

兴安落叶松树干去皮直径预测模型

张兴龙, 姜立春*

(东北林业大学林学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:利用兴安落叶松解析木数据, 比较了树干去皮直径预测的 3 种类型模型: Grosenbaugh 的比率方程式、回归模型和削度方程。Grosenbaugh 的比率方程式有很大的灵活性, 没有参数不需要模型拟合。总体评价和模型分段比较表明, 回归模型有较小的预测误差, 尤其是 Cao and Pepper 提出的含有带皮直径、树高、相对树高、胸径处的带皮直径和去皮直径变量的模型。由于削度模型不含有带皮直径变量, 因此产生较大的去皮直径预测误差。不同类型的模型在森林经营过程中都有一定的适应性。

关键词:落叶松; 去皮直径; 最优模型; 削度方程

中图分类号: S791.222

文献标识码: A

Inside Bark Diameter Prediction Models for Dahurian Larch

ZHANG Xing-long, JIANG Li-chun

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: In forest management, to predict the stem diameters inside bark are more important than the diameters outside bark. Measurement on diameter inside bark is both expensive and time-consuming, moreover, causing larger measurement errors especially for measuring standing trees. In this study, three types of model are compared for predicting inside bark diameters using stem analysis data of dahurian larch (*Larix gmelinii* Rupr.): Grosenbaugh's ratio equations, regression models, and taper function. Grosenbaugh's ratio equations had great flexibility, need neither parameters nor model fitting. The results of overall evaluation and comparisons of different sections indicated that the regression models had smaller prediction error, especially the model including diameter outside bark, total height, relative height, breast height diameters outside bark and inside bark by Cao and Pepper. The taper function had larger prediction error of diameters inside bark but did not require outside bark diameters variables. All these models have some adaptability in the forest management process.

Key words: dahurian larch; diameter inside bark; optimal model; taper function

树干不同高度处的去皮直径(d_{ib})是树干对应高度处的带皮直径(d_{ob})减去 2 倍的树皮厚度^[1]。在森林经营过程中经常需要把带皮直径转化为去皮直径^[2-3]。去皮直径通常用来构建树干的轮廓和确定木材的材积(不含树皮材积)。在木材加工过程中, 大部分木材厂购买原木基于去皮原木, 且经常通过去皮直径预测模型把原木的带皮测量值转化成去

皮测量值^[4-6]。在美国和加拿大等国家最常使用的是 Grosenbaugh^[7] 的 3 个比率方程式, 这 3 个方程式没有待估参数, 不需要模型拟合, 只是用树干不同高度处的带皮直径、胸径处的带皮直径(d_{bhob})和去皮直径(d_{bbib})来计算去皮直径。随着统计软件的发展, 多元回归分析应用到去皮直径模型中。Wingerd 和 Wiant^[8] 为美国阿巴拉契亚山脉的 7 个树种构建

收稿日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(31170591)、十二五国家科技支撑计划项目(2012BAD22B02)、中央高校基本科研业务费专项(DL12DA01)和黑龙江省博士后科研启动金(LBH-Q13002)的部分研究内容。

* 通讯作者: 博士, 教授, 从事森林经理相关研究; E-mail: jlichun@nefu.edu.cn

了去皮直径回归模型,与 Grosenbaugh 的 3 个比率方程式相比,回归模型显著提高了预测精度。随后, Cao 和 Pepper^[9] 为美国南部的 3 个针叶树种构建了去皮直径的回归模型。近年来,林业专家们用削度方程来预测树干不同高度处的去皮直径^[10-12]。树皮厚度除了受树木本身的遗传因子控制外,也受到生长环境的制约,如气候因素、立地条件和经营措施等外因的影响^[13-14]。一般来说,不同树种的树皮厚度是不同的,即使同一株树从树干下部到上部树皮厚度也表现了显著不同^[11, 15]。Tewari 和 Mariswamy^[16] 研究发现树皮的总量随着年龄的不同而变化,树皮占到整个木材体积的 27.8% 到 43.5%。因此,准确预测活立木及木材的去皮直径是非常重要的。Marshall 等^[17] 研究发现去皮直径的预测误差会导致高达 11% 的木材价值损失。目前,针对东北林区落叶松去皮直径预测模型等方面的研究很少见公开报道。本研究的目的是利用落叶松干形数据针对国内外提出的去皮直径模型进行对比分析,以期为提高落叶松森林经营和木材加工过程中去皮直径的预测精度提供帮助。

