

基于 FVS 的北京地区侧柏人工林单木模型的优化

马丰丰^{1,2},彭 晔²,段 勘³,贾黎明^{1,3*},张灿明⁴

(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. 湖南省林业科学院,湖南 长沙 410004;
3. 北京林业大学 国家能源非粮生物质原料研发中心,北京 100083;4. 湖南省水资源研究和利用合作中心,湖南 长沙 410013)

摘要:侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林面积约占北京市森林总面积的 25.96%,是北京山区造林的主要树种之一,但存在密度过大、树木生长过慢、树木生长分化严重等问题。基于美国 FVS (forest vegetation simulator) 系统,通过多元线性回归、非线性回归法构建和优化侧柏直径生长量模型、树高生长量模型和材积计算模型,来模拟侧柏人工林的生长过程,为科学经营侧柏人工林提供依据。检验结果表明,优化的 3 个模型拟合效果和预估效果良好。

关键词:侧柏;单木模型;优化;森林植被模拟器;北京

中图分类号:S791.38 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)06-0150-07

Optimization of Individual-tree Model for Plantations of *Platycladus orientalis* in Beijing Based on Forest Vegetation Simulator

MA Feng-feng^{1,2}, PENG Pai², DUAN Jie³, JIA Li-ming^{1,3*}, ZHANG Can-ming⁴

(1. Key Laboratory for Silviculture and Conservation of Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2. Hunan Academy of Forestry, Changsha, Hunan 410004, China;
3. National Energy R&D Centre for Non-food Biomass, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
4. Cooperation Center of Water Resources Research and Development, Changsha, Hunan 410013, China)

Abstract: *Platycladus orientalis* is one of the important afforesting tree species in Beijing mountainous area, accounting for about 25.96% of the total area of plantations in Beijing. However, some problems occurred in *P. orientalis* plantations, such as excessive density, and slow growth rate, and serious differentiation during tree growth. In this paper, based on the forest vegetation simulator (FVS) system of America, the tree diameter growth model, height growth model and volume computation model were constructed and optimized by multiple linear and non-linear regression analysis. The models established could simulate the growth of *P. orientalis* plantation to provide a basis for its scientific management. The examination results indicated that the three optimized models had good fitting and expected results.

Key words: *Platycladus orientalis*; individual-tree model; optimization; forest vegetation simulator; Beijing

林分生长模型可以模拟和预测林分生长动态过程,也可以根据经营目标和林分现状,预测采取不同经营措施后的林分生长状况,为经营技术决策提供依据^[1]。美国的森林植被模型(forest vegetation simulator, FVS)^[2-3]在此方面已较成熟,FVS源于 A. R. STAGE^[4]的 Prognosis 模型^[5],是一个基于许

多单木与距离无关的生长模型构建起来的高度集成的森林生长分析系统^[6]。目前美国已将该软件系统推广其国内 20 多个地区,主要用于森林资源的经营管理、预测和决策,而国内尚缺乏这类广泛应用的森林资源经营管理系统。为适应我国树木的生长规律,实现 FVS 的中国化,需重新构建我国树种的生

收稿日期:2017-04-06 修回日期:2017-06-22

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017ZY21);国家林业局“948”引进项目(2005-4-02);国家林业局林业科技成果推广项目(2011-44)。

作者简介:马丰丰,女,助理研究员,硕士,研究方向:森林生态学。E-mail:mafengfeng0403@126.com

*通信作者:贾黎明,男,教授,博士,研究方向:森林生态、森林培育。E-mail:jlm@bjfu.edu.cn

长与收获模型。为此,本研究以北京地区侧柏人工林为对象,在认真研究和解析美国FVS系统的基础上,根据FVS-CR(central rockies,CR)^[7]的要求,通过大量的样地调查和数据采集,在编制侧柏人工林的立地指数表^[8]和计算树皮调整因子^[9-10]的基础上,建立和优化了侧柏单木直径、树高和材积生长模型。目前基于FVS构建生长模型的树种已推广至油松^[11-12]、栓皮栎^[13]、华北落叶松^[6]、长白落叶松^[14]等树种,涉及的模型也更加全面^[12]。

在FVS中,模拟林分未来的生长时,首先是对直径生长量的预估。同时,树木各方面的生长也都依赖于直径或直径生长量,因为在直径生长模型中考虑了随机因素,在第一个周期结束后,直径就成为树高模型的主要自变量。对直径生长量的预估也是最重要的生长量预估,且直径生长模型的预估精度直接影响其他模型的预估结果,因此,提高该模型的精度,对预估侧柏单木生长动态变化有着重要的意义。由于树冠变化模型和枯损率模型的变量因子不含立地指数,其预测精度会随着直径生长量模型、树高生长量模型和材积计算模型的精度的提高而提高。

