

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.04.002

四川桉木天然林和人工林的单木生长模型研究

伍小敏¹, 徐春¹, 杨汉波^{2*}, 陈炙², 郭洪英², 黄振², 王泽亮²

(1. 内江市东兴区农林局, 四川 内江 641100; 2. 四川省林业科学研究院, 四川 成都 610081)

摘要:预测和研究四川桉木天然林和人工林的生长与发展规律,以更好地经营四川桉木天然林。以四川桉木天然林和人工林为研究对象,基于实测的树高-胸径数据,通过比较分析9个树高曲线模型,建立四川桉木的单木树高曲线模型。结果显示,最终确定的四川桉木最优树高曲线模型的决定系数 R^2 为0.794,调整决定系数为0.792,均方根误差 $RMSE$ 为0.886,相对均方根误差 E_{RMSE} 为0.045,平均误差 ME 为0.000,平均绝对误差 MAE 为2.641。最优的四川桉木单木树高曲线模型自变量为胸径,单木生长模型为 $H=1.3+27.176 \times (D/(1+D))^{11.856}$ 。建立的单木树高曲线模型有较好的生物学意义,可为四川省四川桉木天然林和人工林的生长预测提供依据。

关键词:四川桉木;树高;胸径;生长模型

中图分类号:S711

文献标识码:A

文章编号:1003-5508(2018)04-0008-04

A Study of Individual-tree Growth Models in Natural and Artificial Forests of *Alnus cremastogyne*

WU Xiao-min¹ XU Chun¹ YANG Han-bo^{2*} CHEN Zhi² GUO Hong-ying²

HUANG Zhen² WANG Ze-liang²

(1. Agriculture Forestry Bureau of Dongxing District, Neijiang 641100, China;

2. Sichuan Academy of Forestry, Chengdu 610081, China)

Abstract: The rules of growth and development was calculated for natural and artificial forests of *Alnus cremastogyne*, which would lead to better management of forests. Based on the measured data of height and DBH, individual tree height-diameter models were developed for *A. cremastogyne* by analyzing the existing nine height-diameter models. The results showed that the values of R^2 , R^2_{adj} , $RMSE$, $ERMSE$, ME , and MAE of the optimal height-diameter model were 0.79403, 0.79217, 0.886, 0.045, 0.00021, and 2.64125, respectively. The optimal growth model argument for individual trees of *A. cremastogyne* was DBH, the growth model was $H=1.3+27.176 \times (D/(1+D))^{11.856}$. The height-diameter model was biologically reliable for predicting the growth of *A. cremastogyne* in Sichuan province.

Key words: *Alnus cremastogyne* Burk., Height, DBH, Growth model

树高和胸径是森林调查中最重要两个因子,常用来计算材积、立地指数及其他与森林生长、演替、碳汇相关的重要变量^[1]。相对于测量树高,胸径可以快速、方便、准确地测量^[2]。生长模型一直

是森林经营领域地研究热点,生长模型的种类很多,其中单木生长模型是预测林木生长,反映林分生长变化规律的基础^[3]。实践中,不论是临时样地还是固定样地,树高的测定仅在一部分测定胸径的样木

收稿日期:2018-05-09

基金项目:四川省科技支撑计划“突破性林木育种材料与与方法创新”(2016NYZ0035),桉木优良种源(家系)早期选择研究(2018CZZX14)。

作者简介:伍小敏(1970-),女,四川内江人,大专,主要从事林业科技推广工作。

*通讯作者:杨汉波(1988-),男,四川成都人,助理研究员,博士,主要从事林木遗传育种研究。

中进行,然后用树高-胸径关系模型来估计树高,因此构建简单而准确的树高-胸径模型是十分必要的^[4]。树高曲线是指胸径(*DBH*)与树高(*H*)关系的曲线,是建立生长与收获模型的基础^[5,6]。多年来,国内外学者在单木生长模型方面进行了大量的研究,取得了一系列的成果^[7-10]。李海奎等^[4]采用树高分级方法,建立了栎类、杉木、马尾松、杨树、落叶松和油松 6 个全国主要树种的树高-胸径曲线模型。童洁等^[11]基于加格达奇落叶松、樟子松、红松和落叶松混合林的树高、胸径实测数据,建立了加格达奇 3 种森林类型树高-胸径的曲线拟合模型。代忠迪等^[12]以大兴安岭 3 个不同生态区域的兴安落叶松实测树高-胸径数据,通过对比 12 个树高曲线模型,选出了适合大兴安岭不同生态区域树高曲线的预测模型。

