

组合预测法在林分断面积生长预估中的应用

张雄清¹ 雷渊才¹ 陈新美¹ 王金增²

(1 中国林业科学研究院资源信息研究所 2 北京市林业勘查设计院)

摘要:林分断面积生长模型的研究是林分因子建模中的主要对象,研究提高林分断面积生长模型的预测精度十分重要。组合预测法能够对不同模型的预测结果进行组合,把不同模型的预测误差分散化,从而提高预测精度。基于北京山区油松定期清查数据,根据残差的方差最小原则确定组合预测中各模型的权重,将单木水平预测所得的林分断面积与林分水平预测所得的断面积进行组合预测。结果表明:组合预测法预测林分断面积的精度比单一水平(单木水平、林分水平)预测的精度都高,同时组合预测法也改进了林分断面积预测模型的兼容性。

关键词:林分断面积;组合预测;可变生长率法;生长模型;油松

中图分类号: S758.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2010)04-0006-06

ZHANG Xiong-qing¹; LEI Yuan-cai¹; CHEN Xin-mei¹; WANG Jin-zeng². **Application of forecast combination in prediction of stand basal area.** *Journal of Beijing Forestry University* (2010) 32 (4) 6-11 [Ch , 31 ref.]

1 Research Institute of Forest Resources Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;

2 Beijing Forestry Survey and Design Institute, 100029, P. R. China.

Stand basal area is an important variable in forecasting stand growth and yield. A stand basal area growth model is a major component in stand variable modeling. A forecast combination combines information and disperses errors from different models and, as well, improves the accuracy of prediction. In this study, weights of different models were determined with minimum error variance. Based on periodic data of Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) stands from the mountain areas of Beijing, a forecast combination was used to estimate stand basal area from both stand-level and tree-level models. The results showed that the forecast combination for predicting stand basal area outperformed both stand-level and tree-level models. It also improves the compatibility of stand basal area growth models.

Key words stand basal area; forecast combination; variable rate method; growth model; *Pinus tabulaeformis*

林分生长和收获模型作为研究森林生长变化规律及预估林分生长量、收获量的基础手段,一直受到国内外林业工作者的高度重视。近些年,已提出了大量的生长模型^[1-5]。这些模型根据不同模拟对象所处的水平,可以分为林分生长模型(stand-level models)和单木生长模型(tree-level models)。这两类模型各有优缺点:通过单木生长模型预测林分因

子,可以判定各单株木的生长状况和生长潜力,但是存在着复杂性、误差积累等缺点;通过林分生长模型预测林分因子可以直接提供林分收获量,但却无法反映单木水平的详细信息^[6-8]。

随着林分生长与收获模型研究的深入,考虑到单木生长模型和林分生长模型的特点,在建模过程中利用单一水平(单木水平、林分水平)的生长模型

收稿日期:2009-04-27

基金项目:中国林业科学研究院科研院所基金项目(IFRIT200901)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAD23B02)。

第一作者:张雄清。主要研究方向:森林生长模型。电话:010-62889192 Email:zhangxiongqing@163.com 地址:100091 北京市颐和园后中国林业科学研究院资源信息研究所。

责任作者:雷渊才,研究员,博士生导师。主要研究方向:森林生长模型和森林抽样调查。电话:010-62889199 Email:yclei@caf.ac.cn 地址:同上。

本刊网址: <http://www.bjfujournal.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

预估林分生长都有一定的局限性。研究如何综合利用这两类模型(单木水平和林分水平)所提供的信息和特点显然很有意义。Bates等^[9]及Newbold等^[10]提出了组合预测方法(forecast combination),其基本思想是对不同模型的预测结果进行组合,以提取更多的信息来提高预测结果的精度,即利用不同模型给出的预测结果来构造新的预测。该方法能够把不同模型的预测误差分散化,从而提高预测精度。国内外学者利用这种方法在经济和企业管理等领域进行了一些应用研究^[11-15]。在林业中,Green等^[16]在林业调查数据整理中应用了组合估计;李际平等^[17]对两个不同的林分材积模型(一元线性模型和一元三次曲线模型)利用组合预测法预测林分材积。