1 研究地概况

北京(115.7° — 117.4° E, 39.4° — 41.6° N)三面环山,海拔范围为8~2 303 m,属典型的北暖温带半湿润大陆性季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥,春、秋短促。全年无霜期180~200 d,平均气温 $10\sim12^{\circ}\text{C}$,平均年降水量644 mm。降水季节分配很不均匀,全年降水量的80%集中在夏季。北京山区为典型的干旱半干旱石质山地,土壤贫瘠、水资源亏缺已成为北京造林成活率及林木生长最主要的限制条件。

2 研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 固定复位样地数据 来源于北京市林业勘察设计院提供的侧柏4次固定复位样地的调查数据(1987、1991、1996、2001年)。固定复位样地29块,样木1 017株,包括12块3次复位样地,9块2次复位样地,8块1次复位样地。样地面积 $25.87\times25.87\text{ m}^2$,分设于北京市的18个区县。在各样地内,林分调查主要包括优势树种、起源、权属、海拔、龄组、郁闭度、坡度、坡向、坡位、土壤厚度、林分平均胸径、平均高、平均年龄等指标。单木调查主要包括样地号、样木号、树种代码、立木类型、检尺类型、胸径和材积等指标。

样木平均年龄区间在5~40 a,平均直径分布区

间为4.9~17.7 cm,平均高分布区间为4.7~11.5 m,密度分布区间769~6 700株·hm⁻²。样地分布的海拔区间为50~870 m。

2.1.2 解析木数据 收集侧柏解析木59株,其中,北京市园林绿化局提供40株,另外,19株解析木数据来源于课题组2007年调查样地的结果。样地面积100~1 000 m²,分设于海淀、密云、平谷、昌平、石景山、房山、怀柔、门头沟和延庆等地,主要测定了海拔、郁闭度、林分密度、坡度、坡位、坡向、土层厚度、胸径、树高、优势木树高、冠幅等因子。根据样地所处的立地类型选取典型样地,根据每块样地树木的平均胸径和平均树高选取平均标准木及平均优势木进行树干解析。

收集到的解析木年龄区间为18~81 a,胸径区间为4.7~14.8 cm,树高区间为3.8~10.0 m,密度区间为675~4 991株·hm⁻²。

2.2 模型变量的筛选与剔除

2.2.1 直径生长量模型 根据编制的立地指数和模型中的变量,采用固定复位样地数据中未受人为干扰(如人工抚育、补植等措施)和自然灾害(病虫害和火灾等)的数据建立直径生长量模型的数据库,其中,90%的数据用于建模,10%的数据用于检验。建模前,利用软件SPSS 13.0中的explore功能剔除建模数据中的奇异值40个。基于FVS的直径生长量模型的基本形式如下:

$$\ln(dds) = a_0 + a_1 * \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE + a_2 * \sin(\text{ASPECT}) * SLOPE + a_3 * EL + a_4 * EL^2 + a_5 * SLOPE + a_6 * SLOPE^2 + a_7 * BAL + a_8 * \ln(DBH) + a_9 * \ln(BA) + a_{10} * DBH^2 + a_{11} * BAL / \ln(DBH + 1) + a_{12} * SI \quad (1)$$

式中,dds为去皮平方平均直径(5 a);ASPECT为坡向(度);SLOPE为坡度(百分比);EL为海拔/1 000(m);BAL为林分中大于目标树的其它林木胸高断面积之和;DBH为胸径(cm);BA为林分总断面积;SI为立地指数; a_0 — a_{12} 为模型方程参数。

选择多元线性回归之逐步回归法对直径生长量模型方程进行拟合,剔除未通过检验的变量,选择对方程贡献最大的自变量进入方程,拟合直径生长量模型方程参数。

2.2.2 树高生长量模型 对于树高生长量模型来说,通过已构建的变量因子立地指数和扩大数据量,来优化该模型,从而提高其预测的精度。

首先,利用编制的立地指数表,根据解析木数据中的树高及其年龄,查出所对应的立地指数,再分别根据立地指数统计数据,建立数据库,其中选取40株解析木有关树高生长量模型的数据作为建模数

据,其余 19 株解析木数据作为检验数据。

模型选用的 6 种理论生长方程 (Richards, Weibull, Logistic, Korf, Mitscherlich, Schumacher, 表 1)。然后,利用树高生长量模型数据库中的数据,通过非线性回归方法对各立地指数下的这 6 种