四川桫木(*Alnus cremastogyne* Burk.)是四川主要的乡土树种,是营建短周期工业原料林的重要树种之一,同时也是理想的生态防护和混交造林树种。

目前对四川桫木树高曲线的研究,尤其是对四川省内不同分布区树高曲线的详细研究还未见报道。本文以四川省 10 个地区的四川桫木天然林和人工林为研究对象,基于实测的树高-胸径数据,对 9 个树高曲线模型进行了拟合。基于拟合和检验统计量及模型的散点图,选出适合四川桫木树高曲线的预测模型,以期对四川桫木的树高生长预测提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

于 2012 年在四川省 10 个地区实测 475 株四川桫木的树高(*H*)和胸径(*DBH*)数据。借助围尺、测高仪测量每株林木的胸径和树高,胸径测量的精度为 0.1 cm,树高测量的精度为 0.1 m。将每个地区的数据随机分成 80% 和 20% 的比例分别用于建模和模型检验。本研究建模和检验数据的主要统计量见表 1。

表 1 四川桫木树高-胸径模型建模及检验数据的统计量

数据 Data	样本数 Number	胸径 (cm) <i>DBH</i>			树高 (m) <i>H</i>		
		平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max
建模数据 Fitting data	475	33.28	14.00	116.00	19.86	7.00	29.00
检验数据 Validation data	95	34.97	14.90	114.00	19.61	10.00	29.00

1.2 方法

1.2.1 备选模型

根据前人的研究经验和研究地区数据散点图(图 1)的变化趋势,选取拟合精度较高的 9 个树高曲线模型(表 2)。

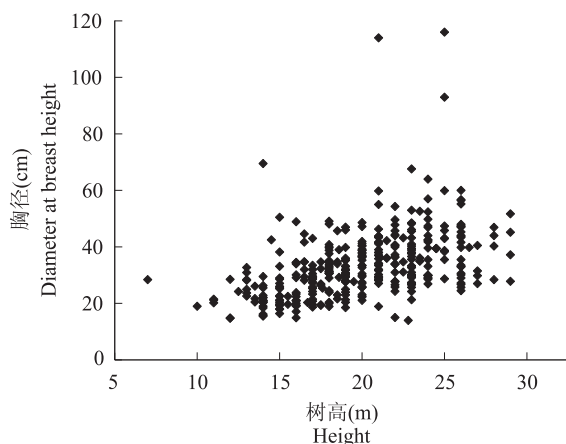


图 1 四川桫木树高-胸径散点图

Fig. 1 Scattering plots of height-diameter for *Alnus cremastogyne*

表 2 9 种树高曲线方程

模型序号 Model NO.	普通树高曲线方程 Local height-diameter function	参考文献 Reference
1	$H = a_1 + a_2 + a_3 \times D^2$	[7,13]
2	$H = a_1 + a_2 \times \ln D$	[7,14]
3	$H = 1/(a_1 + a_2 \times D^{-1})$	[15]
4	$H = 1.3 + a_1 \times D^{a_2}$	[16-17]
5	$H = 1.3 + a_1 \times D/(a_2 + D)$	[18]
6	$H = 1.3 + 10^{a_1} \times D^{a_2}$	[19,20]
7	$H = 1.3 + a_1 \times D/(D+1) + a_2 \times D$	[8,21]
8	$H = 1.3 + a_1 \times (D/(1+D))^{a_2}$	[7,22]
9	$H = 1.3 + a_1 + a_2/(D+a_3)$	[23]