1 数据与方法

1.1 数据

在黑龙江省带岭林业局大青川林场和永翠林场选取了不同年龄和不同林分密度的 25 块落叶松人工林样地(面积为 20 m × 20 m)。在每块标准地内按径阶大小选取 4 株样木,总计 100 株样木用于树干解析。实测样木胸径并标明北向后伐倒,根据树高以 1 m 或 2 m 区分段从树干基部到树梢方向截取圆盘,直到距树梢不足 1.00 m 时停止采样。利用直尺逐个测定每个圆盘的东西和南北两方向的带皮直径、去皮直径,取其均方根表示横截面的带皮直径和去皮直径。剔除 2 株外业测定有误差的数据,实际收集的解析木共计 98 株。将数据按 75% 和 25% 的比例分成拟合数据样本和检验样本。表 1 给出了样木的测树因子统计情况。

1.2 方法

1.2.1 基础模型 综合国内外参考文献,选择了 3 种类型的树干去皮直径预测模型:Grosenbaugh 的比率方程式、回归模型和削度模型,各模型形式如下:

$$d_{ib} = d_{ob} \frac{d_{bhib}}{d_{bhob}} \quad (1)$$

表 1 落叶松人工林各样木调查因子统计量

分组	变量	样木数	平均值	最小值	最大值	标准差
建模数据	年龄/a	74	25.19	7.00	37.00	9.79
	胸径/cm	74	15.14	3.61	25.52	6.14
	树高/m	74	14.38	4.25	23.70	5.23
	去皮直径/cm	74	8.97	0.20	30.35	6.16
	带皮直径/cm	74	9.92	0.40	34.00	6.58
检验数据	年龄/a	24	24.83	7.00	37.00	9.95
	胸径/cm	24	15.13	3.70	24.50	6.45
	树高/m	24	14.98	4.95	23.50	5.94
	去皮直径/cm	24	10.97	0.50	24.95	6.14
	带皮直径/cm	24	11.97	0.60	27.65	6.52

$$d_{ib} = d_{ob} \left(1 - \frac{1 - \frac{d_{bhib}}{d_{bhob}}}{2 - \frac{d_{ob}}{d_{bhob}}} \right) \quad (2)$$

$$d_{ib} = d_{ob} \frac{d_{bhib}}{d_{bhob}} \left(9 / \left(10 - \frac{d_{ob}}{d_{bhob}} \right) \right) \quad (3)$$

式中: d_{ib} 是去皮直径, d_{ob} 是带皮直径, d_{bhib} 是胸径处去皮直径, d_{bhob} 是胸径处带皮直径。

以上 3 个模型是 Grosenbaugh 的比率方程式,没有待估参数,不需要模型拟合。在模型 1 中假定 d_{ib}/d_{ob} 的比率是常数,在模型 2 中假定 d_{ib}/d_{ob} 是沿树干方向双曲线递减,在模型 3 中假定 d_{ib}/d_{ob} 是沿树干方向双曲线递增。

模型 4 和模型 5 是 Cao 和 pepper^[9] 提出的。模型 4 和模型 5 唯一不同的就是模型 5 中有额外的回归项 d_{bhib}/d_{bhob} ,这个回归项被期望通过减小误差来提高模型性能。

$$d_{ib} = d_{ob} \left(\beta_1 + \beta_2 \left(\frac{h}{H} \right) + \beta_3 \left(\frac{h}{H} \right)^2 + \beta_4 H \right) \quad (4)$$

$$d_{ib} = d_{ob} \left(\beta_1 + \beta_2 \left(\frac{h}{H} \right) + \beta_3 \left(\frac{h}{H} \right)^2 + \beta_4 H + \beta_5 \frac{d_{bhib}}{d_{bhob}} \right) \quad (5)$$

