

DOI:10.13332/j.1000-1522.20190026

基于哑变量的闽楠天然次生林单木胸径和 树高生长模型研究

曹梦¹ 潘萍² 欧阳勋志¹ 臧颢¹ 吴自荣¹ 杨阳¹ 占常燕¹

(1. 江西农业大学林学院, 江西 南昌 330045; 2. 北京林业大学林学院, 北京 100083)

摘要:【目的】通过对闽楠天然次生林胸径和树高生长规律及生长模型的研究, 为林木生长预估及林分质量提升经营措施的制订提供参考。【方法】以江西省安福县闽楠天然次生林为研究对象, 通过标准地调查及树干解析等方法获取基础数据, 按林木竞争压力水平从小到大将林木分为类型 1、类型 2 和类型 3, 分析胸径和树高的生长规律; 选取 5 种具有生物学意义的生长方程, 根据模型拟合优度与评价指标选取最优基础生长模型, 在最优模型的基础上构建含竞争类型哑变量的生长模型。【结果】(1)利用树干解析数据分析显示, 30~50 年为胸径生长速生期, 连年生长量最大值达到 0.57 cm; 35~45 年为树高主要生长速生期, 连年生长量最大值为 0.37 m。(2)胸径最优基础模型为 Gompertz 方程, 模型 R^2 和预估精度分别为 0.756 和 94.28%, 构建的最优哑变量模型的 R^2 和预估精度分别为 0.873 和 95.71%; 树高最优基础模型为修正 Weibull 方程, 模型 R^2 和预估精度分别为 0.856 和 96.54%, 构建的最优哑变量模型的 R^2 和预估精度分别为 0.882 和 96.96%。(3)由构建的哑变量生长模型拟合的不同竞争类型下的胸径和树高生长曲线得知, 胸径和树高总生长量均表现为类型 1 > 类型 2 > 类型 3, 类型 1 胸径最大生长量是类型 3 的 1.6 倍。【结论】竞争压力对闽楠胸径、树高生长均产生影响, 较大的林木竞争压力不利于闽楠生长; 构建含有竞争类型哑变量模型的拟合优度及预估精度均优于基础模型, 有利于提高建模的精度和模型的适用性。

关键词: 闽楠; 天然次生林; 生长规律; 生长模型; 哑变量

中图分类号: S758.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522-(2019)05-0088-09

引文格式: 曹梦, 潘萍, 欧阳勋志, 等. 基于哑变量的闽楠天然次生林单木胸径和树高生长模型研究 [J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(5):88-96. Cao Meng, Pan Ping, Ouyang Xunzhi, et al. Growth model of DBH and tree height for individual tree of natural secondary *Phoebe bournei* forest based on dummy variable[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2019, 41(5): 88-96.

Growth model of DBH and tree height for individual tree of natural secondary *Phoebe bournei* forest based on dummy variable

Cao Meng¹ Pan Ping² Ouyang Xunzhi¹ Zang Hao¹ Wu Zirong¹ Yang Yang¹ Zhan Changyan¹

(1. College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, Jiangxi, China;

2. College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The growth regularity and growth model of *Phoebe bournei* natural secondary forest were studied, which will provide the reference basis for its growth prediction and quality improvement management measures. [Method] Taking natural secondary *Phoebe bournei* forest in Anfú County of Jiangxi Province, eastern China as research object, the basic data were obtained by means of typical sample investigation and stem analysis. According to the level of competitive pressure, the analysis woods were divided into tree types. From low to high, they were type 1, type 2 and type 3, respectively. Growth

收稿日期: 2019-01-15 修回日期: 2019-04-08

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201504301), 国家自然科学基金项目(31760207、31360181)。

第一作者: 曹梦。主要研究方向: 森林资源管理与监测。Email: 13687092584@163.com 地址: 330045 江西省南昌市昌北经济技术开发区志敏大道 1225 号。

责任作者: 欧阳勋志, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 森林资源管理与监测和森林生态。Email: oyxz_2003@hotmail.com 地址: 同上。