1.2.2 模型评价和检验指标

模型评价主要采用决定系数(R^2)、均方根误差($RMSE$)、残差分布及参数的生物学意义等。首先利用 80% 的数据建模,用其余 20% 的数据检验;再利用独立检验样本数据,通过计算平均误差(ME)、平均绝对误差(MAE)、 $RMSE$ 、相对均方根误差(E_{RMSE})对所建各模型进行独立性检验;最后综合考虑以上因素,选择最优树高曲线模型。

(1) 残差(R): $R = y_i - \hat{y}_i$;

(2) 平均误差(ME): $ME = \sum_{i=1}^n (\frac{y_i - \hat{y}_i}{n})$;

(3) 平均绝对误差(MAE): $ME = \sum_{i=1}^n | \frac{y_i - \hat{y}_i}{n} |$;

(4) 均方根误差($RMSE$): $RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}}$;

(5) 相对均方根误差(E_{RMSE}): $E_{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 / (n - p)}{\bar{y}}}$;

(6) 决定系数(R^2): $R^2 = 1 - \frac{[\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2]}{[\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2]}$;

(7) 调整决定系数(R_{adj}^2): $R_{adj}^2 = 1 - \frac{n - 1}{n - p - 1} (1 - R^2)$ 。

式中: y_i 为实测值, \hat{y}_i 为模型预估值, \bar{y} 为平均值, n 为检验样木的株数, p 为模型自变量个数。

2 结果与分析

2.1 四川桉木树高曲线模型的筛选

9种树高曲线模型的误差分析结果见表3。从表3可以看出,除模型1外,其余8个模型均具有较高的精度,决定系数(R^2)和调整决定系数(R_{adj}^2)均在0.7以上,均方根误差($RMSE$)介于0.886 m ~ 0.927 m之间,相对均方根误差(E_{RMSE})介于0.045 ~ 0.047之间,平均误差(ME)介于-0.003 m ~ 0.026 m之间,平均绝对误差(MAE)介于2.641 m ~ 2.792 m之间。模型1精度最低, R^2 为0.629, $RMSE$ 为0.984, E_{RMSE} 为0.050。精度最高的模型为方程8, R^2 为0.794, $RMSE$ 为0.886, E_{RMSE} 为0.045。

2.2 模型检验

根据模型精度较高且误差最小的原则,本研究以模型8作为四川桉木的最优树高曲线模型。使用模型8拟合四川桉木树高时,参数 $a_1 = 27.176, a_2 = 11.856$,预测值的残差分布见图2。由图2可以看出,残差无明显的异质性,表明该模型有很好的模拟效果。相关分析表明预测值与实测值具有较高的相关性,也表明该模型具有很好的模拟效果(图3)。

表3 9种树高曲线模型拟合四川桉木树高时的误差分析

Tab.3 Error analysis of 9 height-diameter models to simulate the height of *A. cremastogyne*

模型序号 Models No.	决定系数 R^2	调整决定系数 R_{adj}^2	均方根误差(m) $RMSE$	相对均方根误差 E_{RMSE}	平均误差(m) ME	平均绝对误差(m) MAE
1	0.629	0.627	0.984	0.050	0.446	2.867
2	0.781	0.779	0.894	0.045	0.000	2.674
3	0.792	0.790	0.887	0.045	-0.003	2.651
4	0.767	0.765	0.903	0.045	0.010	2.709
5	0.791	0.789	0.888	0.045	-0.004	2.654
6	0.766	0.765	0.903	0.045	0.026	2.708
7	0.727	0.725	0.927	0.047	-0.004	2.792
8	0.794	0.792	0.886	0.045	0.000	2.641
9	0.794	0.789	0.886	0.045	0.000	2.642