针对单木生长模型和林分生长模型的特点及考虑单木和林分生长模型的兼容性,一些林业学者提出了解聚法(disaggregation)^[7,18-19]。解聚法使得单木水平模型所得的林分变量尽可能地与林分水平模型所得的林分变量相匹配,进而提高单木生长模型和林分生长模型预测林分变量的兼容性,但是并没有考虑利用单木水平和林分水平的生长模型的组合估计量来提高目标变量预估的精度。Yue等^[20]提出利用组合预测来解决不同水平模型的组合估计,该方法综合利用两种不同水平模型所提供的信息,分散预测误差,进而提高预测精度,同时也提高了模型估计的兼容性。在建立单木水平生长模型时,作者利用相对直径生长率模型预测单木直径,并采用迭代法估计单木相对直径生长率模型参数。

在林分生长和收获预估体系中,林分断面积既是用来预估材积收获的重要变量,又是被估计的主要因子。由于林分断面积具有较高的稳定性和预估性,以及在林业调查和生产实践中的易测定性,所以

林分断面积生长模型的研究是林分测算因子建模中的主要对象^[21]。由于林分断面积的重要性,国内外学者对林分断面积生长模型进行了较多的研究^[22-26]。为了提高林分断面积生长模型的预测精度,本研究利用北京山区油松(*Pinus tabulaeformis*)定期调查数据,采用可变生长率法^[27](variable rate method)建立单木水平预测模型和林分水平预测模型,然后利用这两类模型所得的林分断面积,建立林分断面积生长组合估计模型,并评价组合模型的特点和预测精度。

1 数据来源与整理

本研究采用的数据来源于北京市林业调查设计院,其中油松的固定样地有55个,主要为人工林,每个样地的面积为0.067 hm²。样地主要调查因子有林木直径、方位角、林分年龄、林分优势木平均高、郁闭度、水平距、坡向、坡位、坡度、海拔高度、土层厚度等因子。样地每隔5年复测一次。本研究利用的数据分别是1991、1996、2001年复测的数据。从1991年生长到1996年的样地有55个,从1996年生长到2001年的样地也有55个,总共有110个样地。本研究参与建模的有60个样地,50个样地作为检验样地。油松林分建模样地和检验样地分布情况及变量因子统计结果见表1、2。

表1 建模样地和检验样地的分布情况

Tab. 1 Distribution of plots for modeling and validation

生长期	样地个数	
	建模样地	检验样地
1991—1996年	30	25
1996—2001年	30	25
合计	60	50

表2 建模样地和检验样地的因子统计表
Tab. 2 Summary statistics of data for modeling and validation

	生长期	平均年龄/a	平均公顷断面积/(m ² ·hm ⁻²)	平均公顷株树/(株·hm ⁻²)	优势木平均高/m	平均直径/cm
建模数据	1991—1996年	28.90	10.79	1 130.10	6.60	10.30
	1996—2001年	33.90	12.93	1 082.80	7.54	11.57
检验数据	1991—1996年	29.50	8.21	991.10	6.51	9.70
	1996—2001年	34.50	10.33	949.30	7.38	11.11

2 研究方法

采用可变生长率法^[27]建立林分水平预测模型和单木水平预测模型。然后由这两类模型建立林分断面积生长组合估计模型。

2.1 优势木高及密度模型的建立

优势木高通常作为立地质量评价的一个重要指

标,公顷株数作为反映林分密度的一种密度指标,在建立林分或林木生长与收获模型时发挥着重要作用。林分优势木高和公顷株数方程如下:

$$H_{t+q} = \exp [(A_t/A_{t+q}) \ln H_t + (1 - A_t/A_{t+q}) \cdot (\gamma_1 + \gamma_2/A_t + \gamma_3 H_t)] + \varepsilon_h \quad (1)$$

$$N_{t+q} = \exp [(A_t/A_{t+q}) \ln N_t + (1 - A_t/A_{t+q}) \cdot (\delta_1 + \delta_2/A_t + \delta_3 \ln N_t)] + \varepsilon_n \quad (2)$$