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

regulation of *Phoebe bournei* was studied in this paper. Five kinds of theoretical growth equations with biological significance were selected, and the optimal basic model was selected according to the model goodness of fit and evaluation indexes. On the basis of the optimal model, the growth model of dummy variables with competition types was constructed. [Result] (1) The stem analysis data showed that 30th–50th year was the main fast growing period of DBH, the maximum current annual growth was 0.57 cm. while that 35th–45th year was the fast growing period of tree height, the maximum current annual growth was 0.37 m. (2) The optimal basic model of DBH was Gompertz equation, the value of R^2 was 0.756 and the forecasting accuracy was 94.28%, and the value of R^2 and the forecasting accuracy of the optimal dummy variable model were 0.873, 95.71%, respectively. The optimal basic model of tree height was the modified Weibull equation, the value of R^2 was 0.856 and the forecasting accuracy was 96.54%, and the value of R^2 and the forecasting accuracy of the optimal dummy variable model was 0.882, 96.96%, respectively. (3) According to the growth curves of DBH and tree height under different competition types fitted by the constructed dummy variable growth model, the total increment of DBH and tree height showed that type 1 > type 2 > type 3, and the maximum DBH increment of type 1 was 1.6 times of type 3. [Conclusion] The competitive pressure has an effect on the growth of DBH and tree height of *Phoebe bournei*. The goodness of fit and estimation accuracy of dummy variable model with competition type were better than the basic model, which is beneficial to improve the accuracy and applicability of the model.

Key words: *Phoebe bournei*; natural secondary forest; growth regulation; growth model; dummy variable

了解林木生长规律是实现林分合理经营的理论基础。林木因子生长量能直观反映林木生长过程, 构建较高预估精度的生长模型有利于科学预估林木生长动态^[1], 对精准提升林分质量具有重要意义。不少学者对单木生长模型进行研究^[2-3], 但构建模型的方法较为传统, 未能充分考虑到数据的相关性, 且不能体现区域、样地和样木的差异, 导致模型的预估精度不高^[4]。林木生长不仅受邻近木大小及密度制约, 还受邻体距离制约^[5-6], 林木之间的竞争会影响个体发育, 导致同一树种的生长过程不尽相同, 而理论上, 为保证生长模型较高的预估精度和广泛的适用性, 不同竞争压力下的林分需要分开单独建模, 但这会增加工作量及成本, 而在模型中引入哑变量为模型的合并和建模提供了可能途径^[7]。

闽楠(*Phoebe bournei*)为樟科(Lauraceae)楠属(*Phoebe*)的常绿乔木树种, 由于人为砍伐及其自身生物学特性以及自然环境等综合影响, 致使闽楠天然资源接近枯竭, 目前仅零星分布在江西、福建等常绿阔叶林中。为科学保护和繁育珍贵楠木树种, 国内不少学者对闽楠开展研究, 如吴大荣等对福建罗卜岩自然保护区闽楠林中种群生态位^[8]及种群结构^[9]的研究, 游晓庆等^[10]对江西安福闽楠次生林林分空间格局的研究。在种间联结^[11]以及自然更新^[12]等诸多方面也有不少学者进行过研究。江香梅等^[13]和陈东阳^[14]则对闽楠人工林与天然林进行对比研究, 分析不同起源闽楠生长特性的不同, 然而其研究的林分年龄在35年左右, 林分年龄相对较小, 且以上研究尚未对闽楠生长模型方面进行深入分

析。因此, 本研究以江西安福县闽楠次生林为研究对象, 分析闽楠胸径、树高生长规律, 并建立含竞争类型哑变量的生长模型, 旨在阐明闽楠生长规律及预测林木生长, 为次生林的科学经营管理提供参考。

1 研究区概况

安福县(114°00' ~ 114°47'E, 27°04' ~ 27°36'N)位于江西省中部偏西。属亚热带季风湿润性气候区, 年均气温 17.7 °C, 7月平均气温 28.9 °C, 1月平均气温 5.9 °C, 年均降水量 1 553 mm, 平均降雨日 166 d, 平均日照时数 1 649 h, 年无霜期 279 d。地形以山地、丘陵为主, 土壤主要以红壤、山地黄壤为主, 成土母岩主要为花岗岩、砂岩、板岩。主要河流为泸水河。全县森林覆盖率达 70.5%, 被誉为“樟乡安福”, 森林资源丰富。主要乔木树种有杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、毛竹(*Phyllostachys heterocycla*)、马尾松(*Pinus massoniana*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、木荷(*Schima superba*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)等; 灌木草本主要以欏木(*Loropetalum chinense*)、庐山楼梯草(*Elatostema stewardii*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)等为主。