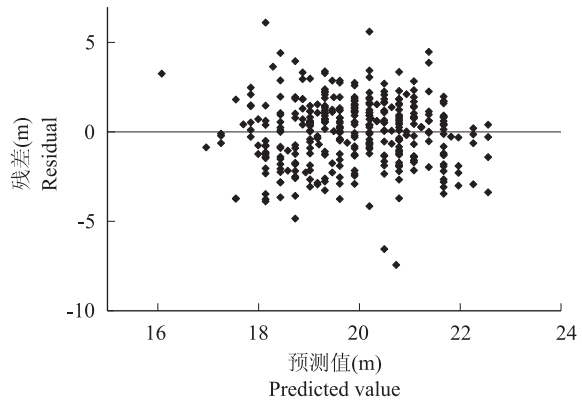


图2 四川桉木最优树高曲线模型预测值的残差分布
Fig 2 Residual distribution for predicted values of the optimal height-diameter model for *A. cremastogyne*

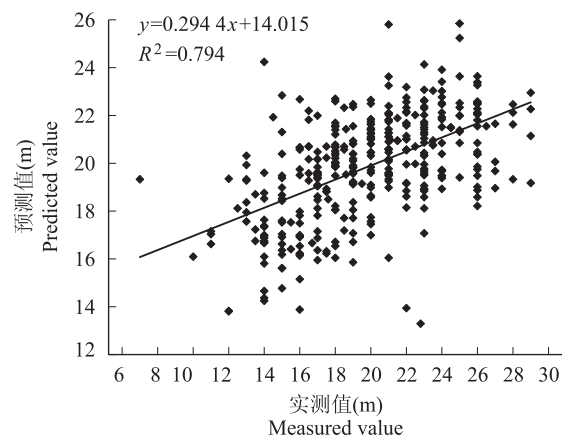


图3 四川桉木最优树高曲线实测值和预测值散点图
Fig 3 Measured and predicted values of the optimal height-diameter model for *A. cremastogyne*

使用20%的独立验证数据对最优模型进行验证,得到模型的各误差精度指标见表4。使用独立数据验证建立的四川桉木最优树高曲线,得到的 R^2 达

0.728, $RMSE$ 为 3.187, MAE 为 2.568, E_{RMSE} 为 0.163, ME 为 0.125, 与建模数据的分析结果基本一

致。这进一步说明了本研究所建立的最优树高曲线较为合理,可以在实践中应用。

表 4 用独立数据验证四川桉木最优树高曲线模型的误差分析

树种 Tree species	决定系数 R^2	调整决定系数 R_{adj}^2	均方根误差(m) $RMSE$	相对均方根误差 E_{RMSE}	平均误差(m) ME	平均绝对误差(m) MAE
四川桉木 <i>A. cremastogoyne</i>	0.728	0.720	3.187	0.163	0.125	2.568

3 结论与讨论

理论方程能在一定程度上描述生物的生长规律^[3]。目前,林业工作者认为预测和实践推理是研究森林生态系统动态变化的最大挑战^[24-26]。构建森林生长预估模型始终是森林工作者的首要任务^[15]。本研究以四川桉木为研究对象,基于四川省 10 个地区四川桉木天然和人工林资源调查数据,建立了四川桉木树高曲线模型。优势木平均高则代表林分的立地状况,生长在好的立地条件下的树木,其树高也往往更高,这反映了立地条件对单个树木树高的影响^[27]。虽然最优模型的自变量并未包含立地因子,但优势木平均高可以从一定程度上间接反映立地因子对树高的影响。本文所选的 9 个树高曲线模型中有 8 个模型都能较好的描述四川桉木的树高曲线(R^2 都达到 0.72 以上)。基于决定系数 R^2 较大,均方误差($RMSE$)和误差的绝对值较小的原则选择最优模型,确定模型 8: $H = 1.3 + 27.176 \times (D/(1 + D))^{11.856}$ 为四川桉木最优树高曲线模型。本研究建立的单木标准树高曲线模型可为四川桉木的生长预测提供依据。但是该模型目前仅限于研究地区使用,如果延伸到其他地区使用,则需要对模型进行进一步的优化、检验和验证。

马武等^[2]指出竞争对蒙古栎单木生长具有一定的影响。尽管四川桉木天然林和人工林中还包含其他树种,但是由于其他树种所占的比例非常低,所以本研究并未考虑其他树种的竞争对四川桉木树高的影响。另外,本研究采用的四川桉木天然林和人工林生长观测数据具有重复性和相关性等特点,下一步可考虑采用混合效应模型法对该模型进行更新,以提高模型的估算效果。

参考文献:

[1] Dorado FC, Dieguez AU, Anta MB, et al. A generalized height-di-

ameter model including random components for radiate pine plantations in northwestern Spain [J]. *Forest Ecology and management*, 2006, 229:202 ~ 213.