式中: q 为生长期(本研究中 $q=5$)。 A_t 、 A_{t+q} 分别为 t 年、 $t+q$ 年时林分的平均年龄。 H_t 、 H_{t+q} 分别为 t 年和 $t+q$ 年时的林分优势木平均高(m)。 N_t 、 N_{t+q} 分别为 t 年和 $t+q$ 年时的林分公顷株数(株/hm²)。 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 和 δ_1 、 δ_2 、 δ_3 为待估参数。 ε_b 和 ε_n 分别为林分优势木高和公顷株数的随机误差。

2.2 林分水平的林分断面积模型的建立

林分断面积的生长与林分年龄、林分优势木高、林分密度(公顷株数)等林分变量因子有关。本文利用这些变量因子作为林分断面积生长模型的自变量,而且将前一年的林分断面积引进方程,作为预估林分断面积的自变量之一,能够减少林分断面积模型的残差的自相关性,因为它能够反映前一年林分的经营状况及环境条件^[28]。林分断面积生长方程利用递推方式推导如下:

$t+1$ 年时:

$$\begin{aligned} B_{t+1}^S = & B_t^S + \exp(\alpha_1 + \alpha_2/A_t + \alpha_3 H_t + \\ & \alpha_4 A_t/N_t + \alpha_5 \ln B_t^S) \end{aligned} \quad (3a)$$

$t+2$ 年时:

$$\begin{aligned} B_{t+2}^S = & B_{t+1}^S + \exp(\alpha_1 + \alpha_2/A_{t+1} + \alpha_3 H_{t+1} + \\ & \alpha_4 A_{t+1}/N_{t+1} + \alpha_5 \ln B_{t+1}^S) \\ & \vdots \end{aligned} \quad (3b)$$

$t+q$ 年时:

$$\begin{aligned} B_{t+q}^S = & B_{t+q-1}^S + \exp(\alpha_1 + \alpha_2/A_{t+q-1} + \alpha_3 H_{t+q-1} + \\ & \alpha_4 A_{t+q-1}/N_{t+q-1} + \alpha_5 \ln B_{t+q-1}^S) + \varepsilon_b^S \end{aligned} \quad (3c)$$

式中: B_t^S 为 t 年时林分的公顷断面积(m²/hm²)。 α_1 、 α_2 、 \cdots 、 α_5 为待估参数。 ε_b^S 为林分水平的林分断面积随机误差。

2.3 单木直径生长模型及单木水平下林分断面积模型的建立

林分变量因子(林分断面积、林分优势木高、林分密度(公顷株数)等)和单木因子(直径)组成了单木生长方程的自变量。因此,本研究引入了这些因子作为单木直径生长模型的自变量。单木直径生长方程利用递推方式推导如下:

$t+1$ 年时:

$$\begin{aligned} D_{t+1} = & D_t + \exp(\beta_1 + \beta_2/A_t + \beta_3 B_t + \beta_4 H_t + \\ & \beta_5 A_t/N_t + \beta_6 \ln D_t) \end{aligned} \quad (4a)$$

$t+2$ 年时:

$$\begin{aligned} D_{t+2} = & D_{t+1} + \exp(\beta_1 + \beta_2/A_{t+1} + \beta_3 B_{t+1} + \\ & \beta_4 H_{t+1} + \beta_5 A_{t+1}/N_{t+1} + \beta_6 \ln D_{t+1}) \\ & \vdots \end{aligned} \quad (4b)$$