2 研究方法

2.1 标准地设置与调查

根据森林资源二类调查资料及在当地林业部门获取的信息, 在对闽楠天然次生林分布地进行踏查的基础上, 选择人为干扰程度轻且在分布地具有代

表性的地块设置标准地。标准地大小依据其分布地形等因素而定,面积为400 m²(20 m × 20 m)或600 m²(20 m × 30 m),共计16块标准地。利用GPS测定每块标准地的地理位置和海拔,记录郁闭度、坡度等环境因子,在标准地内进行每木检尺,记录乔木位置、树种及胸径、树高等林木因子。

2.2 树干解析

由于闽楠为我国二级珍稀渐危种,解析木的采伐受到严重限制,本研究过程中未按常规要求采伐大量解析木。根据每木检尺数据,在每块标准地选取1~2株与林分平均胸径及林分平均树高相近且生长正常的林木作为平均标准木,共选取17株进行树干解析。伐倒前,调查解析木(对象木)周围4株胸径大于4 cm的乔木,将其作为解析木的竞争木,并分别测量每株竞争木到相应对象木的距离。测量对象木胸径、树冠投影长度等;利用基部断面年轮确定树龄,测量树高和树冠长度。将树干按照中央断面区分求积法(采用1 m区分段)截取圆盘,同时在胸高处截取圆盘。将圆盘带回实验室测定圆盘生长轮宽度,按伐倒木区分求积法计算各龄阶材积和生长量,绘制生长曲线。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 简单竞争指数计算

由于竞争环境不同,林木生长状态也差异明显。为探讨每株对象木(解析木)受到的竞争影响,本研究采用林木种群竞争关系及单木生长模型常用的与距离有关的竞争指数Hegyi指数(CI),其表

达式^[15]:

$$CI = \sum_{j=1}^N (D_j/D_i) \frac{1}{d_{ij}}$$

式中: D_i 和 D_j 分别表示对象木*i*和竞争木*j*的胸径, d_{ij} 为对象木*i*和竞争木*j*的距离, N 为竞争木个数。

在用邻近木法确定对象木周围的竞争木时,取离对象木最近的4株树来计算。按上限排外法将对象木按Hegyi竞争指数(CI)划分3个等级,即类型1(CI < 1.0)、类型2(1.0 ≤ CI < 1.6)、类型3(CI ≥ 1.6)。17株对象木的基本特征见表1。根据分级标准,最终确定类型1、类型2、类型3的样本数量为5、7、5。

表1 对象木基本特征

变量 Variable	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	平均值 Average value	标准差 Standard deviation
年龄/a Age/year	67	35	52	10.5
胸径 DBH/cm	32.1	12.3	22.0	5.8
树高 Tree height/m	23.4	12.7	16.6	3.0
简单竞争指数 Simple competition index	2.95	0.42	1.36	0.66

2.3.2 单木生长模型的选取

根据参考文献[16],本研究选择5种生长方程进行模型参数拟合,模型表达式见表2。

表2 生长模型表达式

Tab. 2 Expression of growth model

模型 Model	Schumacher	Logistic	Richards	修正Weibull Modified Weibull	Gompertz
表达式 Expression	$y = ae^{-\frac{b}{t}}$	$y = a/(1 + be^{-ct})$	$y = a(1 - e^{-ct})^b$	$y = a(1 - e^{-bt^c})$	$y = ae^{-be^{-ct}}$

2.3.3 哑变量模型构建

哑变量,又称虚拟变量,它是处理分类变量或定性因子的一种常用方法。在各种数量化方法及回归分析和建模实践中经常涉及到哑变量模型方法^[17]。哑变量的定义为:对于定性数据*x*,用变量 $\delta(x, i)$ 表示。其公式为:

$$\delta(x, i) = \begin{cases} 1, & \text{当 } x \text{ 为第 } i \text{ 等级时} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

这种方法叫做定性因子(0, 1)化展开,变量 $\delta(x, i)$ 称为哑变量^[18]。

不同的竞争状态下,即使立地条件相近,同一树种生长速度也不尽相同。本文利用ForStat软件^[17]中的非线性回归模块建立含竞争类型哑变量的胸径

和树高生长模型,并从中选出最优模型形式。基于Gompertz方程的哑变量模型形式可表示为:

$$Y = (a_0 + a_1S_1 + a_2S_2)e^{-(b_0 + b_1S_1 + b_2S_2)}e^{-(c_0 + c_1S_1 + c_2S_2)t}$$

