

基于单木水平和林分水平的油松兼容性生长模型

王少杰¹, 邓华锋^{1*}, 吕常笑¹, 黄国胜², 王雪军²

(1. 北京林业大学 省部共建森林培育与保护教育部重点实验室,北京 100083; 2. 国家林业局 调查规划设计院,北京 100714)

摘要:以油松林分为研究对象,基于北京市一类连续清查数据 161 块油松林分 2 期固定样地,建立单木水平和林分水平模型,利用组合预测法把油松单木水平模型和林分水平模型组合起来,用最优加权法计算单木水平和林分水平的权重系数,最后用 3 项数学指标 M_{AD} 、 R_{MSE} 、 R^2 评估模型的预测效果。结果表明,所建的单木水平、林分水平和组合水平模型的预测效果均较好,经过分析比较,组合预测法预测油松断面积、蓄积量生长模型的精度高于单木水平和林分水平预测的精度。组合预测法所建立的模型结合了单木水平、林分水平模型的优点,提高了油松林分生长预测模型的兼容性,保障了油松林分生长模型预测结果的一致性,也可以用来预测下一期油松林分断面积、蓄积量生长规律。

关键词:年龄隐含的单木生长模型;油松;林分断面积;林分蓄积量;组合预测法

中图分类号:S758.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)06-0243-07

Compatibility of Growth Model for *Pinus tabulaeformis* Based on Tree-and Stand-levels

WANG Shao-jie¹, DENG Hua-feng^{1*}, LYU Chang-xiao¹, HUANG Guo-sheng², WANG Xun-jun²

(1. The Key Laboratory Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

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

Abstract: Taking *Pinus tabulaeformis* as the object of research, using the periodically inventory data of 161 permanent sampling plots in Beijing, growth models based on tree-and stand-levels were established, and the two models were then combined by forecast combination. Weight coefficients of different models in the forecast combination models were calculated by optimal weight method. Finally, three mathematical indicators M_{AD} , R_{MSE} and R^2 were used to evaluate and predict the performance of the models. Three kinds of the models based on tree-, stand-and combination-levels all exhibited great prediction results. After analyzing and comparing, it was found that the accuracy of combination model was much better than the other two models when they were used to predict stand basal area growth and stand volume growth. The forecast combination model combined the advantages of the other two models, it improved the compatibility of *P. tabulaeformis* growth model from different levels, which could predict the growth of next stage in stand basal area and stand volume.

Key words: age implied individual tree model; *Pinus tabulaeformis*; stand basal area; stand volume; forecast combination method

林分生长和收获模型是研究森林生长动态变化规律的基本手段,长期以来受到国内外林业工作者的高度重视。近些年来,许多学者提出了大量不同

类型的林分生长模型^[1-4]。林分断面积和蓄积量是预估林分收获量的重要变量,具有较高的稳定性和可预测性,可以反映经营单位经营森林的状况和水

收稿日期:2016-03-12 修回日期:2016-05-15

基金项目:国家林业公益性行业科研专项(201204510)。

作者简介:王少杰,男,在读硕士,研究方向:森林资源监测与评价研究。E-mail:wsjcgzw@163.com

* 通信作者:邓华锋,男,教授,研究方向:从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail:denghuafeng@bjfu.edu.cn

平、经营效果。油松(*Pinus tabulaeformis*)作为北京市主要的造林绿化树种之一,在保护生态环境方面发挥着至关重要的作用,因此,提高油松经营管理水平,准确预估油松生长规律具有重要意义。在森林经营中,林分生长模型分为2类:单木水平生长模型和林分水平生长模型。2类模型各有侧重点,单木水平模型注重个体的生长状况,但容易形成误差累积;林分水平模型注重整体的收获量,却得不到单株林木的信息^[5]。

为了提高预测模型的精度,1969年J. M. Bates^[6]等首次提出组合预测法,开创了一新领域的研究。C. Yue^[7]等以挪威云杉(*Picea abies*)为研究对象,通过结合单木和林分水平生长模型,最终达到了提高林分断面精度的目的。近年来,组合预测法引起了国内大量学者的关注,最先是被应用到经济学、物理学和企业的研究领域中^[8-10],随后才被引入到林业中。李际平^[11]等利用组合预测法把一元模型和三元模型组合起来,预测杉木(*Cunninghamia lanceolata*)达到了很高的预估精度;张雄清^[12]等在建立林分油松断面模型时利用可变生长