理论方程的参数进行估计,根据估计结果,利用幂函数方程 $y = \alpha_1 * x^{\alpha_2}$ 来拟合 6 种理论生长方程中的尺度参数或形状参数与立地指数的关系,选择相关系数最大的方程作为树高生长量模型的参数。

表 1 6 种理论生长方程

Table 1 Six theoretic growth equations

方程	简称	表达式	参数
Richards	R	$y = a(1 - \exp(-bx))^c$	a 为 y 的最终值即上渐近值, c 为绝对曲线形状及拐点, b 与生长速度有关。 $a, b, c > 0$
Weibull	W	$y = a(1 - \exp(-bx^c))$	a 为 y 的最终值即上渐近值, b 为尺度参数, c 为形状参数。 $a, b, c > 0$
Logistic	L	$y = \frac{a}{1 + \exp(b - cx)}$	a 为 y 的最终值即上渐近值, c 为形状参数, $a, c > 0$
Korf	K	$y = a \exp(-b/x^c)$	a 为 y 的最终值即上渐近值, c 为形状参数, $a, b, c > 0$
Mitscherlich	M	$y = a(1 - \exp(-bx))$	a 为 y 的最终值即上渐近值, b 为形状参数, $a, b > 0$
Schumacher	S	$y = a \exp(-b/x)$	a 为 y 的最终值即上渐近值, b 为形状参数, $a, b > 0$

注:引自《美国森林植被模拟系统(FVS)在北京地区人工林上的应用研究》^[11],以下表格涉及该 6 个理论生长方程均采用方程的简称。

2.2.3 材积计算模型 单木材积在国内多采用二元材积表进行预测。材积计算模型一般为树高和胸径的函数。选择 FVS-CR^[7] 地区变量中的用户自定义材积计算模型方程的基本形式:

$$V = a_0 + a_1 * DBH + a_2 * DBH * HT + a_3 * DBH^2 * HT + a_4 * DBH^{a_5} * HT^{a_6} \quad (2)$$

式中, V 为材积, DBH 为胸径, HT 为树高, $a_0 - a_6$ 为模型参数,下同。

根据材积计算模型中的变量建立其数据库,随机选取 40 株解析木的材积连年生长量、树高连年生长量和胸径连年生长量作为其建模数据,另外 19 株解析木有关材积计算模型的数据作为检验数据。利用材积计算模型数据库中的数据,通过回归分析中的非线性回归法,拟合材积计算模型参数。

2.2.4 评价模型的指标 分析评价模型建立的好坏,选择相关系数(R^2)、调整决定系数或剩余标准差(MSE)3 个指标。

$$\text{相关系数: } R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}; \text{ 调整决定系数: } R_{adj}^2 = 1 - \frac{MSE}{MST}; \text{ 剩余标准差: } MSE = \frac{SSE}{n-2}$$

其中, SSR 为回归平方和, SST 为总离差平方和, SSE 为残差平方和, MST 为总的均方差, MSE 为剩余标准差,下同。

2.2.5 模型精度检验方法 利用检验数据,通过计算 ME (平均误差)、 E (平均相对误差)、 MAE (绝对平均误差)、 $MA\%E$ (平均绝对相对误差)、 SSE (残差平方和)、 P (预估精度)6 项指标和 F 检验对模型进行独立性检验。

设模型预测值为 y_i , 实际值为 x_i ; $\bar{x} = \sum x_i / n$; $\bar{y} = \sum y_i / n$; n 为检验样本的株数。

$$\text{平均误差: } ME = \frac{\sum |x_i - y_i|}{n}; \text{ 平均相对误差: } E = \frac{1}{n} \sum \left(\frac{|x_i - y_i|}{x_i} \right) \times 100\%$$

$$\text{绝对平均误差: } MAE = \sum \left| \frac{x_i - y_i}{n} \right|; \text{ 平均绝对}$$

$$\text{相对误差: } MA\%E = \frac{1}{n} \sum \left| \frac{x_i - y_i}{x_i} \right| \times 100\%$$

$$\text{残差平方和: } SSE = \sum (x_i - y_i)^2$$

预估精度计算:采用最小二乘法估计实际值 x_i 与模型预估值 y_i 建立的一元线性回归方程的参数,通过计算回归标准差,回归标准误,得出模型的预估精度。并进行 F 检验,当检验结果无显著差异时,说明所优化的模型适用该地区。