式中: S_1 、 S_2 为区分不同竞争压力等级的哑变量,当竞争类型为类型1时,取 $S_1 = 1$, $S_2 = 0$,当竞争类型为类型2时,取 $S_1 = 0$, $S_2 = 1$,当竞争类型为类型3时,取 $S_1 = 0$, $S_2 = 0$; a_0 、 a_1 、 a_2 、 b_0 、 b_1 、 b_2 、 c_0 、 c_1 、 c_2 为相应的特定参数或局部参数, t 为林木年龄。

从统计学上利用模型参数的*t*检验是否显著来解决包含哑变量的参数的选择及设置问题。在模型的每个参数上都引入哑变量进行模型拟合,如果在显著水平 $\alpha = 0.05$ 下不显著($P > 0.05$),则不在此参数上引入哑变量;调整后重新拟合,直到所有参数全部显

著为止。

2.3.4 模型评价

模型构建中, 需要有一套指标来进行检验和评价。本文利用常见的模型评价指标选出最优模型, 如确定系数(R^2)、预估精度(P_a)、均方根误差(RMSE)、赤池信息准则(AIC)、总相对误差(TRE)和平均绝对误差(MAE)。具体表达式如下:

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

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

$$AIC = 2k + n \ln(SSR/n), \quad SSR = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2$$

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

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

$$P_a = 1 - \frac{t_{0.05} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{\hat{y} \sqrt{n(n-k)}} \times 100\%$$

式中: y_i 为实测值, \hat{y}_i 为预估值, n 为样本数, \hat{y} 为平均预估值, k 为参数个数, $t_{0.05}$ 为置信水平 $\alpha = 0.05$ 时的 t 分布值。

R^2 、RMSE、AIC 反映的是回归模型的拟合优度, TRE、MAE、 P_a 值反映模型拟合精度。相关研究结果表明, 采用检验样本进行适用性检验的做法不可取^[19], 因此本文利用全部样本建立模型, 充分利用样本信息, 以减小模型的预估误差。

本文运用 Microsoft Excel 2010、SPSS20.0、For Stat2.2 进行数据处理分析及图表绘制。

3 结果与分析

3.1 单木生长规律分析

由图 1 可知: 第 30 ~ 50 年胸径连年生长量较大, 为生长速生期, 第 40 年时连年生长量达到最大值, 为 0.57 cm, 第 40 年后则呈逐年下降的趋势; 前

40 年平均生长量增速较快, 后期逐渐减缓。第 65 年时总生长量达到 22.88 cm。由图 2 可知: 树高连年生长量随年龄增长波动较大, 有多个快速生长期, 主要速生期为 30 ~ 45 年, 第 45 年时, 连年生长量达到最大值, 为 0.37 m; 树高平均生长量变化不大。

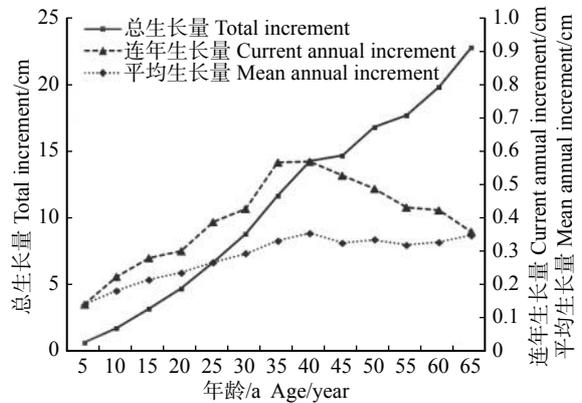


图 1 胸径生长量曲线

Fig. 1 Growth curve of DBH

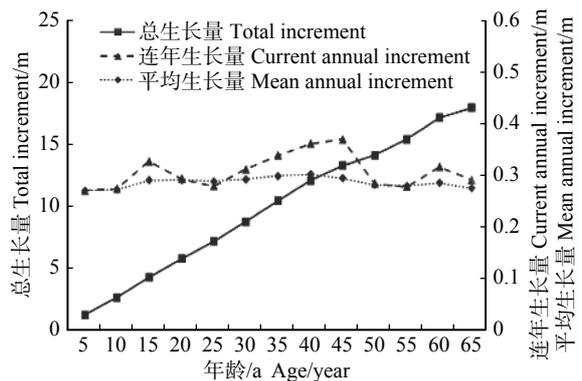


图 2 树高生长量曲线

Fig. 2 Growth curve of tree height

3.2 基础生长模型构建

3.2.1 胸径生长模型

对胸径生长模型进行参数求解。采用 R^2 、RMSE、AIC 对模型拟合优度进行评价, 以 TRE、MAE 和 P_a 值对模型预估精度进行评价。根据 R^2 、 P_a 值较大, RMSE、AIC、TRE、MAE 较小原则选取最优基础模型, 并利用 F 检验方法对最优基础模型进行检验。由表 3 拟合结果可以看出, Gompertz 模型对胸径总生长量拟合结果最优, 且 F 检验结果极显著 ($P < 0.01$), 因此选择 Gompertz 模型作为胸径生长的最优基础模型。