率法,引入组合预测法,把单木水平和林分水平模型组合起来,提高林分预估精度。但组合预测法在断面面积和蓄积量上的应用相对较少,对于在油松林分蓄积量上的应用鲜见报道。

本研究以油松林分为研究对象,采用与年龄无关的生长模型作为单木模型,以前期实测值为自变量的生长模型作为林分水平模型,将两者结合起来,以解决油松林分单木水平和林分水平相容性问题,提高油松林分预估精度。

1 数据来源及整理

试验数据为北京市2001、2006、2011组成的3期复测的一类连续清查的油松调查样地数据,样地设置的面积为0.066 7 hm²,样地固定每隔5 a复查1次。去除一些数据缺失及异常的调查样地,3期调查数据可以组成调查期为5 a的样地数为161块。其中,从2001年到2006年的样地有75块,样木3 766株,从2006年到2011年的样地有86块,样木4 340株(表1、表2)。随机抽样选出102块样地建模,剩余59块样地用于检验。

表1 建模数据与检验数据的分布

Table 1 Distribution of data for modeling and validation

生长期/年份	样本数量		建模数据		检验数据	
	样地/块	样木/株	建模样地/块	建模样木/株	检验样地/块	检验样木/株
2001—2006	75	3 766	102	2 442	25	1 327
2006—2011	86	4 340	59	2 691	34	1 646
合计	161	8 106	161	5 133	59	2 973

表2 油松林分及林木因子统计

Table 2 Statistics of stand variables and tree variables

变量	建模数据				检验数据			
	最小值	最大值	均值	标准差	最小值	最大值	均值	标准差
年龄/a	17	63	39	11	14	58	38	9
优势高/m	3.217	22.172	8.615	2.766	3.551	15.593	7.320	2.338
林分断面面积/(m ² ·hm ⁻²)	1.355	32.870	12.320	7.560	1.196	45.227	10.339	8.719
林分蓄积/(m ³ ·hm ⁻²)	4.393	136.890	50.657	32.107	4.273	197.136	42.014	37.720
单木胸高断面积/m ²	0.002 0	0.123 8	0.016 3	0.011 7	0.002 0	0.076 5	0.013 6	0.010 5
单木材积/m ³	0.003 0	0.516 0	0.067 1	0.053 7	0.004 0	0.985 0	0.055 2	0.054 1

2 研究方法

2.1 单木模型建立方法

单木生长模型根据竞争指标是否含有林木距离的信息,可以分为与距离无关和与距离有关的2类。与距离有关的单木模型需要林木空间位置信息,结构较复杂,在实际工作应用中受很大的限制;与距离无关的单木模型不需要考虑树木间的位置,可以大量地减少外业的工作量,在实际工作研究中易于运

用^[13-14]。研究单木模型通常情况下要求年龄、立地质量、密度指标或与林木之间竞争有关信息的输入,在应用中受到一定的限制,由于一类清查数据没有单木年龄数据,葛宏立^[15]等在Schumacher模型的基础上导出年龄隐含模型,并将此模型并应用到森林资源连续清查生长模型系统,逐步推广应用。因此,本研究采用年龄隐含的方法建立油松单木生长模型。模型的表达式如下:

$$y_k = y_2 = a \cdot \exp \left(\frac{-b}{k - \frac{b}{\ln y_1 - \ln a}} \right) \quad (1)$$

式中: y_2 为后期单木的胸径 D_2 或单木材积 v_2 , y_1 是前期单木胸径 D_1 或单木材积 v_1 ; y_k 为经过 k a 变化后的预估值; k 为预测年限, 研究 k 取值为 5 (a), 即: 调查间隔期为 5 a。

(1) 式的具体推导如下: 设 $y = f(x) = a \cdot \exp(-b/x)$, 则前期和后期林分观测值模型表达式分别为 $y_1 = a \cdot \exp(-b/A_1)$, $y_2 = a \cdot \exp(-b/A_2)$, 其中 A_1 、 A_2 分别为前期和后期单株木年龄, $A_2 = A_1 + k$ 。将前期观测值中的 A_1 求出后带入后期观测值表达式即可得到公式(1)。模型(1)中, 以前期的观测值为自变量, 前期的观测值从某种意义上说, 具有可以间接反映林相、立地质量、单株林木之间的竞争关系等因子的作用。从模型的公式可以看出, 模型的预估误差仅在估计年限 k a 之内产生, 当预估年限 k 为零时, 预估误差为零, 且误差随着 k 值的增大而增大。因此只要 k 值在一定大小范围内, 模型的预估精度较高^[15]。