3 结果与分析

3.1 直径生长量模型拟合结果

在 FVS 中,直径生长量模型不能直接预测直径的实际生长量,而是通过预测去皮平方直径(dds)的周期性(10 a)变化来获得。

$$dds = (dib + DG)^2 - dib^2 \quad (3)$$

其中: DG =去皮直径周期性生长量(10 a)

dib =生长期开始时的去皮直径= $(1/K) * DBH$ (K 是树木的树皮调整因子,即带皮胸径/去皮胸径)

方程(3)经过转化可得

$$DG = \sqrt{dds - dib^2} - dib \quad (4)$$

建模时考虑到树皮生长量,主要是通过预测 5 a 的去皮平方直径(dds)的变化来间接预测侧柏直径的实际生长量,利用树皮调整因子来优化侧柏每 5 a 的去皮直径周期性生长量[公式(5)]。

$$DG = (DBH - DBH_0) / K \quad (5)$$

式中, DG 为去皮直径周期性生长量(5a), DBH 为侧柏 5 年末的带皮胸径, DBH_0 为侧柏 5 年前的带皮胸径, K 为侧柏的树皮调整因子, 已计算得到, $K = 1.089$ 。从而, 优化侧柏的去皮平方平均直径。并且, 在此基础上, 增加了变量因子 $BAL/\ln(DBH+1)$,

扩大了树木相对大小受 DBH 变化的影响^[15]。

根据直径生长量模型数据库中已剔除异常值的数据, 采用多元线性回归中的逐步回归法, 对直径生长量模型(1)式进行拟合(表 2), 当模型变量数 > 8 时, 复相关系数 > 0.63 。影响去皮平方直径的因素从小到大为: 林木大小 $<$ 立地条件 $<$ 竞争因素。

表 2 直径生长量模型拟合结果

Table 2 Fitting results of diameter growth model

变量数	逐步回归引入变量	复相关系数 R	调整 R ²
1	$BAL/\ln(DBH+1)$	0.455	0.206
2	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE$	0.556	0.307
3	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI$	0.587	0.342
4	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2$	0.600	0.357
5	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL$	0.609	0.367
6	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2$	0.619	0.379
7	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2, SL^2$	0.622	0.382
8	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2, SL^2, SL$	0.631	0.393
9	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2, SL^2, SL, \ln(BA)$	0.634	0.397
10	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2, SL^2, SL, \ln(BA), \sin(\text{ASPECT}) * SLOPE$	0.639	0.401
11	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, DBH^2, EL, EL^2, SL^2, SL, \ln(BA), \sin(\text{ASPECT}) * SLOPE, \ln(DBH)$	0.641	0.403
10	$BAL/\ln(DBH+1), \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE, SI, EL, EL^2, SL^2, SL, \ln(BA), \sin(\text{ASPECT}) * SLOPE, \ln(DBH)$	0.640	0.403

在筛选变量时发现, 已选入的自变量 DBH^2 在第 12 次筛选时被剔除, 剔除的原因是经过 t 检验发现其对应的 $P > 0.05$, 本研究选择第 10 次筛选变量复相关系数为 0.640 时拟合的模型方程。此外, 自变量为 BAL 在筛选开始时就被剔除, 说明变量 BAL 对林木生长的作用可以由新增加的变量 $BAL/\ln(DBH+1)$ 所代替。

通过对各入选参数进行 t 检验发现, 其对应的置信度 P 值均小于常用的置信度 0.05, 说明检验结果是显著的, 且均通过 t 检验(表 3)可以看出, 林分断面积和变量 $BAL/\ln(DBH+1)$ 的回归系数都为负值, 说明随着林木间的竞争压力的增大, 直径生长量会减少, 该现象符合林木的实际生长规律, 优化后的单木直径生长量模型方程。

$$\ln(dds) = 1.550 + 0.696 * \cos(\text{ASPECT}) * SLOPE + 0.248 * \sin(\text{ASPECT}) * SLOPE - 3.429 * EL + 2.765 * EL^2 + 1.761 * SLOPE - 0.901 * SLOPE^2 + 0.768 * \ln(DBH) - 0.117 * \ln(BA) - 4.021 * BAL/\ln(DBH+1) + 0.039 * SI \quad (6)$$

残差和预测值分布(图 1、图 2)可以看出, 侧柏直径生长量模型的残差服从正态分布, 说明拟合效果很好。残差的散点分布均匀, 且没有发散现象, 说明该模型的预估效果良好(图 2)。