式中: h 为从地面算起的高度, H 为树高; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 、 β_5 为模型待定参数。

模型 6 和模型 7 是只有一个解释变量 d_{ob} 的简单回归模型^[18]。模型 6 迫使回归线通过原点,这样,对于小树就不会有负数的 d_{ib} 预测值了。在模型 7 中, d_{ib}/d_{ob} 的比率沿着树干基部到树梢方向随着 d_{ob} 的变化而变化。但是在模型 6 中, d_{ib}/d_{ob} 的比率沿着整个树干都是保持不变的。

$$d_{ib} = \beta_1 d_{ob} \quad (6)$$

$$d_{ib} = \beta_1 + \beta_2 d_{ob} \quad (7)$$

模型 8 是一个非线性的指数函数。模型 9 是 d_{ib} 和 d_{ob} 的平方,用于对应单木横断面积^[19]。

$$d_{ib} = \beta_1 d_{ob}^{\beta_2} \quad (8)$$

$$d_{ib}^2 = \beta_1 d_{ob}^2 \quad (9)$$

模型 10 是 Max 和 Burkhardt^[20]分段割度模型,该模型对落叶松表现了较好的预测精度^[21]。

$$d_{ib}^2 = (\beta_1(h/H - 1) + \beta_2(h^2/H^2 - 1) + \beta_3(a_1 - h/H)^2 I_1 + \beta_4(a_2 - h/H)^2 I_2) d_{b_{hob}}^2 \quad (10)$$

式中:当 $\frac{h}{H} \leq a_1, I_1 = 1$; 当 $\frac{h}{H} > a_1, I_1 = 0$;

当 $\frac{h}{H} \leq a_2, I_2 = 1$; 当 $\frac{h}{H} > a_2, I_2 = 0$; $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$

为模型待定参数; a_1, a_2 为树干下部和上部拐点处的相对高度。

1.2.2 模型评价和检验指标 用 SAS 软件对模型进行拟合得到参数估计值。采用平均误差 (MAB)、均方根误差 (RMSE)、相对误差 (MPB)、确定系数 R^2 来对比不同模型。它们相应的数学表达式为:

$$MAB = \frac{\sum_{i=1}^n | (y_i - \hat{y}_i) |}{n}$$

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

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

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right]$$

其中: y_i 为 d_{ib} 的观测值, \hat{y}_i 为 d_{ib} 的预测值, \bar{y} 为观测值 d_{ib} 的平均值, n 为样本数。

2 结果与分析

2.1 模型拟合总体评价

模型(1)~(3)是比率方程式,没有参数,所以不需要模型拟合。利用 SAS 软件的 PROC REG 和 PROC NLIN 语句对模型(4)~(10)进行拟合。各模型的渐进参数估计值及 P 值见表 2,可以看出:7 个模型拟合得到的所有参数估计都达到了极显著 ($P < 0.0001$),表明各模型对于描述落叶松去皮直径变化具有显著意义。将表 2 中的参数估计值分别代