- [2] 马武,雷相东,徐光,等. 蒙古栎天然林单木生长模型的研究—II. 树高-胸径模型[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43 (3): 83 ~ 90.
- [3] 董晨,吴保国,张瀚. 基于冠幅的杉木人工林胸径和树高参数化预估模型[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38 (3): 55 ~ 63.
- [4] 李海奎,法蕾. 基于分级的全国主要树种树高-胸径曲线模型[J]. *林业科学*, 2011, 47 (10): 83 ~ 90.
- [5] 胥辉,全宏波,王斌. 思茅松标准树高曲线的研究[J]. *西南林学院学报*, 2000, 20 (2): 74 ~ 77.
- [6] Calama R, Montero G. Interregional nonlinear height-diameter model with random coefficients for stone pine in Spain [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, 34: 150 ~ 163.
- [7] Curtis RO. Height-diameter and height-diameter-age equations for second-growth Douglas-fir [J]. *Forest Science*, 1967, 13: 365 ~ 375.
- [8] Larson BC. Development and growth of even-aged stands of Douglas-fir and grand fir [J]. *Can J For Res*, 1986, 16: 367 ~ 372.
- [9] Robinson AP, Wykoff WR. Imputing missing height measures using a mixed-effects modeling strategy [J]. *Can J For Res*, 2004, 34 (12): 2492 ~ 2500.
- [10] 赵俊卉,亢新刚,刘燕. 长白山主要针叶树种最优树高曲线研究[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 32 (4): 13 ~ 18.
- [11] 童洁,石玉立. 加格达奇 3 种森林类型树高-胸径的曲线拟合[J]. *东北林业大学学报*, 2017, 45 (2): 6 ~ 11.
- [12] 代忠迪,姜立春. 大兴安岭不同生态区域兴安落叶松树高曲线的研究[J]. *植物研究*, 2015, 35 (4): 583 ~ 589.
- [13] Henriksen HA. Height-diameter curves with logarithmic diameter [J]. *Dansk Skovforen Tidsskr*, 1950, 35: 192 ~ 202.
- [14] Arabatzis AA, Burkhart HE. An evaluation of sampling methods and model forms for estimating height-diameter relationships in loblolly pine plantations [J]. *For Sci*, 1992, 38: 192 ~ 198.
- [15] Vanclay JK. Growth models for tropical forests: A synthesis of models and methods [J]. *For Sci*, 1995, 41 (1): 7 ~ 42.
- [16] Stoffels A, van Soest J. The main problems in sample plots: 3. Height regression [J]. *Ned Bosbouw tijdschr*, 1953, 25: 190 ~ 199.
- [17] Stage AR. Prediction of height increment for models of forest growth [R]. *USDA For Serv Res Rap INT-164*, 1975.

藓的方式有利于金钗石斛在自然条件下的正常生长,相比单独的线卡固定有效减少树体伤害,比常见的遮阳网包裹固定方式更为环保有效,减少了对树木正常生长的影响。

金钗石斛采取林下种植时,适当的遮阴有利于金钗石斛的生长,根据余家辉的研究,金钗石斛在中等遮阴(55%~65%)长势最好^[12]。本实验中种植在郁闭度0.8林下和遮光度40%的温室内的金钗石斛依然可以正常生长,但过高的林下郁闭度会造成成活率大幅下降^[13],建议在选择林下种植时,林下郁闭度应在0.4~0.8之间。

在温湿度方面,金钗石斛生长最适宜的温度为25℃左右^[14],2d~3d短时间内低于零度的气温及冰雪并不会对金钗石斛造成不良影响。林下及温室内栽培,湿度应保持在60%~80%为宜。

林下栽培的金钗石斛其多糖及石斛碱等有效成分都高于温室内栽培的金钗石斛,因此林下栽培的金钗石斛虽然生长慢,产量低,但品质却远高于温室内培养的植株。引入重庆种植的金钗石斛其石斛碱含量略低于浙江及贵州赤水所产金钗石斛,但总多糖含量却是贵州赤水金钗的两倍多,因此金钗石斛在重庆地区开展林下种植具有较好的前景。

参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典. 2010年版(一部)

[M]. 北京:中国医药科技出版社,2010:85~86.