$t+q$ 年时:

$$D_{t+q} = D_{t+q-1} + \exp(\beta_1 + \beta_2/A_{t+q-1} +$$

$$\begin{aligned} & \beta_3 B_{t+q-1} + \beta_4 H_{t+q-1} + \beta_5 A_{t+q-1}/N_{t+q-1} + \\ & \beta_6 \ln D_{t+q-1}) + \varepsilon_d \end{aligned} \quad (4c)$$

式中: $D_{t,i}$ 为 t 年时第 i 株林木的直径(cm); β_1 、 β_2 、 \cdots 、 β_6 为待估参数。 ε_d 为单木直径的随机误差。

根据直径生长模型(4c),计算出直径预测值,并根据这一直径预测值利用方程(5)计算出 $t+q$ 年时林分断面积的预测值。

$$B_{t+q}^T = \sum_{i=1}^n k D_{t+q-1}^2 \quad (5)$$

式中: $k = 3.142 / (0.067 \times 40000)$, B_{t+q}^T 为 $t+q$ 年时单木水平的林分断面积预估值。 n 为样地株数。

由于利用方程(5)计算林分断面积的预测值与方程(3c)的林分断面积的预测值是有误差的,为了达到林分断面积预测值的兼容性和一致性,引出了组合预测法。

2.4 单木水平和林分水平模型组合的林分断面积预测模型

由方程(5)和方程(3c),根据 Newbold 等^[10]提出的组合预测法,林分断面积的组合预测模型如下:

$$B^C = \mu_1 B^T + (1 - \mu_1) B^S \quad (6)$$

式中: B^T 为单木水平的林分断面积预估值, B^S 为林分水平的林分断面积预估值, μ_1 为权重因子($0 < \mu_1 < 1$)。

该组合估计是无偏估计,其残差的方差 σ_C^2 为:

$$\sigma_C^2 = \mu_1^2 \sigma_T^2 + (1 - \mu_1)^2 \sigma_S^2 + 2\mu_1(1 - \mu_1)\sigma_{TS} \quad (7)$$

那么,利用两个单一水平残差的方差及协方差值,得出最优权重值^[20]:

$$\mu_1 = \frac{\sigma_S^2 - \sigma_{TS}}{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 - 2\sigma_{TS}} \quad (8)$$

$$1 - \mu_1 = \frac{\sigma_T^2 - \sigma_{TS}}{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 - 2\sigma_{TS}} \quad (9)$$

将 μ_1 值代入方程(7),得出组合估计残差值的方差:

$$\sigma_C^2 = \frac{\sigma_T^2 \sigma_S^2 - \sigma_{TS}^2}{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 - 2\sigma_{TS}} = \frac{\sigma_T^2 \sigma_S^2 (1 - \rho_{TS}^2)}{\sigma_T^2 + \sigma_S^2 - 2\rho_{TS}\sigma_T\sigma_S} \quad (10)$$

则

$$\sigma_C^2 - \sigma_T^2 = \frac{-(\sigma_T^2 - \sigma_{TS})^2}{(\sigma_T - \sigma_{TS})^2 + 2\sigma_{TS}(1 - \rho_{TS})} \leq 0$$

同理 $\sigma_C^2 - \sigma_S^2 \leq 0$ 。

式中: σ_T^2 为单木水平的残差的方差值, σ_S^2 为林分水平的残差的方差值, σ_{TS} 为这两种水平的残差的协方差, ρ_{TS} 为单木水平和林分水平预测值残差的相关系数。

因此, $\sigma_C^2 \leq \min(\sigma_T^2, \sigma_S^2)$,这就达到了组合预

测的目的,即比单一水平模型预测的精度都要高。

3 模型评价

单木直径生长模型(方程(4c))、单木水平的林分断面积生长模型(方程(5))、林分水平的林分断面积生长模型(方程(3c))以及林分断面积的组合预测模型(方程(6))等可以通过统计量平均偏差(MD)、平均绝对偏差(MAD)和决定系数(R^2)进行评价。它们的数学表达式分别为:

$$MD = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) / n \quad (11)$$

$$MAD = \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| / n \quad (12)$$

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2 \quad (13)$$

式中: y_i 为实际值(林分优势木高、林分公顷株数、林分断面积或单木直径), \hat{y}_i 、 \bar{y}_i 分别为预测值和平均值。

评价一个模型或者一种预测方法的优劣,可以利用上述这几个统计量来完成。平均偏差和平均绝对偏差小,并且决定系数大,则该模型或该预测方法为优。

在本研究中,利用可变生长率法建立的单木直径生长模型,考虑了林分因子(林分断面积、林分优势木高)和林木因子在生长期间的变化引起的林木直径年生长量的变化,这符合林木的生长规律。而且利用该方法建立林分断面积生长模型,使林分断面积生长与收获具有更好的兼容性^[29],并且由该方法所建模型的参数估计比迭代法估计原理简单,计算耗时少^[30]。

单木水平和林分水平的生长模型的参数估计均利用 SAS 软件中非线性回归模块(NLIN)来完成^[31]。

4 结果与分析

油松林分优势木高模型、公顷株数模型的参数估计值、标准误差及决定系数见表 3。由表 3 中的参数标准误差可知,这两个模型的参数估计值都有效,并且 R^2 也比较高,因此选择方程(1)和(2)适合。

表 3 林分优势木高模型和林分密度模型的参数估计值、标准误差及 R^2

Tab. 3 Estimate and standard error of parameters and R^2 in stand dominant height model and density model

	参数	估计值	标准误差	R^2
优势木高	γ_1	3.256	0.030	0.977
	γ_2	-16.463	0.437	
	γ_3	0.027	0.002	
公顷株数	δ_1	-2.214	0.142	0.968
	δ_2	9.853	0.415	
	δ_3	1.214	0.019	

表 4 列出了利用建模数据所计算出来的单木直

径生长模型和林分断面积生长模型的参数估计值,根据其参数的标准误差值,可知这些参数值都有意义。表 5 列出了建模样地及检验样地的模型统计量。从表 5 中可知:在建模数据中,林分断面积生长模型的残差的方差 σ^2 为 2.235, MD 为 0.009 m^2/hm^2 , MAD 为 1.122 m^2/hm^2 , R^2 为 0.945; 检验数据中,林分断面积生长模型的 σ^2 为 1.358, MD 为 0.464 m^2/hm^2 , MAD 为 0.880 m^2/hm^2 , R^2 为 0.941, 其 R^2 都比较高。经过 Kolmogorov-Smirnov 正态性检验,林分断面积生长模型的残差服从正态分布,且对每个自变量(林分年龄、林分优势木高、林分密度、林分断面积)没有明显的估计偏差(图 1)。

表 4 直径生长模型和林分断面积生长模型的参数估计值

Tab. 4 Parameter estimates of diameter growth and stand basal area growth models

	参数	估计值	标准误差
林分断面积生长模型	α_1	-1.614	0.161
	α_2	35.141	1.896
	α_3	-0.070	0.006
	α_4	1.989	1.096
	α_5	0.754	0.038
单木直径生长模型	β_1	-3.184	0.114
	β_2	36.951	1.596
	β_3	-0.009	0.001
	β_4	-0.036	0.006
	β_5	-2.916	0.744
	β_6	1.155	0.036

表 5 林分断面积生长模型和直径生长模型的统计量

Tab. 5 Statistics of stand basal area growth and diameter growth models

统计量	林分断面积生长模型 (方程(3c))		直径生长模型 (方程(4c))	
	建模数据	检验数据	建模数据	检验数据
σ^2	2.235	1.358	0.765	0.928
MD	0.009	0.463	-0.002	0.190
MAD	1.122	0.880	0.638	0.656
R^2	0.945	0.941	0.958	0.936