3.2.2 树高生长模型

同理, 对树高生长模型参数求解。由表 4 可以看出, 修正 Weibull 模型对树高总生长量拟合结果最优, 且 F 检验结果极显著 ($P < 0.01$), 因此选择修正 Weibull 模型作为树高生长的最优基础模型。

表3 胸径生长方程拟合参数值、拟合优度及评价指标

Tab. 3 Fitting parameter value, goodness of fit and evaluation index of growth models of DBH

模型 Model	参数值 Parameter value			拟合指标 Fitting index			评价指标 Evaluating index		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	RMSE	AIC	TRE	MAE	P_a
Schumacher	39.963	42.743		0.749	3.530	436.92	2.508	0.772	93.87
修正Weibull Modified Weibull	26.315	0.001 1	1.745	0.753	3.496	433.53	2.805	0.709	93.91
Logistic	21.143	22.986	0.094 2	0.752	3.504	434.30	-0.691	0.767	94.15
Gompertz	25.413	4.315	0.048 1	0.756	3.484	432.36	0.020 8	0.732	94.28
Richards	32.422	2.096	0.027 3	0.753	3.500	433.91	-2.451	0.745	94.22

表4 树高生长方程拟合参数值、拟合优度及评价指标

Tab. 4 Fitting parameter value, goodness of fit and evaluation index of growth models of tree height

模型 Model	参数值 Parameter value			拟合指标 Fitting index			评价指标 Evaluating index		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	R^2	RMSE	AIC	TRE	MAE	P_a
Schumacher	25.892	29.773		0.830	2.091	256.74	2.806	1.642	96.15
修正Weibull Modified Weibull	36.024	0.005 6	1.155	0.853	1.944	231.65	0.355	1.463	96.54
Logistic	18.319	10.858	0.077	0.849	1.968	235.92	-0.988	1.506	96.50
Gompertz	21.552	3.074	0.042	0.852	1.948	232.38	-1.223	1.496	96.52
Richards	40.153	1.177	0.011	0.853	1.945	231.88	-0.608	1.480	96.54

3.3 含竞争因子哑变量模型构建

3.3.1 含哑变量的胸径生长模型

以竞争类型为哑变量,加在最优基础模型 Gompertz 中的不同参数(*a*, *b*, *c*, *a*, *b*, *b*, *c*, *a*, *c*, *a*, *b*, *c*)上拟合,以参数 *t* 检验 *P* 值小于 0.05 为标准,筛选出参数不符合的模型,再根据决定系数 R^2 、预估精度 P_a 等评价指标选择最优哑变量参数组合。对筛选后的模型进行参数 *t* 检验, *P* 值结果均小于 0.05, 筛选后的各模型评价指标见表 5。

表5 不同参数组合哑变量胸径生长模型拟合优度与评价指标

Tab. 5 Goodness of fit and evaluation index of dummy variable model with different parameter combinations

参数 Parameter	R^2	AIC	TRE	MAE	P_a
<i>a</i>	0.871	324.85	-1.252	1.826	95.76
<i>b</i>	0.852	347.86	0.200	2.004	95.41
<i>c</i>	0.867	329.92	0.732	1.865	95.60
<i>a, b</i>	0.873	321.69	1.129	1.774	95.71
<i>a, c</i>	0.872	322.86	0.607	1.789	95.69
<i>b, c</i>	0.869	327.21	-0.357	1.870	95.69

由表 5 可知,当哑变量同时加到参数 *a*, *b* 时, R^2 , P_a 值均高于其他参数组合。除 TRE 值外, AIC 和 MAE 均小于其他哑变量参数组合。因此,最终确定含哑变量的胸径生长模型形式为:

$$Y = (a_0 + a_1S_1 + a_2S_2)e^{-(b_0+b_1S_1+b_2S_2)}e^{-c_0t}$$

基于哑变量的胸径生长模型参数估计值见表 6。

3.3.2 含哑变量的树高生长模型拟合

以竞争类型为哑变量,加在树高最优基础模型修正 Weibull 中的不同参数(*a*, *b*, *c*, *a*, *b*, *b*, *c*, *a*, *c*, *a*, *b*, *c*)上拟合,对筛选后的模型进行参数 *t* 检验, *P* 值结果均小于 0.05, 筛选后的模型评价指标见表 7。