表 2 模型参数估计值及其检验和拟合的统计量

模型	参数	参数渐进估计值	渐进标准误差	t 值	P 值	MAB	RMSE	MPB	R^2
1						0.233 5	0.320 5	2.604 4	
2						0.324 7	0.516 0	3.621 0	
3						0.252 5	0.414 5	2.816 6	
4	β_1	0.843 8	0.003 1	272.19	<0.000 1	0.200 2	0.278 2	2.232 6	0.998 0
	β_2	0.091 3	0.011 3	8.07	<0.000 1				
	β_3	-0.192 5	0.016 6	-11.58	<0.000 1				
	β_4	0.004 0	0.000 2	24.08	<0.000 1				
5	β_1	0.420 6	0.028 8	14.6	<0.000 1	0.175 3	0.247 7	1.955 0	0.998 4
	β_2	0.093 3	0.010 1	9.26	<0.000 1				
	β_3	-0.194 9	0.014 8	-13.17	<0.000 1				
	β_4	0.002 2	0.000 2	11.62	<0.000 1				
	β_5	0.493 1	0.033 4	14.75	<0.000 1				
6	β_1	0.913 0	0.001 1	819.17	<0.000 1	0.298 8	0.383 4	3.331 9	0.996 1
7	β_1	-0.301 2	0.021 6	-13.92	<0.000 1	0.250 5	0.345 5	2.793 5	0.996 9
	β_2	0.934 2	0.001 8	513.74	<0.000 1				
8	β_1	0.826 9	0.006 2	134.04	<0.000 1	0.245 3	0.346 6	2.736 3	0.996 8
	β_2	1.035 8	0.002 7	390.22	<0.000 1				
9	β_1	0.845 4	0.001 7	491.30	<0.000 1	0.296 9	0.383 4	3.311 5	0.996 1
10	β_1	-4.256 8	0.212 5	-20.04	<0.000 1	0.508 4	0.721 3	5.669 9	0.986 3
	β_2	2.134 0	0.113 6	18.79	<0.000 1				
	β_3	-2.097 8	0.102 8	-20.41	<0.000 1				
	β_4	106.735 2	16.765 2	6.37	<0.000 1				
	a_1	0.751 9	0.017 5	42.99	<0.000 1				
	a_2	0.067 2	0.005 6	11.96	<0.000 1				

入各模型中计算得到各模型的平均误差(MAB)、均方根误差($RMSE$)、相对误差(MPB)、确定系数 R^2 , 见表2。从表2的评价指标可以看出:3个比率方程式中,模型(1)的精度最高, MAB 、 $RMSE$ 和 MPB 分别为0.233 5、0.320 5和2.604 4;7个拟合模型的确定系数 R^2 变化不大,基本都在0.99左右波动。模型(4)和(5)的 MAB 、 $RMSE$ 、 MPB 小于其它模型的 MAB 、 $RMSE$ 、 MPB 。这3个评价指标说明模型(4)和(5)的拟合精度优于其它模型,模型(5)的拟合精度

比模型(4)高。模型(4)和(5)唯一的不同就是模型(5)中有额外的回归项,即 d_{bh1b}/d_{bh0b} ,这个回归项能够减小模型的误差。虽然削度模型(10)的确定系数 R^2 达到了0.986 3,但 MAB 、 $RMSE$ 、 MPB 的值是最大的,造成削度模型误差较大的原因是削度模型不含有去皮直径变量。