注:林分断面积生长模型的 MD 和 MAD 的单位为 m^2/hm^2 , 直径生长模型的 MD 和 MAD 的单位为 cm。

由表 5 可知,在建模数据中,单木直径生长模型的残差的方差 σ^2 为 0.765, MD 为 -0.002 cm, MAD 为 0.638 cm, R^2 为 0.958; 检验数据中,直径生长模型的 σ^2 为 0.928, MD 为 0.190 cm, MAD 为 0.656 cm, R^2 为 0.936。经过 Kolmogorov-Smirnov 检验,单木直径生长模型的残差服从正态分布,且对每个自变量(林分年龄、林分优势木高、林分密度、林分断面积)都没有明显的估计偏差(图 2)。

表 6 列出了林分水平、单木水平及通过组合预测法所建立的林分断面积的模型评价值。在建模数据中,林分水平的林分断面积模型的 σ^2 (2.235)、MD(0.009 m^2/hm^2)、MAD(1.122 m^2/hm^2) 及通过

单木水平建立的林分断面积模型的 σ^2 (1.292)、MD (-0.041 m^2/hm^2)、MAD (0.831 m^2/hm^2) 都分别比通过组合预测法建立的林分断面积模型的 σ^2 (1.263)、MD (-0.046 m^2/hm^2)、MAD (0.822 m^2/hm^2) 大,且林分水平的林分断面积模型的 R^2

(0.945)和通过单木水平建立的林分断面积模型的 R^2 (0.972)都比通过组合预测法建立的林分断面积模型的 R^2 (0.973)小,而且利用检验数据所得出的结果也一样。因此,组合预测法预测的林分断面积精度比其他两种水平的模型拟合的精度都高。