由单木胸径(D)推导单木断面积(G), 公式如下:

$$g = \frac{\pi D^2}{40000} \quad (2)$$

根据式(1)式求出单木胸径(D), 将得到的单木胸径代入公式(2)中, 得到单木断面积模型:

$$g = \frac{\pi D^2}{40000} = \left(\frac{\pi}{40000} \right) \cdot a^2 \exp \left(\frac{-2b}{k - \frac{b}{\ln D_0 - \ln a}} \right) \quad (3)$$

式中: π 为常数, 取值为 3.142; D_0 为前期单木胸径; g 为后期单木胸高断面积; a, b 为待估测参数。

根据式(1)和式(3)可以推算出后期对应样地中每株林木的材积和断面积, 再依据样地内林木的株数和样地面积, 即可得到单木水平的单位面积林分断面积和蓄积量估计值, 计算公式如下:

$$G' = \frac{\sum_{i=1}^j g_i}{S} \quad (4)$$

$$V' = \frac{\sum_{i=1}^j v_i}{S} \quad (5)$$

式中: g_i, v_i 为后期第 i 株树的单木断面积和材积预测值, j 为样地林木株数。 S 为样地面积, 取 0.066 7 hm²。

2.2 林分水平的林分断面积和蓄积量建立方法

2.2.1 林分水平的断面积建模方法 林分断面积是核心的测树因子, 具有较高的稳定性、可预测性、简单和容易测量等优点, Richards 和 Schumacher

模型是目前主要的 2 种经验方程, 都是以林分年龄为自变量, 具有较好的预估精度^[17]。张雄清^[18-19]在 Schumacher 模型的基础上, 利用前后 2 期林分的年龄, 及前 1 期的林分断面积作为自变量建立林分断面积模型, 有效减少模型残差的自相关性, 模型的拟合效果较好。其林分断面积模型形式如下:

$$G_2^s = \exp[(A_2/A_1) \cdot \ln(G_1^s) + (1 - (A_2/A_1)) \cdot (a_1 + a_2 G_1^s)] \quad (6)$$

式中: A_1, A_2 分别为前期和后期的林分平均年龄; G_1^s, G_2^s 分别为前期和后期林分断面积; a_1, a_2 为待估参数。

2.2.2 林分水平的蓄积量建模方法 林分的生产潜力及效益的评价离不开蓄积量的大小, 林分蓄积量可以反映经营单位经营森林的状况和水平。人为干扰程度强弱, 立地条件好坏和林分密度大小都对林分蓄积量有着重要的影响。研究以林分年龄、林分每公顷株数及前期林分相对植距、断面积和蓄积为自变量, 建立林分水平的油松蓄积量模型^[4]。公式如下:

$$V_2^s = V_1^s + \exp[a_1 + a_2 RS_1 + a_3 A_1 / \ln(N_1) + a_4 / \ln(G_1^s)] \quad (7)$$

式中: A_1 为前期林分的平均年龄; N_1 为前期林分的每公顷株数; RS_1 为前期林分的相对植距, 计算公式为 $RS_1 = (\sqrt{10000/N_1})/H_1$; G_1^s 为前期林分断面积; V_1^s, V_2^s 为前期和后期林分蓄积; $a_1 \sim a_4$ 为待估参数。

2.3 组合预测法

组合预测法是利用不同模型给出的预测结果通过加权平均的方法来构造新的预测模型, 能够较大限度利用不同模型样本信息, 从而达到改善预测结果的目的。模型的公式如下:

$$G^c = k_1 G' + k_2 G^s \quad (8)$$

$$V^c = k_1 V' + k_2 V^s \quad (9)$$

$$k_1 + k_2 = 1 \quad (10)$$

式中: G^c 和 V^c 分别为断面积和蓄积量组合预测值; k_1, k_2 分别表示单木、林分水平的权重因子;

在组合预测法中, 权重大小的选取对提高组合预测结果的精度至关重要。误差平方和法、方差协方差法和最优加权法是常见的确定权重的方法。本研究在前人的研究基础上, 选择最优加权法来确定权重^[4, 12, 18]。最优加权法可以有效的降低预测误差, 其原理为依据某种最优准则构造目标函数, 在限制条件下极小化目标函数, 求得组合模型各组分的权重系数^[19]。