2.2 模型的残差图评价

为了检验各模型的方差异质性问题,分别绘制各模型的残差图(图1)。由图1可以看出:模型(1)、

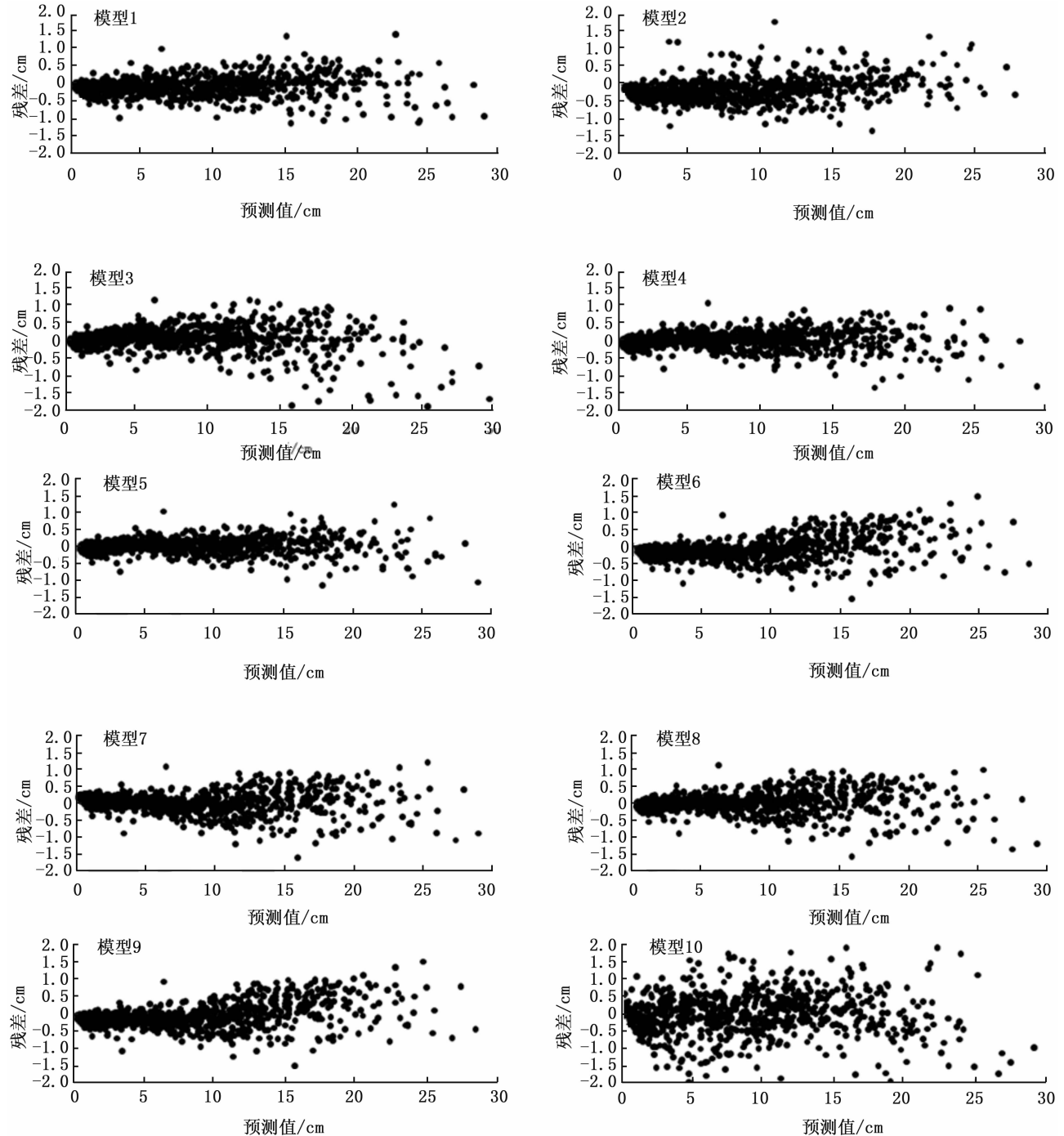
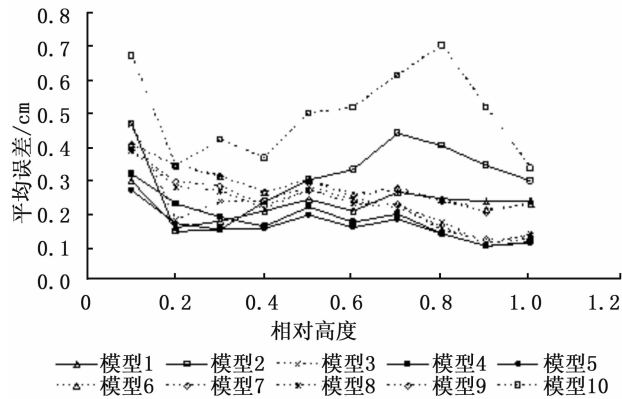


图1 不同模型的残差分布

(2)、(4)、(5)的残差图显示了较高的等方差性及无偏性。模型(3)、(6)、(7)、(8)、(9)的残差图表现了一定的异方差性。虽然模型(10)表现了较均匀的残差分布,但残差分布范围较大。

2.3 模型的分段比较

总体评价只能反映去皮直径的总体误差变化,不能反映各部位的去皮直径误差变化。为全面比较和评价上述各模型的优劣,用树干相对高度把树干分成10部分,分别计算各部分的平均误差 MAB 和均方根误差 $RMSE$ 。为了直观地表述各模型在树干不同部位的拟合效果,利用曲线图进行比较(图2)。