由表 7 可知,当哑变量加到参数 *c* 时,决定系数

表6 哑变量胸径生长模型参数估计值

Tab. 6 Estimated value of dummy variable model parameters

参数 Parameter	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0
估计值 Estimated value	18.921	11.333	4.084	5.400	-0.921	-1.223	0.052

表7 不同参数组合哑变量树高生长模型拟合优度与评价指标

Tab. 7 Goodness of fit and evaluation index of dummy variable model with different parameter combinations

参数 Parameter	R^2	AIC	TRE	MAE	P_a
<i>a</i>	0.881	199.22	-3.721	1.418	96.97
<i>b</i>	0.874	208.99	-4.339	1.467	96.90
<i>c</i>	0.882	197.68	-3.035	1.408	96.96
<i>a, b</i>	0.878	203.94	-3.844	1.423	96.93
<i>a, c</i>	0.880	200.22	-4.150	1.417	96.97

R^2 高于其他参数组合, AIC、TRE 和 MAE 均小于其他哑变量参数组合。含哑变量的树高最优生长模型形式为:

$$Y = a_0 e^{-b_0 e^{-(c_0 + c_1 S_1 + c_2 S_2)^t}}$$

基于哑变量的树高生长模型参数估计值见表 8。

表 8 哑变量树高生长模型参数估计值

Tab. 8 Estimated value of dummy variable model parameters

参数 Parameter	a	b	c_0	c_1	c_2
估计值 Estimated value	32.099	0.006	1.139	0.075	0.066

3.4 模型拟合优度与精度比较

利用 R^2 、AIC、TRE、MAE、 P_a 值对选取的最优基础模型与哑变量模型进行评价。由图 3、表 9 可知: 胸径和树高生长模型中, 哑变量模型的拟合优度

和预估精度均优于基础模型, 离散程度均小于基础模型, 其中胸径的哑变量模型的决定系数 R^2 提高了 15.5%, 预估精度 P_a 值提高了 1.5%; 树高的哑变量模型的决定系数 R^2 、预估精度 P_a 值也得到了一定程度的提高。综上表明, 基于竞争类型哑变量的生长模型优于基础模型。

3.5 不同竞争压力下的胸径和树高生长曲线

根据最优基础模型获取的哑变量模型分别制作胸径和树高的生长曲线。由图 4 可知: 胸径的生长过程呈现典型的“S”形生长曲线, 不同竞争状态下的胸径生长量表现为类型 1 > 类型 2 > 类型 3, 其中类型 1 胸径最大值是类型 3 的 1.6 倍; 树高的生长过程呈现类似“肩形”的生长曲线, 不同竞争状态下的树高生长量也表现为类型 1 > 类型 2 > 类型 3, 类型 1 与类型 2 的树高最大生长速率和最大值均相差不大, 但两者的最大值均大于类型 3。