构造的目标函数为 $\min \sum_{m=1}^M [G_m - (k_1 G'_m +$

$k_2 G_m^s)]^2$, 约束条件为 $k_1 + k_2 = 1$ 。式中: G_m 为第 m 个样地林分的每 hm^2 断面面积。针对该目标函数, 用矩阵运算简化模型的形式。计加权系数向量 $K_g = [k_1, k_2]^T$, $R = [1, 1]^T$, 第 i 种方法的预测误差向量: $E_i = [e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in}]^T$, 式中: T 为转置; i 取 1 或 2, 分别代表单木水平或林分水平模型; e_{in} 表示第 i 种水平下第 n 个样地上林分预估误差。则预测误差矩阵 $e = [E_1, E_2]$ 。

$$\text{记 } E = e^T \cdot e = \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \end{pmatrix} (E_1 E_2) = \begin{pmatrix} E_1 E_1 & E_1 E_2 \\ E_2 E_1 & E_2 E_2 \end{pmatrix},$$

则断面面积误差平方和 $J = K_g^T E K_g$, 由约束条件 $k_1 + k_2 = 1$ 可得 $R^T K_g = 1$ 。最后经数学推导运算后得出林分断面面积权重向量: $K_g = \frac{E^{-1} R}{R^T E^{-1} R}$, 式中 E^{-1} 为 E 的逆矩阵。同理可得林分蓄积量的权重向量 K_v 。

3 模型精度评价

所建立的单木水平和林分水平的模型参数估计均用 Forstat2.2 软件的非线性回归模块来完成, 并用 Excel 进行数据处理, 选取数学统计量指标平均绝对误差(M_{AD})、均方根误差(R_{MSE})和模型决定系数(R^2), 评估比较林分断面面积和林分蓄积量以及它们的组合模型的拟合效果。

$$M_{AD} = \sum |y_i - \hat{y}_i| / n \quad (11)$$

$$R_{MSE} = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (12)$$

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

式中: y_i 为模型林分断面面积和蓄积量的实际值; \hat{y}_i 为模型林分断面面积和蓄积量的预测值; \bar{y} 为样本平均值; n 为样本个数。

参数估计的方法很多, 常见有 3 大类: 最小二乘法、矩法和极大似然法。最小二乘法本质上是求观测值与估计值残差平方和最小的极值问题, 矩法是

利用总体对未知参数的反解, 最大似然法则是似然函数最大时的参数估计量。最小二乘法参数估计法不需要知道样本总体分布, 且对样本容量要求较松, 方法较灵活; 矩法和最大似然法一般适用于大样本情况下模型参数的估计, 且最大似然法需要已知总体变量的分布, 分布设定一般有人为因素^[20]。研究使用的数据基本符合最小二乘法对变量的要求, 因此, 采用最小二乘法估计模型的参数。

4 结果与分析

所拟合的油松单木断面面积、材积模型和油松林分断面面积、蓄积量生长模型的参数估计值、标准误和模型的评价指标统计结果(表 3)表明, 在单木水平上, 单木断面面积模型的 M_{AD} 为 0.001 7, R_{MSE} 为 0.002 4, R^2 高达 0.975 9; 单木材积模型的 M_{AD} 为 0.008 1, R_{MSE} 为 0.011 5, R^2 为 0.995 3; 从林分水平上看, 林分断面面积模型的 M_{AD} 为 1.216 5, R_{MSE} 为 1.803 5, R^2 为 0.951 3; 林分蓄积量模型的 M_{AD} 为 2.456 5, R_{MSE} 为 3.106 8, R^2 超过 0.99。由统计量大小可知, 所拟合的单木水平和林分水平的生长模型是适用的, 且模型各自的拟合效果都较好。

油松断面面积权重系数分别为 0.747、0.253; 蓄积量权重系数分别为 0.121、0.879(表 4)。在断面面积建模数据中, 从 M_{AD} 、 R_{MSE} 、 R^2 3 项数学指标的大小看出, 组合水平模型的 M_{AD} 和 R_{MSE} 最小, R^2 最大。其 3 项指标大小分别为 0.569 7、0.752 4、0.985 9; 其次是单木水平模型, M_{AD} 和 R_{MSE} 分别为 0.732 5、0.935 2 均高于组合水平模型, R^2 为 0.984 7 低于组合水平模型; 最后是林分水平, 拟合效果较前两种水平差, M_{AD} 、 R_{MSE} 、 R^2 分别为 1.216 5、1.803 5、0.951 3(表 5)。从断面面积检验指标统计量看出, 所得拟合效果同建模数据拟合的结果是一致的, 组合水平模型的拟合精度最高, 其次是单木水平模型, 最后是林分水平模型(表 6)。