可以看出,在树干相对高度0~10%、20%~70%、80%~90%,模型(5)的拟合精度高于其它模型;在树干相对高度10%~20%段,模型2的精度高于其它模型;在树干相对高度70%~80%段,模型(4)的拟合精度高于其它模型;在树干相对高度90%~100%部分,模型(5)的平均误差最小,而均方根误差最小的是模型(7)。除了模型(5),在树干相对高度30%以上,模型(4)显示出了较低的误差。除了模型(5)和模型(4),在树干相对高度60%以下,模型(1)也显示出了较低的误差。

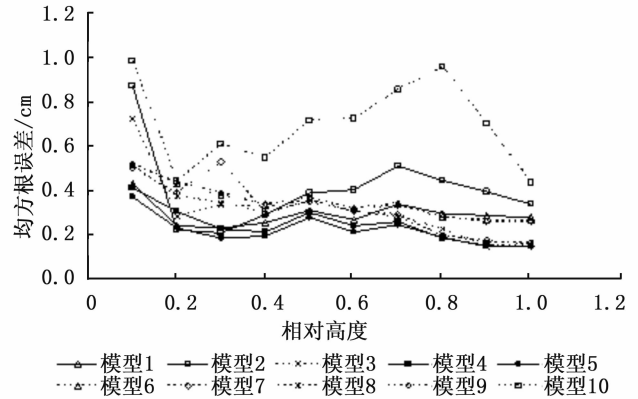


图2 基于相对高度和拟合数据的平均误差和均方根误差

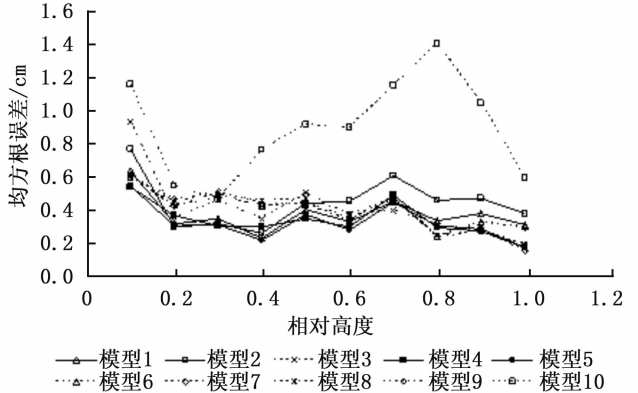
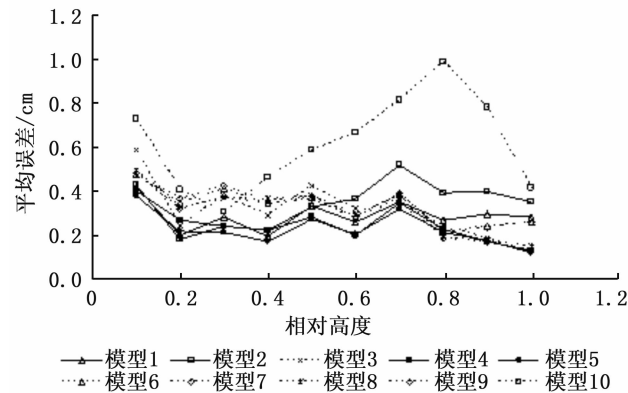


图3 基于相对高度和检验数据的平均误差和均方根误差

2.4 模型检验

利用未参与参数估计的24株解析木数据,基于表2的参数估计值和检验数据,利用SAS软件计算各模型的平均误差、均方根误差、相对误差的统计量。检验结果如表3示。可以看出,模型检验指标与建模数据结果基本一致,即模型(4)和(5)的预测精度优于其它模型。模型(5)的预测精度优于模型(4)。3个比率方程式中,模型(1)的预测精度优于模型(2)和模型(3)。模型的分段比较见曲线图2。