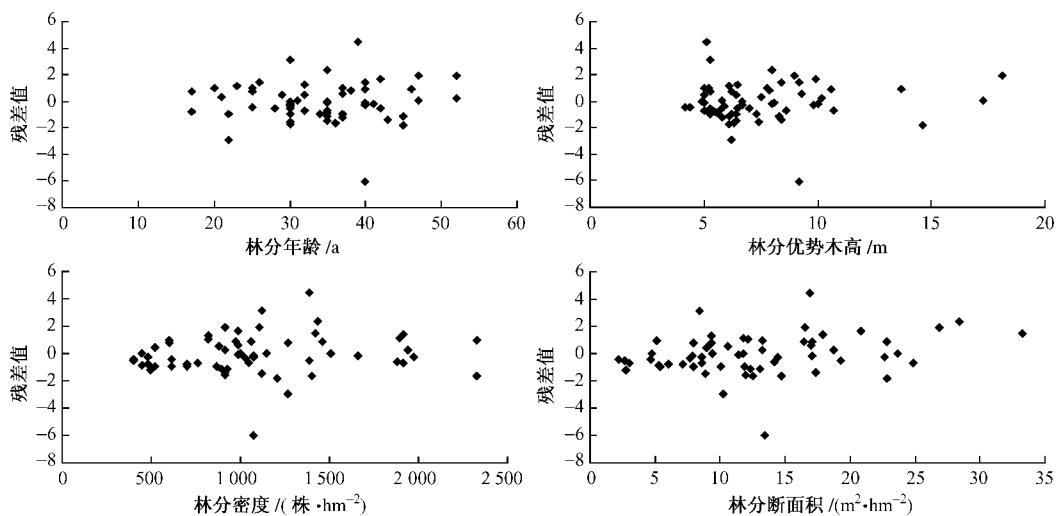


图1 林分断面积生长模型的残差图

Fig. 1 Residuals of the stand-level basal area growth model

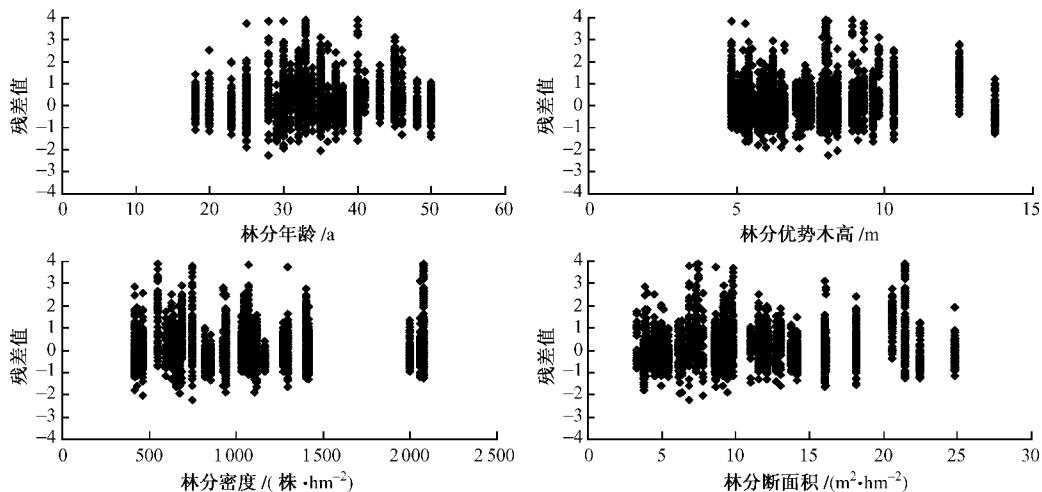


图2 单木直径生长模型的残差图

Fig. 2 Residuals of the tree-level diameter growth model

表6 不同方法林分断面积生长模型的统计量
Tab. 6 Statistics of stand basal area with different models

统计量	林分水平生长模型(方程(3c))		单木水平生长模型(方程(5))		组合预测生长模型(方程(6))	
	建模数据	检验数据	建模数据	检验数据	建模数据	检验数据
σ^2	2.235	1.358	1.292	1.011	1.263	0.290
MD	0.009	0.464	-0.041	0.320	-0.046	8.497×10^{-5}
MAD	1.122	0.880	0.831	0.652	0.822	0.415
R^2	0.945	0.941	0.972	0.961	0.973	0.990

5 结论

组合预测法是一个提高预测精度的很好的方法^[12]。该方法充分利用单一预测模型所提供的有效信息,减少单一模型中随机因素的影响,把不同的模型误差分散化,从而提高预测精度。在本研究中,

利用组合预测法预测林分断面积,既包含了单木水平的详细信息,也包含了林分水平的信息,并综合利用了这两种水平(单木水平、林分水平)所提供的信息和特点,分散预测误差,其预测精度比单一水平(单木水平、林分水平)的预测精度都要高。同时,利用组合预测法预测林分断面积,使两个不同水平

所得出的林分断面积组合变成一个林分断面积，保证了林分断面积预测的一致性，提高了林分断面积模型的兼容性。组合预测法不仅适用于林分断面积的研究，同时也适用于其他林分因子。