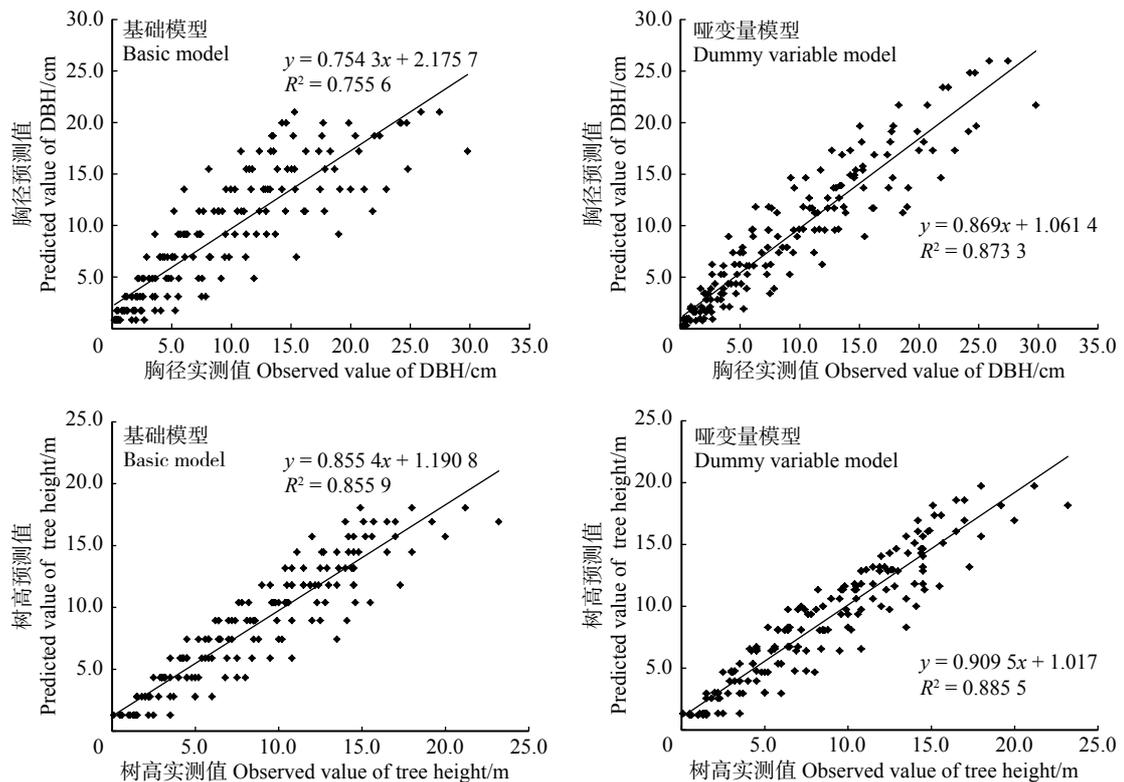


图 3 基础模型与哑变量模型实测值与预测值的相关关系

Fig. 3 Correlation of observed and predicted values for basical model and dummy variable model

表 9 最优基础模型与哑变量模型效果对比

Tab. 9 Comparison in the effects of optimal basic model and dummy variable model

变量 Variable	模型 Model	R^2	AIC	TRE	MAE	P_a
胸径 DBH	基础模型 Basic model	0.756	432.36	0.020 8	0.732	94.28
	哑变量模型 Dummy variable model	0.873	321.69	1.129	1.774	95.71
树高 Tree height	基础模型 Basic model	0.853	231.65	0.355	1.463	96.54
	哑变量模型 Dummy variable model	0.892	197.68	-3.035	1.408	96.96

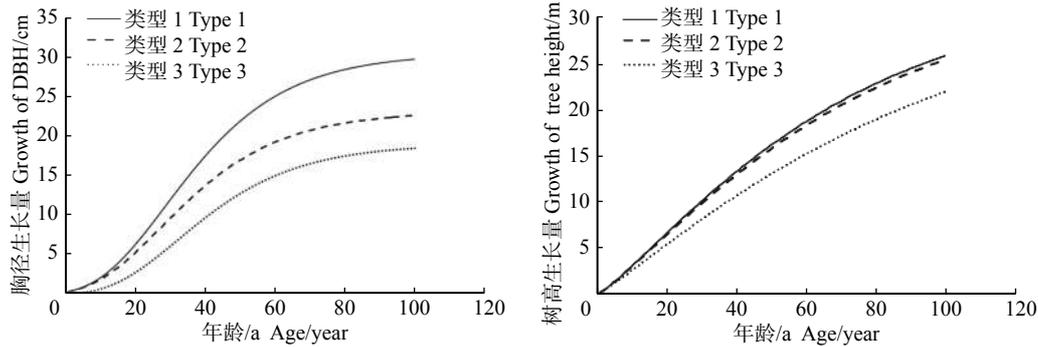


图4 不同竞争压力水平下的胸径、树高生长曲线

Fig. 4 DBH and tree height growth curves at different competitive pressure levels

4 结论与讨论

4.1 林木生长规律

由于楠属植物具有高大、木材坚实, 结构细致等特点, 不少学者对其生长特性进行了研究。一些学者对四川桫欏(*Phoebe zhennan*)胸径、树高生长规律的研究结果表明^[20-21], 胸径前30年生长较慢, 30~90年胸径生长较快, 树高则表现出前20年生长较慢, 20年后生长速度加快的特征, 同时自然状态下的桫欏林分直径呈现正态分布规律。江香梅等^[13]对江西吉安闽楠天然林进行调查及树干解析, 结果显示: 胸径1~10年缓慢生长, 10~30年快速生长, 30年后生长速度逐渐减缓, 而树高1~10年缓慢生长, 10~20年快速生长, 20年后则表现为匀速生长。本研究得出胸径生长速生期为30~50年, 5~15年为树高早期速生期, 后期主要生长速生期为35~45年。本文研究结果与前人的研究结果并不完全相同, 究其原因, 可能是由于区域气候条件、林分所处的立地条件和环境因子等的不一致所导致的, 如本文研究的闽楠次生林多位于山坡中下部的沟谷中, 光照资源较为缺乏, 因此胸径前期生长缓慢, 而树高早期快速生长, 以获取更多的光照资源进行物质积累。