在树干相对高度0%~10%、20%~70%、80%~90%,模型(5)的预测精度高于其它模型。在树干相对高度30%以上,模型(4)显示出了较低的预测误差。在树干相对高度60%以下,模型(1)也显示出了较低的预测误差。

3 结论与讨论

3.1 Grosenbaugh 的比率方程式

3个比率方程式中没有任何一个对于不同的树

表3 模型检验

模型	MAB	RMSE	MPB
1	0.304 1	0.439 8	2.773 0
2	0.352 0	0.527 3	3.210 0
3	0.345 4	0.556 2	3.148 7
4	0.266 4	0.366 1	2.429 0
5	0.246 8	0.352 7	2.249 9
6	0.349 8	0.447 0	3.189 0
7	0.321 0	0.424 0	2.926 2
8	0.332 3	0.438 1	3.029 3
9	0.353 5	0.453 7	3.223 1
10	0.631 8	0.873 9	5.759 9

种都是最好的。本研究发现对于兴安落叶松模型(1)比模型(2)和模型(3)的预测精度高。Cao 和 Pepper 针对萌芽松(*Pinus echinata* Mill.)和长叶松(*Pinus palustris* Mill.)的研究发现:模型(1)的预测精度最高,而对于火炬松(*Pinus taeda* L.)模型(2)的预测精度最高。Brooks 和 Jiang 针对北美鹅掌楸(*Liriodendron tulipifera* L.)和红花槭(*Acer rubrum* L.)的研究发现:模型(1)的预测精度最高,而对于北美赤松(*Pinus resinosa* Ait)模型(2)的预测精度最高。Li 和 Weiskittel 针对北美赤松(*Pinus resinosa* Ait.)、短叶松(*Pinus banksiana* Lamb.)、乔松(*Pinus strobus* Linn.)的研究发现3个比率方程中模型(2)的预测精度最高。而对于冷杉(*Abies balsamea* (L.) Mill.)和云杉(*Picea rubens* Sarg.、*Picea mariana* B. S. P.、*Picea glauca* (Moench) Voss.)模型(1)的预测精度最高。这充分说明3个比率方程式的预测精度取决于树种。

3.2 回归模型

模型(4)~(9)都是回归模型,模型(4)和模型(5)中除了包括 d_{ob} 变量,还包括树高和相对树高变量,模型(5)还包括了额外的 d_{bhib}/d_{bhob} 变量。模型(6)~(9)只包括 d_{ob} 变量。本研究发现对于兴安落叶松模型(4)和模型(5)比模型(6)~(9)的预测精度高。Brooks 和 Jiang 针对北美鹅掌楸、北美赤松、红花槭的研究发现:模型(4)的预测精度最高,但是他们没有比较模型(5)。Li 和 Weiskittel 针对北美赤松、短叶松、乔松、冷杉、云杉的研究发现模型(5)的预测精度最高。通过分析可以发现虽然模型(5)的预测精度是最高的,但是也注意到,因为模型(5)含有去皮胸径 d_{bhib} 变量,这个变量在森林调查过程中测量费钱又费时。

3.3 削度模型

本研究比较了林业上广泛应用的 Max 和

Burkhart 分段削度模型。通过 MAB、RMSE 和 MPB 的值可以看出:削度方程存在较大的误差,这主要是因为削度模型不含有树干不同高度处的带皮直径 d_{ob} 变量, d_{ob} 也是预测 d_{ib} 最重要的变量之一。

总之,每一种类型的模型都有它们的优点和适应性,当对于一个树种没有回归模型时,Grosenbaugh 的比率方程式是一种选择,但应当注意到这3个比率方程对不同的树种变化较大。如果对于一个树种测量了树高、相对树高、 d_{ob} 、 d_{bhib}/d_{bhob} 等变量,回归模型(5)的预测精度是最高的。当没有测量 d_{ob} 变量时,削度模型也提供了测量去皮直径的一种方法,但是误差较大。随着林业新技术的发展,如高性能光学测树器(Criterion RD 1000)能够测量树干不同高度处的带皮直径,在森林经营过程中将带皮直径转化为去皮直径就变得越来越重要了。