表 3 模型参数估计值及模型评价指标统计量

Table 3 Parameter estimates and model evaluations

属性	参数	估计值	标准误	平均绝对偏差	均方根误差	决定系数
单木断面积/ m^2	a	182.754 7	1.105 0	0.001 7	0.002 4	0.975 9
	b	332.241 6	27.831 2			
单木材积/ m^3	a	3.229 1	1.115 2	0.008 1	0.011 5	0.995 3
	b	331.853 9	20.325 7			
林分断面面积/($\text{m}^2 \cdot \text{hm}^{-2}$)	a_1	3.712 0	0.282 6	1.216 5	1.803 5	0.951 3
	a_2	-0.026 7	0.015 1			
林分蓄积量/($\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$)	a_1	3.706 4	0.157 2	2.456 5	3.106 8	0.990 6
	a_2	-1.537 7	0.167 8			
	a_3	-0.116 7	0.022 8			
	a_4	-0.033 0	0.088 7			

表4 林分断面积和蓄积量所确定的权重系数

Table 4 Weight coefficients based on stand basal area and volume

属性	断面积	蓄积量
	权重系数(K_g)	权重系数(K_v)
k_1	0.747	0.121
k_2	0.253	0.879

表5 不同水平林分断面积模型评价统计量(建模数据)

Table 5 Model evaluations on different stand basal area models (fit data)

属性	单木	林分	组合
	水平模型	水平模型	水平模型
平均误差	0.7325	1.2165	0.5697
均方根误差	0.9352	1.8035	0.7524
决定系数	0.9847	0.9513	0.9859

表6 不同水平林分断面积模型评价统计量(检验数据)

Table 6 Model evaluations on different stand basal area models(validation data)

属性	单木	林分	组合
	水平模型	水平模型	水平模型
平均误差	0.4853	0.7679	0.3969
均方根误差	0.9498	2.0640	0.8456
决定系数	0.9881	0.9440	0.9906

在蓄积量建模数据(表7)中,组合水平模型的 M_{AD} 为2.4308, R_{MSE} 为3.0798,此2项指标均低于单木水平和林分水平模型相对应的指标;组合水平模型 R^2 为0.9908,高于单木水平和林分水平模型相对应的统计指标,可知组合水平模型的拟合效果高于单木水平和林分水平模型拟合效果,且林分水平模型拟合效果比单木水平好。在蓄积量检验数据(表8)中得出,通过组合水平预估的蓄积量模型拟合效果比单木水平和林分水平模型要好,这与建模数据拟合结果一致。

表7 不同水平林分蓄积量模型评价统计量(建模数据)

Table 7 Model evaluations on different stand volume models (fit data)

属性	单木	林分	组合
	水平模型	水平模型	水平模型
平均误差	3.3577	2.4565	2.4308
均方根误差	4.2864	3.1068	3.0798
决定系数	0.9822	0.9906	0.9908

表8 不同水平林分蓄积量模型评价统计量(检验数据)

Table 8 Model evaluations on different stand volume models(validation data)

属性	单木	林分	组合
	水平模型	水平模型	水平模型
平均误差	3.2606	3.3473	3.2452
均方根误差	4.4847	4.2464	4.0930
决定系数	0.9859	0.9873	0.9882

分别建立断面积和蓄积量3种不同水平的实测

值和预测值线性相关方程(图1、图2)。方程的相关系数 R^2 都接近1,常数项接近0,表明拟合的生长模型的预测效果均较好,所用的模型都是适用的。无论是断面积还是蓄积量,组合水平模型的 R^2 均高于单木水平模型和林分水平模型,模型的实际值分布更加靠近拟合的直线,拟合预估的效果最好。

