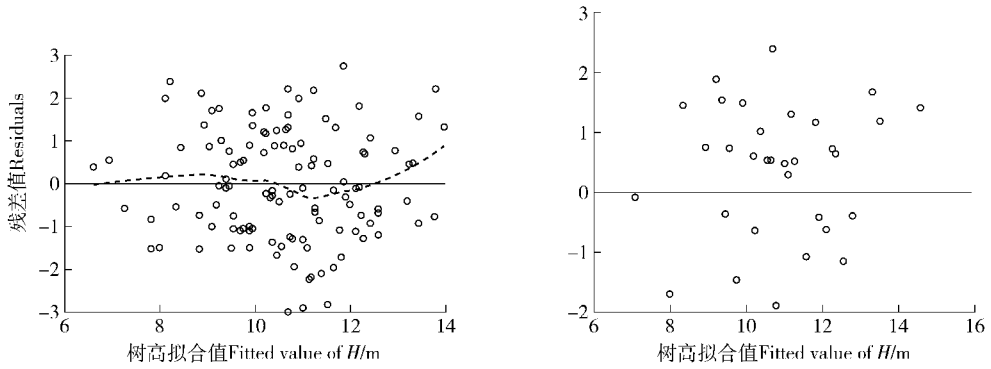


图2 带皮胸径-树高模型在拟合阶段(左)和检验阶段(右)的残差

Fig.2 Residual plots of  $DBH_{ob} - H$  model in the fitting phase (left) and testing phase (right)

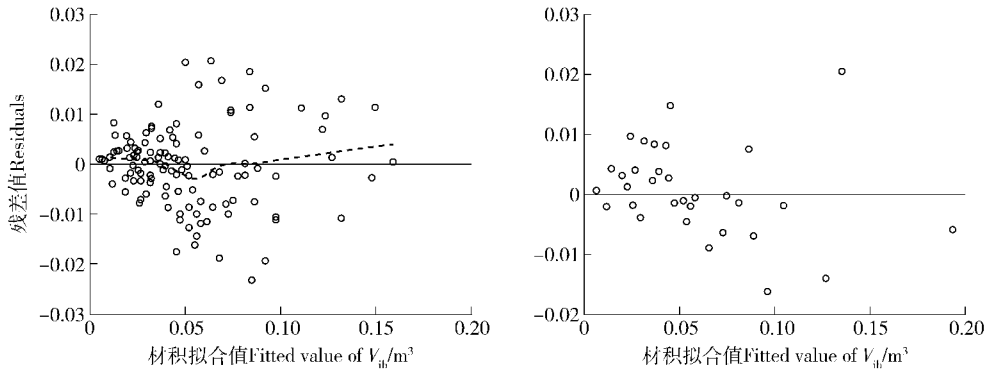


图3 胸径、树高-材积模型在拟合阶段(左)和检验阶段(右)的残差

Fig.3 Residual plots of  $DBH_{ob}, H - V_{ib}$  model in the fitting phase (left) and testing phase (right)

表4 立木材积表

Tab.4 Volume table

去皮根径 $BD_{ib}/\text{cm}$	带皮胸径 $DBH_{ob}/\text{cm}$	树高 $H/\text{m}$	去皮材积 $V_{ib}/\text{m}^3$
6.4	6.0	7.1	0.007
8.2	8.0	8.3	0.01
10.1	10.0	9.4	0.025
12.0	12.0	10.4	0.039
13.9	14.0	11.3	0.058
15.8	16.0	12.1	0.081
17.6	18.0	12.9	0.109
19.5	20.0	13.7	0.143

$$V_{ib} = \exp(-10.447 + 2.004 \ln((BD_{ib} - 0.706)/0.941) + 0.955 \ln(2.724 ((BD_{ib} - 0.706)/0.941)^{0.538})) \quad (9)$$

$$V_{ib} = \exp(-10.447 + 2.004 \ln DBH_{ob} + 0.955 \ln(2.724 DBH_{ob}^{0.538})) \quad (10)$$

$$V_{ib} = \exp(-10.447 + 2.004 \ln DBH_{ob} + 0.955 \ln H) \quad (11)$$

## 4 讨论与结论

### 4.1 模型变量的转换

材积模型通常有异方差现象,以往研究常用加

权回归的方法或模型变量转换的方法来消除异方差<sup>[17]</sup>。本研究采用对数变换的方法对模型变量进行转换,基于转换变量建立的材积模型未检测到明显的异方差。Sakia<sup>[18]</sup>指出,虽然基于转换变量建立的模型无偏,但不能保证变量回转后的预测值依然无偏,因此,应该用校正因子来校正模型偏差。Madwick等<sup>[19]</sup>提出,若通过检验发现变量回转后预测值仍然无偏,可以忽略校正因子的使用。在本研究中,变量回转后,没有检测到明显的偏差(图3),因此没有使用校正因子。