参考文献:

- [1] 孟宪宇. 测树学[J]. 北京:中国林业出版社,2006.
- [2] Muhairwe C K. Bark thickness equations of five commercial tree species in regrowth forests of Northern New South Wales[J]. Australian Forestry, 2000,63(1):34-43.
- [3] Li R, Weiskittel A R. Estimating and predicting bark thickness for seven conifer species in the Acadian Region of North America using a mixed-effects modeling approach: comparison of model forms and subsampling strategies[J]. European Journal of Forest Research, 2011,130:219-233.
- [4] 陈东来,秦淑英. 树皮厚度、树皮材积与直径和树高相关关系的研究[J]. 河北林学院学报,1994,9(3):248-250.
- [5] Ellis J C, Elliott D A. Log scaling guide for exporters[R]. Forest Res Bulletin, No. 221. New Zealand Forest Res Inst Ltd., Rotorua, New Zealand, 2001,53pp.
- [6] Malone T, Liang J. A bark thickness model for white Spruce in Alaska Northern Forests[J]. International Journal of Forestry Research, 2009,9:1-5.
- [7] Grosenbaugh L R. STX-FORTRAN 4 program for estimates of tree populations from 3P sample-tree-measurements[R]. USDA For Serv Res Pap, PSW-13. 1964,49p.
- [8] Wingerd D E, Wiant H V Jr. Variables for predicting inside bark diameters of upper stems of Appalachian hardwoods[J]. Journal of Forestry, 1982,80:791-792.
- [9] Cao Q V, Pepper W D. Predicting inside bark diameter for shortleaf, loblolly, and longleaf pines[J]. Southern Journal of Applied Forestry, 1986,10:220-224.
- [10] Maguire D A, Hann D W. Bark thickness and bark volume in southwestern Oregon Douglas-fir[J]. Western Journal of Applied Forestry, 1990,5(1):5-8.
- [11] Laasasaho J, Melkas T, Aldn S. Modeling bark thickness of *Pinus abies* with taper curve[J]. Forest Ecology and Management,

- 2005,206:35-47.
- [12] Brooks J R, Jiang L. Comparison of prediction equations for estimating inside bark diameters for Yellow-Poplar, Red Maple, and Red Pine in West Virginia[J]. Northern Journal of Applied Forestry, 2009,26:5-8.
- [13] Wilhelmsson L, Arlinger J, Spångberg K, et al. Models for predicting wood properties in terms of *Picea abies* and *Pinus sylvestris* in Sweden[J]. Scandavian Journal of Forest Research, 2002,17:330-350.
- [14] 罗建中, Roger Arnold, 项东云, 等. 邓恩枝生长、木材密度和树皮厚度的遗传变异研究木[J]. 林业科学研究, 2009,22(6):758-764.
- [15] Laar A. Bark thickness and bark volume of *Pinus patula* in South Africa[J]. Southern Hemisphere, Forestry Journal, 2007. ,69:165-168
- [16] Tewari V P, Mariswamy K M. Heartwood, sapwood and bark content of teak trees grown in Karnataka, India[J]. Journal of Forestry Research, 2013,24(4):721-725.
- [17] Marshall H D, Murphy G E, Lachenbruch B. Effects of bark thickness estimates on optimal log merchandising[J]. Forest Products Journal, 2006, 56:87-92.
- [18] Gordon A. Estimating bark thickness of *Pinus radiata*[J]. NZ J For Sci, 1983,13:340-348.
- [19] Ritchie M W, Hann D W. Nonlinear equations for predicting diameter and squared diameter inside bark at breast height for Douglas-fir[R]. Forest Research Laboratory, Oregon State University. Research Paper 47, 1984,12 pp.
- [20] Max T A, Burkhart H E. Segmented polynomial regression applied to taper equations[J]. Forest Science, 1976,22:283-289.
- [21] 姜立春, 刘瑞龙. 基于非线性混合模型的落叶松树干削度模型[J]. 林业科学,2011,47(4):101-106.