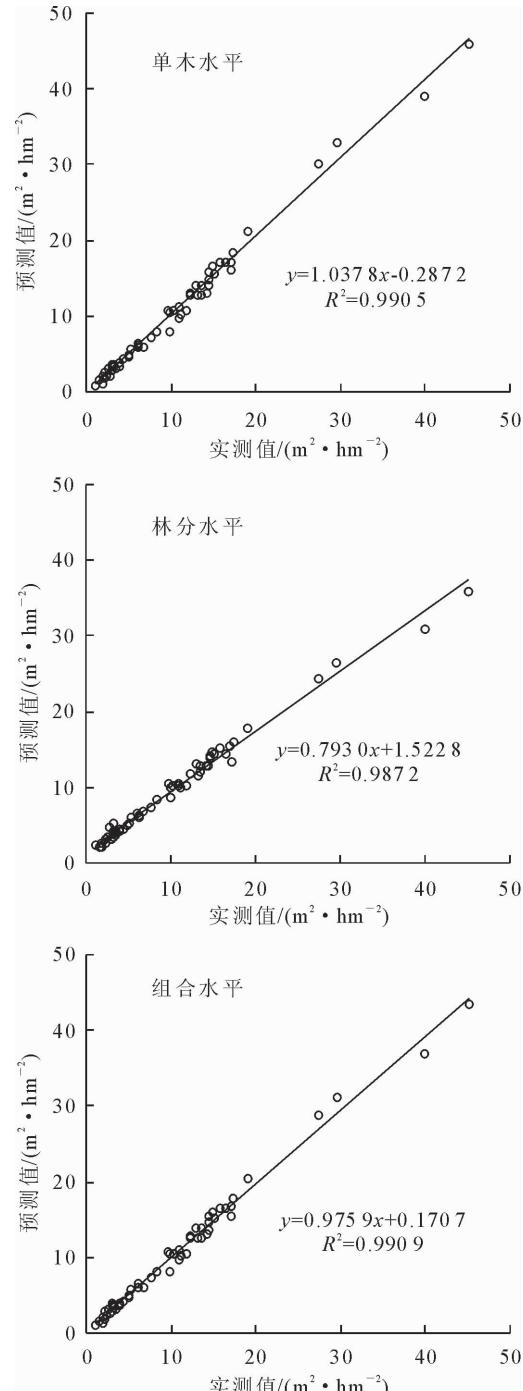


图1 3种不同水平的林分断面积预测值与实际值线性相关

Fig. 1 Correlations of predicted and observed stand basal area based on three different levels

5 结论与讨论

组合预测法综合2水平的特点,充分利用各单

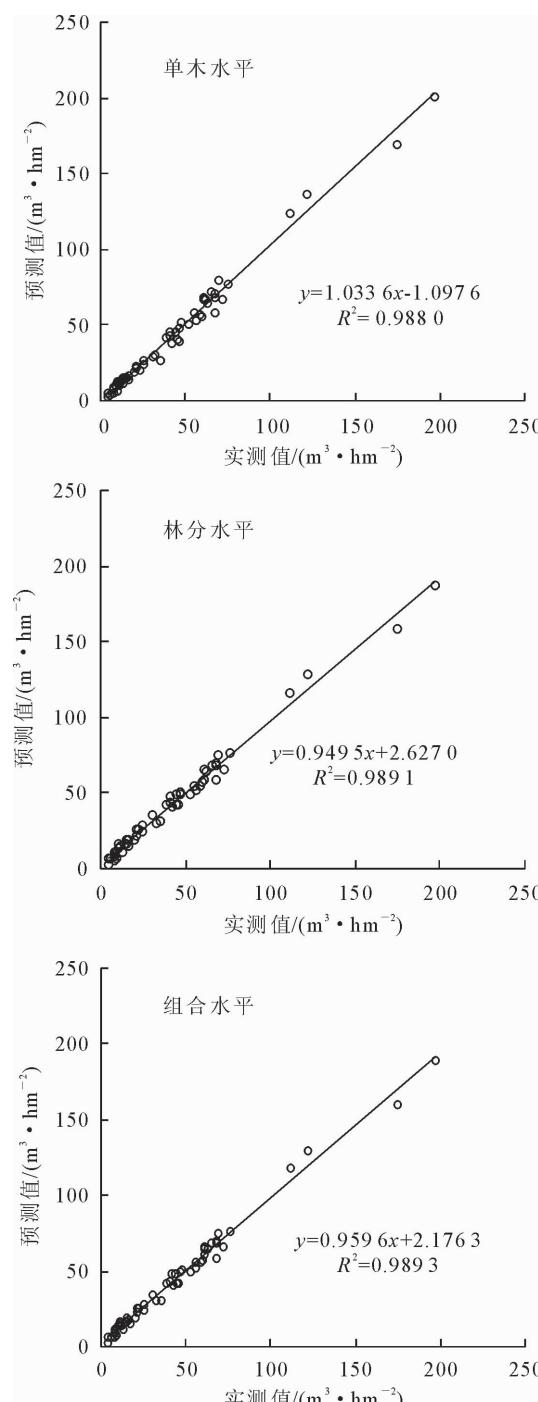


图 2 3 种不同水平的林分蓄积量预测值与实际值线性相关

Fig. 2 Correlations of predicted and observed stand volume based on three different levels