### 4.2 根径相关模型的应用

本研究建立了相容性去皮根径-带皮胸径模型、带皮胸径-树高模型和带皮胸径、树高-去皮材积模型。并由此衍生出3个材积式:一元根径-材积式、一元胸径-材积式和二元胸径、树高-材积式。

#### 4.2.1 3个材积式

一元胸径-材积式(表)和二元胸径、树高-材积式(表)在常规森林调查及森林资源估测时被广泛应用;而去皮根径-去皮材积模型则对林区解决和处理盗伐、滥伐案件具有重要意义。

当作案现场只留有被盗伐、滥伐林木的伐根时: 如果现场面积较小时, 可采用单株实测其根径, 再查根径立木材积式(表)得到单株材积, 之后求总材积; 现场面积大时, 可先测得现场面积, 再设标准地, 据每木根径检尺, 进行根径阶整化, 查根径立木材积式(表), 求径阶总材积, 再求出标准地总材积, 推算每公顷蓄积, 从而推算出案件现场的总蓄积。进而可按照盗伐、滥伐森林、林木行政(刑事)案件处罚(立案)标准追究不法分子的法律责任<sup>[2]</sup>。通常, 运用根径立木材积式(表)测定被伐木材积时, 在被伐木数量比较大的情况下精度会更高, 因其正负误差会基本抵消<sup>[1]</sup>。

值得注意的是, 本研究的上皮根径-去皮材积模型实际上是由根径-胸径模型、胸径-树高模型、及胸径、树高材积模型间接推算得到的。之所以没有直接建立去皮根径-去皮材积模型, 是因为若采用通常的模型形式(比如幂函数)建模, 仅以根径为自变量的材积模型的效果不及以胸径(和树高)为自变量的材积模型的效果好。换言之, 对于本研究而言, 若想仅以根径为自变量建立精度较高的材积模型, 需用较为复杂的模型形式, 如多项式方程或其他形式复杂的非线性模型。因此, 本研究运用前言部分所述的第(2)类方法建立相容性模型系统, 并间接得到精度较高的去皮根径-去皮材积模型。

#### 4.2.2 去皮根径-带皮胸径模型和带皮胸径-树高模型

目前, 很多根径立木材积表的编制都是先由根径测量值和根径-胸径模型估计胸径, 再由胸径估计值和胸径-树高模型估计树高, 最后根据一元胸径材积表(或模型)或二元胸径、树高材积表(或模型)得到材积的预测值。因此, 根径-胸径模型和胸径-树高模型成为联系根径测量值和已知材积表(或模型)的桥梁。

此外, 带皮胸径和树高是衡量林分生长情况的 2 个重要因子。带皮胸径-树高模型作为森林生长与收获模型系统的一个重要组分, 常被用来在已知胸径的情况下推算平均树高, 进而推算森林蓄积量和生物量等因子, 对森林调查具有重要意义。