- [2] 管志斌,李再林. 珍稀名贵中药一金钗石斛[J]. 中国野生植物资源,2002,21(4):36~37.
- [3] 黄民权,黄步汉,蔡体育,等. 铁皮石斛多糖的提取、分离和分析[J]. 中草药,1994,25(3):128.
- [4] 钱桂敏,章华泼. 金钗石斛化学成分及药理作用研究进展[J]. 中国中医药现代远程教育 2011.9(4):194~195.
- [5] 华茉莉,杨洋,沈志伟. 气相色谱法测定金钗石斛药材中石斛碱的含量[J]. 中药材,2006,29(4):338~339.
- [6] 黄小燕,乙引. 气相色谱法测定金钗石斛中石斛碱的含量[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2007,25(4):92~94.
- [7] 敖娇,鲍家科孙,夏玉吉. 金钗石斛中生物碱与多糖含量的测定[J]. 中成药 2017,39(8):1736~1738.
- [8] 孙锋,谢世友,李智强. 地形地貌多样型的重庆如何发展特色农业[J]. 重庆三峡学院学报,2011 27(132):120~122.
- [9] 翁玲 陈宇. 赤水丹霞气候分析[J]. 农业与技术 2012 32(3):94~95.
- [10] 周浩,杨宝钢,程炳岩. 重庆近46年气候变化特征分析[J]. 中国农业气象,2008,29(1):23~27.
- [11] 黄明奎,马璐. 重庆市地质灾害气候性诱发机理分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版) 2017,36(11)66~70.
- [12] 余家辉. 金钗石斛林下栽培移栽遮阴度试验报告[J]. 农技服务,2014,12(31):69.
- [13] 唐德英,李荣英,李学兰,等. 金钗石斛试管苗仿野生栽培技术研究[J]. 中国中药杂志,2008,33(10)1208~1210.
- [14] 陈仕江,张明,丑敏霞,等. 金钗石斛生长的最适光温研究[J]. 中国中药杂志,2002 27(7)509~527.

(上接第11页)

- [18] Wykoff WR, Crookston NL, Stage AR. User's guide to the stand prognosis model [R]. USDA For Ser Gen Tech Rep INT~133, 1982.
- [19] Burkhart HE, Strub MR. A model for simulation of planted loblolly pine stands [C]//Fries J. Growth models for tree and stand simulation. Stockholm, Sweden: Royal College of Forestry, 1974.
- [20] Burfor MA. Height-diameter relationships at age 15 in loblolly pine seed sources [J]. For Sci, 1986, 32:812~818.
- [21] Watts SB. Forestry handbook for British Columbia [M]. 4th ed. Vancouver, BC, Canada: Forestry Undergraduate Society, 1983.
- [22] Prodan M. Forest biometrics [M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 1968.

- [23] Tang SZ. Self-adjusted height-diameter curves and on entry volume model [J]. Forest Research, 1994, 7:512~518.
- [24] Carpenter SR. Ecological futures: building an ecology of the long now [J]. Ecology, 2002, 83(8):2069~2083.
- [25] Costanza R, d'Arge R, de Groot R, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Nature, 1997, 387:253~260.
- [26] Pielke RA Jr, Conant RT. Best practices in prediction for decision-making: lessons from the atmospheric and earth sciences [J]. Ecology, 2003, 84(6):1351~1358.
- [27] Sharma M, Zhang SY. Height-diameter models using stand characteristics for *Pinus banksiana* and *Picea mariana* [J]. Scand For Res, 2004, 19:442~451.