项模型的已有信息,避免单一模型丢失信息的缺陷,能有效地减少模型的随机性,提高模型的预估效果和稳定性,更加全面反应林木生长规律^[21]。本研究采用年龄隐含的单木生长模型作为单木水平模型,以前期实测值为自变量建立林分水平生长模型,利用组合预测法预测林分断面和蓄积量,提高了油松林分生长预测模型的兼容性,保障了油松林分生长模型预测结果的一致性。模型的验证采用 M_{AD} 、 R_{MSE} 、 R^2 等 3 个数学统计量指标,经过分析比较,无

论是预测林分断面积还是林分蓄积量模型,利用组合预测法所建立的模型比单木水平和林分水平模型的预测精度高,与李际平^[11]等、张雄清^[4]等研究结果一致。组合预测法不仅适用于断面积和蓄积量的研究,还可应用于其他林分因子的研究中。

在组合预测法中,单项模型的拟合精度越高,其组合预测模型的拟合精度越高^[22]。研究用到的油松样地分布不集中,且数据间存在时间相关性,下一步可以在模型中加入区域效应和时间效应,建立各单项混合模型,提高各单项模型的拟合精度,进而提高组合预测模型的预估精度。组合预测法中权重的选择对提高组合预测结果的精度至关重要。研究利用最优加权法确定组合预测模型各单项的权重系数,可以有效消除单项预测在组合预测模型中有偏的影响,从而使模型达到无偏^[23]。这样计算的权重系数是不变的,但随着样地数据结果的变化,不同单项模型预测效果时好时坏,权重系数应该是变化的,不是固定的,采用固定的权重系数可能会降低组合预测法的预估精度。今后可以根据样地结构,研究变权重的组合预估法来预测林分生长模型,进一步提高预估精度。

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(1):9-24.
- [2] PALAHÍ M,PUKKALA T,KASIIMIADIS D,*et al*. Modelling site quality and individual-tree growth in pure and mixed *Pinus brutia* stands in north-east Greece[J]. Annals of Forest Science,2008,65(5):501.
- [3] 戎建涛,何友均,应苗苗,等.丹清河林场天然次生林林分蓄积量生长模型[J].西北林学院学报,2014,29(3):155-160.
RONG J T,HE Y J,YING M M,*et al*. Volume growth models of natural secondary forest in Danqinghe Forest Farm, North-east China[J]. Journal of Northwest Forest University,2014,29(3):155-160. (in Chinese)
- [4] 张雄清,张建国,段爱国.基于单木水平和林分水平的杉木兼容性林分蓄积量模型[J].林业科学,2014,50(1):82-87.
ZHANG X Q,ZHANG J G,DUAN A G. Compatibility of stand volume model for tree-level and stand-level [J]. Scientia Silvae Sinicae,2014,50(1):82-87. (in Chinese)
- [5] QIN J,CAO Q V. Using disaggregation to link individual-tree and whole-stand growth models[J]. Canadian Journal of Forest Research,2006,36(4):953-960.
- [6] BATES J M,GRANGER C W J. The combination of forecasts [J]. Operational Research Quarterly,1969, 20(4):451-468.
- [7] YUE C,KOHNL U,HEIN S. Combining tree-and stand-level models:a new approach to growth prediction[J]. Forest Science,2008,54(5):553-566.