3.2 树高生长量模型拟合结果

程的参数主要受立地指数的影响, 后有学者王璞构建基于 FVS 的华北落叶松人工林树高生长量模型也证明了此点^[6]。因此, 根据统计的各优化立地指数下的数据, 采用非线性回归方法对表 1 中的 6 种理论生长方程进行拟合, 并采取上述方法对各方程进行了精度检验(表 4)。立地指数 $SI=4$ 和 $SI=8$ 时, Logistic 方程的相关系数最大, 说明其拟合度最高, 且其预测精度也最高; 立地指数 $SI=5, 6, 7$ 时, Richard 和 Weibull 方程的相关系数相同, 说明其拟合度都很高, 但 Richard 方程的预估精度略高于 Weibull 方程。总体趋势为 Richard、Weibull、Logistic、Korf 这 4 个方程的相关系数相差不大, 且预估精度均较高。

表 3 各参数 t 检验统计结果

Table 3 Statistics results by t -test of each parameter

变量名	回归系数	标准差	t 检验	P
常量	1.550	0.325	4.776	0.000
$\cos(\text{ASPECT}) * SLOPE$	0.696	0.081	8.557	0.000
$\sin(\text{ASPECT}) * SLOPE$	0.248	0.093	2.675	0.008
EL	-3.429	0.568	-6.039	0.000
EL^2	2.765	0.574	4.820	0.000
SLOPE	1.761	0.336	5.234	0.000
$SLOPE^2$	-0.901	0.160	-5.618	0.000
$\ln(DBH)$	0.768	0.124	6.197	0.000
$\ln(BA)$	-0.117	0.027	-4.404	0.000
$BAL/\ln(DBH+1)$	-4.021	1.007	-3.993	0.000
SI	0.039	0.015	2.637	0.009

由已建立的树高生长量模型得知, 理论生长方

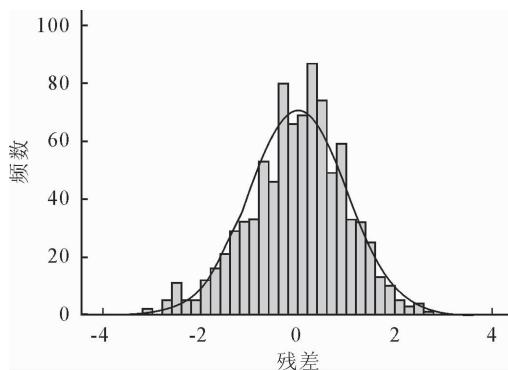


图 1 直径生长量模型标准化残差

Fig. 1 Histogram standardized residual of diameter growth model

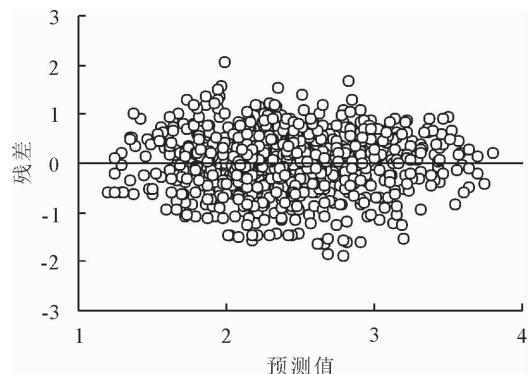


图 2 直径生长量模型残差分布

Fig. 2 Distribution of residual plot of diameter growth model

表 4 不同立地指数下 6 种理论生长方程参数估计及精度检验

Table 4 Parameter estimation and precision of six theoretic growth equations in different site indexes