参 考 文 献

- [1] TRASOBARES A, PUKKALA T, MIINA J. Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain [J]. *Annals of Forest Science*, 2004, 61:9-24.
- [2] BERMEJO I, CANELLASA I, MIGUEL A S. Growth and yield models for teak plantations in Costa Rica [J]. *Forest Ecology and Management*, 2004, 189:97-110.
- [3] ANTA M B, BLSNCO H S, REY I C. Dynamic growth model for I-214 poplar plantations in the northern and central plateaus in Spain [J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255: 1167-1178.
- [4] 石丽萍, 冯仲科. 人工林生长与收获预测模型的基本方法 [J]. 北京林业大学学报, 2005, 27(增刊2): 222-225.
- [5] 魏占才. 长白落叶松人工林林分模型的应用 [J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 31-33.
- [6] GARCIA O. On bridging the gap between tree-level and stand-level models [EB/OL]. [2009-01-08]. <http://web.unbc.ca/~garcia/publ/greenw.pdf>.
- [7] QIN J H, CAO Q V. Using disaggregation to link individual-tree and whole-stand growth models [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2006, 36: 953-960.
- [8] 孟宪宇. 测树学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996: 267-295.
- [9] BATES J M, GRANGER C W J. The combination of forecasts [J]. *Operation Research Quarterly*, 1969, 20: 451-468.
- [10] NEWBOLD P, GRANGER C W J. Experience with forecasting univariate time series and the combination of forecasts [J]. *Journal of the Royal Statistical Society (Series A)*, 1974, 137: 131-165.
- [11] KAPETANIOS G, LABHARD V, PRICE S. Forecast combination and the bank of England's suite of statistical forecasting models [J]. *Economic Modeling*, 2008, 25: 772-792.
- [12] NEWBOLD P, ZUMWALT J K, KANNAN S. Combining forecasts to improve earnings per share prediction: An examination of electric utilities [J]. *International Journal of Forecasting*, 1987, 3(2): 229-238.
- [13] NEWBOLD P, HARVEY D I. Forecast Combination and Encompassing [C]// CLEMENTS M P, HENDRY D F. *A companion to economic forecasting*. Oxford: Blackwell Publishers, 2002: 268-283.
- [14] 刘启浩, 朱才斌. 基于组合预测的风险值研究 [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2008, 8(3): 17-21.
- [15] 徐雁, 陈新度, 陈新. 组合预测在分销系统辅助决策中的应用 [J]. *计算机工程*, 2008, 4(13): 220-223.
- [16] GREEN E J, STRAWDERAMAN W E. Reducing recommended sample size for forest inventories through use of composite estimator [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 1986, 16: 1116-1118.
- [17] 李际平, 刘素青. 基于最小偏差的林分生长组合预测模型及其应用 [J]. 中南林学院学报, 2004, 24(5): 80-83.
- [18] PIENAAR L V, HARRISON W M. A stand table projection approach to yield prediction in unthinned even-aged stands [J]. *Forest Science*, 1988, 34: 804-808.
- [19] ZHANG L, MOORE J A, NEWBERRY J D. Disaggregating stand volume growth to individual trees [J]. *Forest Science*, 1993, 39: 295-308.
- [20] YUE C F, KOHNLE U, HEIN S. Combining tree- and stand-level models: A new approach to growth prediction [J]. *Forest Science*, 2008, 54: 553-566.
- [21] 杜纪山, 唐守正. 林分断面积生长模型研究评述 [J]. 林业科学, 1997, 10(6): 599-606.
- [22] CHIKUMBO O, STEWARD G A. A stand basal area model for plantation grown New Zealand kauri [J]. *Ecological Modeling*, 2007, 209: 367-376.
- [23] LIANG J J, BUONGIORNO J, MONSERUD R A, et al. Effects of diversity of tree species and size on forest basal area growth, recruitment, and mortality [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 243: 116-127.
- [24] 杜纪山, 唐守正. 杉木林分断面积生长预估模型及其应用 [J]. 北京林业大学学报, 1998, 20(4): 1-5.
- [25] 胡晓龙. 长白落叶松林分断面积生长模型的研究 [J]. 林业科学, 2003, 16(4): 449-452.
- [26] 李春明, 杜纪山, 张会儒. 间伐林分的断面积生长模型研究 [J]. 林业资源管理, 2004(3): 52-55.
- [27] CAO Q V. Annual tree growth predictions based on periodic measurements [EB/OL]. [2009-01-02]. <http://www.rnr.lsu.edu/Cao/Publications.htm>.
- [28] MOSERUD R A. Time-series analyses of tree ring chronologies [J]. *Forest Science*, 1986, 32: 349-372.
- [29] OCHI N, CAO Q V. A comparison of compatible and annual growth models [J]. *Forest Science*, 2003, 49: 285-290.
- [30] CAO Q V, STRUB M. Evaluation of four methods to estimate parameters of an annual tree survival and diameter growth model [J]. *Forest Science*, 2008, 54: 617-624.
- [31] 高惠璇. SAS系统——SAS/STAT软件使用手册 [M]. 北京: 中国统计出版社, 1997.

(责任编辑 冯秀兰)