#### 4.3 模型应用范围

本研究中所有模型及数表仅适用于胸径范围在 5~21 cm 间的华北地区栓皮栎林材积的估测。以后研究应考虑增加对大树样本的测量以扩大模型的适用范围。

#### 参 考 文 献

- [1] 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.  
LI L C, DENG L. Formulation of ground diameter unitary volume table of *Pinus massoniana* in Liuzhou [J]. Forest Inventory and Planning, 2011, 36(1): 1-3.
- [2] 张民侠, 余光辉. 盗伐、滥伐林木材积测算及定案研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2010, 34(3): 85-90.  
ZHANG M X, SHE G H. Study on estimation of tree volume and final decision for deforestation and illegal felling of forests [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2010, 34(3): 85-90.
- [3] 曾伟生. 杉木相容性立木材积表系列模型研建[J]. 林业科学研究, 2014, 27(1): 6-10.  
ZENG W S. Establishment of compatible tree volume equation system of Chinese fir [J]. Forest Research, 2014, 27(1): 6-10.
- [4] 顾丽, 王新杰, 龚直文, 等. 落叶松人工林根径材积表和合理经营密度研究[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(5): 180-185.  
GU L, WANG X J, GONG Z W, et al. Ground diameter volume table and reasonable density management of *Larix gmelinii* stand [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(5): 180-185.
- [5] 赵芳, 叶月兴. 延平区杉木人工林地径材积表编制方法研究[J]. 福建林业科技, 2006, 33(1): 72-75.  
ZHAO F, YE Y X. Study of the compilation method of ground diameter volume table for artificial forest of Chinese fir in Yanping District [J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2006, 33(1): 72-75.
- [6] 孙洪运, 杨占军, 陈国华, 等. 落叶松等根径立木材积表的编制与应用[J]. 辽宁林业科技, 2002(4): 17-18.  
SUN H Y, YANG Z J, CHEN G H, et al. Establishment and application of ground diameter volume table for *Larix gmelinii* [J]. Journal of Liaoning Science and Technology, 2002(4): 17-18.
- [7] 孙亚鹏, 尹立辉. 落叶松根径立木材积表的编制[J]. 长春大学学报, 2008, 18(3): 91-94.  
SUN Y P, YIN L H. Establishment of ground diameter volume table for *Larix gmelinii* [J]. Journal of Changchun University, 2008, 18(3): 91-94.
- [8] 刘憬志, 宫义学. 落叶松人工林地径一元立木材积表的编制[J]. 河北林业科技, 1995(1): 32-33.  
LIU J Z, GONG Y X. Establishment of ground diameter volume table for *Larix gmelinii* plantation [J]. Hebei Forestry Science and Technology, 1995(1): 32-33.
- [9] 翟冬英, 刘长海. 黑龙江省林区人工落叶松根径材积表的编制[J]. 林业科技, 2006, 31(6): 15-17.  
ZHAI D Y, LIU C H. Establishment of ground diameter volume table for *Larix gmelinii* plantation in Heilongjiang [J]. Forestry Science and Technology, 2006, 31(6): 15-17.

- [10] 王玉学,张素华,常金龙,等. 柞树根径立木材积表的编制[J]. 河北林业科技,2001(5):22-24.  
WANG Y X, ZHANG S H, CHANG J L, et al. Establishment of ground diameter volume table for oak trees [J]. Hebei Forestry Science and Technology,2001(5): 22-24.
- [11] 卢昌泰,李吉跃,唐强,等. 马尾松胸径与根径和冠径的关系研究[J]. 北京林业大学学报,2008,30(1):58-63.  
LU C T, LI J Y, TANG Q, et al. Relationship between DBH and ground diameter as well as crown diameter of *Pinus massoniana* [J]. Journal of Beijing Forestry University,2008, 30(1): 58-63.
- [12] CRAWLEY M J. The R book [M]. 2nd ed. London: Wiley & Sons, 2012.
- [13] 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 Q G, PENG D L, HUANG G S, et al. Compatible tree volume and above-ground biomass equation for larch (*Larix* spp.) in northeastern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015,37(2):8-15.
- [14] JACOBY W G. Loess: a nonparametric, graphical tool for depicting relationships between variables [J]. Electoral Studies, 2000, 19(4): 577-613.
- [15] 冯强,方良. 海南桉树立木材积模型研建[J]. 中南林业调查规划,2014,33(3):47-51.  
FENG Q, FANG L. Establishment of tree volume models for eucalyptus in Hainan [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 2014, 33(3): 47-51.
- [16] 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(1):28-38.  
LUO Q B, HE D B, NING H, et al. Study on establishing method of tree volume table [J]. Central South Forest Inventory and Planning, 1992(1): 28-38.
- [17] PARRESOL B R. Additivity of nonlinear biomass equations[J]. Canadian Journal of Forest Research,2001,31: 865-878.
- [18] SAKIA R M. The Box-Cox transformation technique: a review [J]. The statistician, 1992,41: 169-178.
- [19] MADWICK H, SATOO T. On estimating the aboveground weights of tree stands[J]. Ecology,1975,56: 1446-1450.

(责任编辑 李 斐  
责任编辑 惠刚盈)