立地指数	方程	参数			R^2	MSE	ME	E	MAE	MA% E
		a	b	c						
SI=4	R	68.949	0.001 0	1.054 0	0.994 5	0.018	0.009 6	0.028 5	0.107 3	0.066 6
	W	6.607	0.001 0	1.936 0	0.984 0	0.055	-0.069 2	-0.132 0	0.168 8	0.161 4
	L	6.448	2.466 0	0.055 0	0.994 9	0.017	-0.006 5	-0.027 5	0.099 6	0.003 8
	K	166 455.040	13.423 0	0.119 0	0.994 0	0.022	0.020 8	0.048 0	0.112 3	0.004 3
	M	406.791	0.000 1		0.994 0	0.019	-0.004 2	0.010 8	0.115 0	0.068 7
	S	9.449	44.648 0		0.964 0	0.115	0.104 2	0.167 0	0.261 9	0.218 2
SI=5	R	8.067	0.023 0	1.059 0	0.885 0	0.350	-0.003 4	-0.067 5	0.455 8	0.202 4
	W	8.075	0.020 0	1.035 0	0.885 0	0.350	-0.004 6	-0.070 2	0.456 2	0.203 3
	L	6.090	1.976 0	0.087 0	0.866 0	0.409	-0.020 8	-0.146 1	0.498 7	0.274 0
	K	6.497	0.347 0	28.674 0	0.886 0	0.348	0.003 1	-0.045 1	0.456 6	0.200 2
	M	8.488	0.020 0		0.885 0	0.349	-0.008 8	-0.077 8	0.458 4	0.206 7
	S	7.763	19.038 0		0.861 0	0.421	0.072 5	0.075 5	0.509 5	0.257 3
SI=6	R	9.483	0.034 0	1.479 0	0.936 0	0.226	0.002 8	-0.037 0	0.395 4	0.182 7
	W	8.605	0.009 0	1.345 0	0.936 0	0.225	0.002 0	-0.043 2	0.396 5	0.184 6
	L	6.600	2.458 0	0.119 0	0.929 0	0.252	-0.017 3	-0.136 1	0.433 1	0.255 0
	K	47.818	8.149 0	0.372 0	0.935 0	0.229	0.008 0	-0.020 5	0.398 5	0.185 6
	M	27.311	0.006 0		0.930 0	0.245	-0.035 7	-0.125 6	0.414 9	0.228 3
	S	9.923	21.105 0		0.922 0	0.273	0.064 4	0.087 4	0.437 7	0.236 5
SI=7	R	14.343	0.015 0	0.950 0	0.855 1	0.756	-0.005 2	-0.214 0	0.606 7	0.361 3
	W	14.821	0.017 0	0.954 0	0.855 1	0.756	-0.007 4	-0.215 5	0.606 0	0.361 6
	L	8.446	1.953 0	0.085 0	0.838 0	0.845	-0.022 6	-0.346 3	0.629 8	0.500 9
	K	233.195	7.345 0	0.019 6	0.856 0	0.753	-0.000 7	-0.191 5	0.599 3	0.341 1
	M	13.027	0.018 0		0.854 9	0.747	0.000 7	-0.200 5	0.605 9	0.352 3
	S	10.131	17.534 0		0.816 0	0.946	0.098 5	0.006 5	0.679 0	0.328 3
SI=8	R	17.419	0.026 0	1.831 0	0.983 0	0.115	0.017 3	0.046 8	0.265 0	0.118 5
	W	12.140	0.002 0	1.683 0	0.984 0	0.112	0.019 6	0.050 6	0.260 4	0.118 1
	L	8.661	3.106 0	0.130 0	0.985 0	0.106	-0.012 3	-0.070 4	0.243 1	0.132 6
	K	1 006	11.537 0	0.236 0	0.982 0	0.122	0.013 5	0.045 8	0.272 7	0.123 3
	M	2 191.075	8.56×10^{-5}		0.954 0	0.307	-0.176 5	-0.233 0	0.475 8	0.277 8
	S	16.528	30.857 0		0.972 0	0.187	0.103 5	0.180 5	0.335 8	0.236 3

利用 $y = \alpha_1 * x^{\alpha_2}$ 拟合 6 种理论生长方程中渐进值 a 、形状参数 b 或 c 与立地指数的关系, 以方程的 R^2 (相关系数) 和 MSE (剩余标准差) 作为评价各方程精度的标准拟合(表 5)。立地指数与各方程的渐进值 a 呈显著关系, 其中, Richard、Logistic、Korf 方

程的相关系数 > 0.9 , Logistic 方程的剩余标准差最小。立地指数与各方程的形状参数显著性最高的是 Logistic 方程, 且它的剩余标准差最小, 而 Mitscherlich 方程的形状参数与立地指数不呈幂函数关系, 由此忽略。综合而言, 选择用 Logistic 理论生长方程

作为树高生长量模型的基本形式。在原 Logistic 理论生长方程的基础上,将立地指数与其渐进值 a 和形状参数 c 的幂函数关系替换其参数值,让影响其参数的立地指数作为方程的自变量,更准确的预测树高生长。

通过非线性回归方法估计参数 b 值,得到 $b=2.081$,其相关系数 R^2 为 0.836,说明其拟合效果很

好。因此,优化得到侧柏的树高生长量模型方程。

$$H = \frac{1.5672 * SI^{0.8334}}{1 + \exp(2.081 - 0.0152 * SI^{1.016} * AGE)} \quad (7)$$

式中, H 为树高, SI 为立地指数, AGE 为林分年龄。

树高生长量模型的残差直方图近似正态分布,残差值大多数均匀分布于两侧(图 3 和图 4),说明该模型具有良好的拟合效果和预估效果。

表 5 6 种理论生长方程参数与立地指数的关系

Table 5 Relationship between parameters of six theoretic growth equations and site indexes