- [8] 程建东,杜积贵.组合预测方法在电力负荷预测中的应用[J].江苏电机工程,2011,30(6):38-40.
CHENG J D, DU J G. The application of the combined forecasting method in the power load forecast [J]. Jingsu Electrical Engineering, 2011, 30(6):38-40. (in Chinese)
- [9] 张青.基于神经网络最优组合预测方法的应用研究[J].系统工程理论与实践,2001(9):90-93.
ZHANG Q. Application research on an optimal mix forecasting method based on ANN [J]. System Engineering Theory and Practice, 2001 (9):90-93. (in Chinese)
- [10] 陈华友.组合预测方法有效性理论及其应用[M].北京:科学出版社,2008.
- [11] 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].中南林业科技大学学报,2004,24(5):80-83.
LI J P, LIU S Z. Combinatorial model for predicting stand growth based on minimal deviation and its application [J]. Journal of Central South Forestry University, 2004, 24 (5): 80-83. (in Chinese)
- [12] 张雄清,雷渊才,陈新美.林分断面积组合预测模型权重确定的比较[J].林业科学,2011,47(7):36-41.
ZHANG X Q, LEI Y C, CHEN X M. Comparison of weight computation in stand basal area combined model [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(7):36-41. (in Chinese)
- [13] 邓成.林分生长和收获模型整体化研究[D].长沙:中南林业科技大学,2009.
- [14] 黄新峰,亢新刚,孙玲,等.红松单木断面积生长模型[J].西北林学院学报,2011,26(3):143-146.
HANG X F, KANG X G, SU L, et al. Establishment of individual basal area growth model of Korean pine [J]. Journal of Northwest Forest University, 2011, 26 (3): 143-146. (in Chinese)
- [15] 葛宏立,孟宪宇,唐小明.应用于森林资源连续清查的生长模型系统[J].林业科学研究,2004,17(4):413-419.
GE H L, MENG X Y, TANG X M. Growth model system for continuous forest inventory [J]. Forest Research, 2004, 17 (4): 413-419. (in Chinese)
- [16] 葛宏立,项小强.年龄隐含的生长模型在森林资源连续清查中的应用[J].林业科学研究,1997(4):420-424.
GE H L, XIANG X Q. Application of the age-implicit growth model to continuous forest inventory [J]. Forest Research, 1997 (4):420-424. (in Chinese)
- [17] 王霓虹,杨英奎,戴巍.基于Richards方程的落叶松人工林断面生长模型[J].森林工程,2015,31(1):22-25.
WANG N H, YANG Y K, DAI W. The basal area growth model of larch plantation based on Richards equation [J]. Forest Engineering, 2015, 31(1):22-25. (in Chinese)
- [18] 张雄清,雷渊才,陈新美,等.组合预测法在林分断面积生长预估中的应用[J].北京林业大学学报,2010,32(4):6-11.
ZHANG X Q, LEI Y C, et al. Application of forecast combination in prediction of stand basal area [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2010, 32(4):6-11. (in Chinese)
- [19] 张雄清.北京地区油松林分生长,枯损和进界模型的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2012.
- [20] 胡德,郭刚正.最小二乘法、矩法和最大似然法的应用比较[J].统计与决策,2015(9):20-24.
- [21] 尹星露,肖先勇,孙晓璐.基于预测有效度和马尔科夫-云模型的母线负荷预测模型筛选与变权重组合预测[J].电力自动化设备,2015,35(3):114-119.
YIN X L, XIAO X Y, SUN X L. Bus load forecasting model selection and variable weights combination forecasting based on forecasting effectiveness and Markov chain-cloud model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3):114-119. (in Chinese)
- [22] 毛开翼.关于组合预测中的权重确定及应用[D].成都:成都理工大学,2007.
- [23] JEONG D I, KIM Y O. Combining single-value streamflow forecasts-a review and guidelines for selecting techniques [J]. Journal of Hydrology, 2009, 377 (3): 284-299.

(上接第235页)

- [15] 张强,苏印泉,张京芳,杜仲叶不同萃取物抗氧化活性比较分析[J].食品科学,2011,32(13):23-27.
ZHANG Q, SU Y Q, ZHANG J F. Antioxidant activity of extracts of *Eucommia ulmoides* Oliv. leaves [J]. Food Science, 2011, 32(13):23-27. (in Chinese)
- [16] 李武,李艳君,杨瑞丽.热带水果多酚提取物的抗氧化和抗增殖活性研究[J].现代食品科技,2013(10):2383-2387.
LI W, LI Y J, YANG R L. Antioxidant and antiproliferative activities of polyphenol extract from 12 tropical fruits [J]. Modern Food Science and Technology, 2013(10):2383-2387. (in Chinese)
- [17] 李坚斌,李琳,李冰,等.超声降解多糖研究进展[J].食品工业科技,2006(9):181-184.
LI J B, LI L, LI B, et al. Polysaccharides degraded by ultrasonic [J]. Science and Technology of Food Industry, 2006 (9): 181-184. (in Chinese)
- [18] 刁文超,吴昊,杨绍兰,等.南瓜多糖的分离、纯化及抗氧化活性研究[J].中国食品学报,2012,12(11):24-31.
DIAO W C, WU H, YANG S L, et al. study on the purification, separation, and antioxidant activity of polysaccharides from pumpkin [J]. Journal of Chinese Institute food Science and Technology, 2012, 12(11):24-31. (in Chinese)