方程	a				b 或 c			
	a_1	a_2	相关系数(R^2)	MSE	a_3	a_4	相关系数(R^2)	MSE
R	0.4755	1.7278	0.9603	0.008	$2 * 10^{-8}$	9.2833	0.6263	5.140
W	1.2584	1.1465	0.6509	0.043	2.2598	-0.2963	0.0713	0.114
L	1.5672	0.8334	0.9161	0.004	0.0152	1.0160	0.6739	0.050
K	$8 * 10^{-5}$	7.7005	0.9333	0.260	0.1785	0.2347	0.0092	0.595
M	$7 * 10^{-7}$	9.7599	0.5972	3.949	—	—	—	—
S	0.7444	1.4334	0.8402	0.024	71.8240	-0.5995	0.1769	0.167

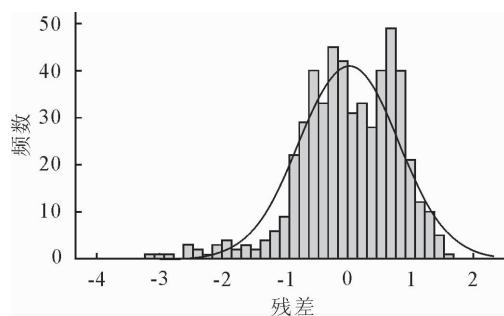


图 3 树高生长量模型标准化残差

Fig. 3 Histogram standardized residual of height growth model

说明该模型的拟合效果和预估效果良好。

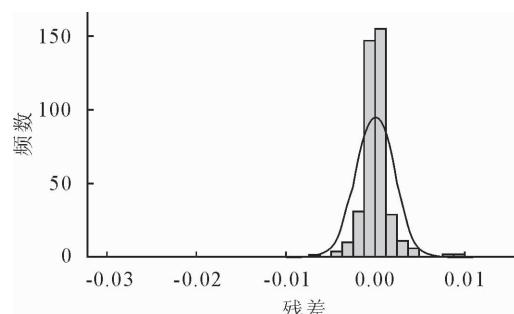


图 5 材积计算模型标准化残差

Fig. 5 Histogram standardized residual of volume computation model

3.4 模型精度检验

根据检验数据(19株解析木数据),对各模型的实际值与预测值检验(表 7)可以看出,树高生长量模型和材积计算模型的预估精度均达到了 90% 以上,直径生长量模型的预估精度为 74.0%,比树高生长量模型和材积计算模型的预估精度略低。且 3 种模型均通过了 F 检验,对应的置信水平 0.000 均比常用的置信水平 $<0.05, 0.001$,说明该 3 种模型的拟合效果很好,适应性强。

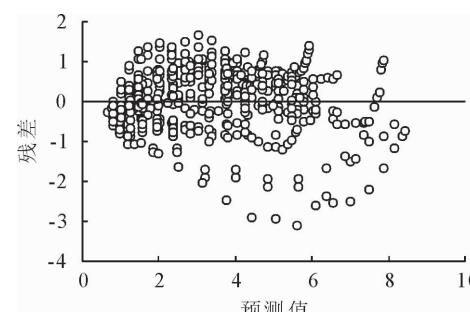


图 4 树高生长量模型残差分布

Fig. 4 Distribution of residual plot of height growth model

3.3 材积计算模型拟合结果

根据材积计算模型数据库,采用非线性回归方法对材积计算模型(2)式进行了拟合,经过 33 次 Levenberg-Marquart 方法迭代拟合(表 6),相关系数达到 0.875,说明该模型拟合效果很好。

优化后的材积计算模型方程如下:

$$V = 3.285 + 0.001 * DBH + 5.52 * 10^{-6} * DBH * HT + 2.61 * 10^{-5} DBH^2 * HT - 3.286 * HT^{6.53 * 10^{-5}} \quad (8)$$

材积计算模型残差图近似正态分布(图 5),残差的散点除个别以外,基本均匀分布于两侧(图 6),

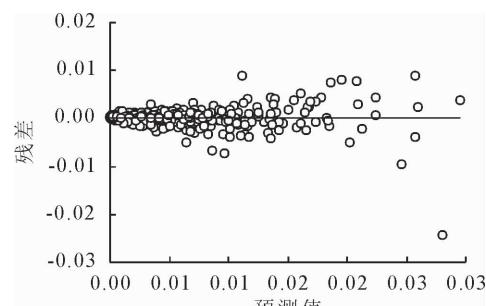


图 6 材积计算模型残差分布

Fig. 6 Distribution of residual plot of volume computation model

表 6 材积计算模型拟合结果

Table 6 Fitting results of volume computation model

参数估计							相关系数 (R ²)	剩余标准差 (MSE)
a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆		
3.285	0.001	5.52 * 10 ⁻⁶	2.61 * 10 ⁻⁵	-3.286	0.000	6.53 * 10 ⁻⁵	0.875	0.000

表 7 各模型检验统计

Table 7 Statistics of the test results for each model

模型	n	ME	E	MAE	MA%E	P/%	F 检验	置信水平	显著性
直径生长量模型	83	-0.516 9	-0.005 2	0.712 5	0.491 7	74.0	767.474	0.000	* *
树高生长量模型	111	-0.159 7	-0.006 9	0.744 3	0.111 4	99.5	577.032	0.000	* *
材积计算模型	19	-0.002 0	-0.190 4	0.003 4	0.216 9	91.0	656.831	0.000	* *

4 结论与讨论

采用多元线性回归方法(逐步回归法)、非线性回归方法拟合直径、树高生长量模型和材积计算模型的参数,得到优化的侧柏直径生长量模型、树高生长量模型和材积计算模型。侧柏直径模型的残差服从正态分布,树高、材积模型的残差直方图服从近似正态分布,且残差的散点基本均匀分布于两侧,说明各模型具有良好的拟合效果和预估效果。3个模型的预估精度均较高,拟合效果很好,适应性强。

参考文献:

- [1] 王少杰,邓华锋,吕常笑,等.基于单木水平和林分水平的油松兼容性生长模型[J].西北林学院学报,2016,31(6):243-249.
- [2] DIXON,G E. Essential FVS:a user's guide to the forest vegetation simulator [R]. Internal Rep. Fort Collins, CO: Forest Management Service Center. 2002,193.
- [3] 刘平,马履一,贾黎明,等.美国的森林植被模型[J].世界林业研究,2006,19(5):63-66.
- [4] STAGE A R,Prognosis model for stand development[R]. Research Paper INT-137. Ogden, UT: USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 1973. 31.
- [5] 任瑞娟,亢新刚,杨华.天然林单木生长模型研究进展[J].西北林学院学报,2008,23(6):203-206.
- [6] 王璞,马履一,段劫,等.基于FVS的华北落叶松人工林树高生长模型研究[J].西北林学院学报,2013,28(2):197-190.
- [7] DIXON, G E. Central rockies variant of the forest vegetation simulator[R]. Internal Rep. Fort Collins, CO: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Management Service Center. 2001,62.
- [8] 马丰丰,贾黎明,段劫,等.北京山区侧柏人工林立地指数表的编制[J].北京林业大学学报,2008,30(6):78-82.
- [9] MA F,JIA L M,DUAN J,et al. Compilation of the site index table for plantations of *Platycladus orientalis* in Beijing mountain area[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30 (6):78-82. (in Chinese)
- [10] 马丰丰,贾黎明.北京地区侧柏、油松带皮胸径与去皮胸径的关系[J].浙江林学院学报,2009,26(1):13-16.
- [11] MA F F,JIA L M. Outside and inside bark diameter at breast height for *Platycladus orientalis* and *Pinus tabulaeformis* in the Beijing area [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2009,26(1):13-16. (in Chinese)
- [12] 刘平.美国森林植被模拟系统(FVS)在北京地区人工林上的应用研究[D].北京:北京林业大学. 2007.
- [13] 公宁宁.基于FVS的北京地区油松人工林树冠及林下植被的研究[D].北京:北京林业大学. 2010.
- [14] 张西,贾黎明,张瑜,等.基于FVS的秦岭地区栓皮栎天然次生林单木模型构建[J].北京林业大学学报,2015,37(5):19-29.
- [15] ZHANG X,JIA L M,ZHANG Y,et al. Individual growth simulation for natural secondary forest of *Quercus varibilis* in Qinling area base on FVS[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2015,37(5):19-29. (in Chinese)
- [16] 郭孝玉,孙玉军,马炜,等.适于FVS的长白落叶松树皮因子[J].东北林业大学学报,2011,39(10):28-31.
- [17] GUO X Y,SUN Y J,MA W,et al. Bark factor of *Larix olgensis* suitable for forest vegetation simulator[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011,39(10):28-31. (in Chinese)
- [18] WYKOFF W R. Supplement to the user's guide for the stand prognosis model-version 5.0[R]. Internal Rep. Station: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, General Technical Report INT-208. 1986. 40.