在立地条件较为一致的天然次生林中, 林木之间的资源争夺是影响其正常生长的重要因素。不少研究者对阔叶林中不同竞争压力水平下的胸径和树高生长量进行对比研究, 结果均表明胸径和树高生长量表现为类型1 > 类型2 > 类型3^[22-24]。本文研究结果与前人研究结果较为一致。天然次生林中林分空间结构复杂, 处于竞争优势地位的林木通过挤压遮蔽其他林木获得更多水、肥、光、热, 促进胸径和树高的增长, 从而进一步增强其生长竞争优势, 而竞争压力大的林木在生长早期就因受到其他林木的遮挡而导致长势较差, 胸径和树高增长缓慢, 也逐渐失去竞争力, 成为林分中的劣等木^[22]。

4.2 林木生长模型

由于树种自身生理特征和立地条件的不同适用的单木生长模型也不尽相同。如林丽平等^[4]对广东省樟树生长模型研究表明, 胸径、树高和材积的最优生长模型分别为Mitscheerlich、Schumacher和Compertz模型, 胡焕香等^[25]利用大小比数法对湖北檫木(*Sassafras tzumu*)次生林单木直径生长过程进行研究, 结果表明Richards模型对胸径生长过程拟合效果较好。本研究基于5种理论生长模型得出闽楠胸径最优基础生长模型为Gompertz模型、树高最优基础生长模型为修正Weibull模型。相关研究表明, 利用哑变量模型可在一定程度上提高模型预估精度和适用性, 有助于建立区域性的通用生物数学模型^[26]。为更准确地表达次生林中闽楠生长过程, 本文在最优基础生长模型的基础上构建了含竞争类型哑变量生长模型。与基础模型相比, 哑变量模型的决定系数 R^2 、 P_a 值均得到了一定程度的提高, AIC、TRE、MAE也有一定程度减小。在生长模型的不同生物学参数上引入竞争类型哑变量, 模型的预估效果不同。对于胸径生长模型而言, 在代表树木生长的最大值参数上引入竞争类型哑变量的模型预估效果较好; 而对于树高生长模型而言, 在代表树木最大生长速率的参数上引入竞争哑变量更有利于提高模型预估精度。究其原因, 可能是因为研究区域的立地条件较为一致造成的, 树高生长主要由树种的遗传特性、林分所处的立地条件决定。在同一立地条件下, 林木竞争更多的是影响林木树高的最大生长速率, 而树高的最大生长值相差不是很大; 对于胸径而言, 胸径与树冠的生长是紧密相关的, 而林木之间的竞争直接影响树冠的发育, 进一步影响胸径生长, 从而影响胸径的最大生长值^[27]。综上所述, 哑变量模型适用于天然次生林中不同竞争类型的闽楠胸径和树高生长预估, 简化了模型形式, 有利于提高模型精度和适用性。

本研究通过标准地调查和解析木数据初步探讨

了单木树高、胸径的生长规律,并构建了含有竞争类型哑变量的生长模型,提高了模型预估精度。然而,要更加全面了解次生林中闽楠生长状况,后期还应继续对项目区环境因子特征和种间生态关系等进行综合分析,以进一步揭示闽楠天然次生林分生长规律,为提升闽楠次生林分质量提供依据。由于闽楠是我国Ⅱ级重点保护植物,对其采伐受到严格限制,所采用的解析木数量偏少,年龄最大值也只有67年,因此模型的外推和适用性还存在一定局限,但针对研究区来说本研究结果具有较大的价值,也可为其他区域提供参考。

参 考 文 献

- [1] 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.
Ren R J, Kang X G, Yang H. Review on growth model of individual-tree in natural forest[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(6): 203-206.
- [2] Cao Q V. Prediction of annual diameter growth and survival for individual trees from periodic measurements[J]. Forest Science, 2000, 46(1): 127-131.
- [3] Mabvurira D, Miina J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe[J]. Forest Ecology & Management, 2002, 161(1/3): 231-245.
- [4] 林丽平,徐期瑚,罗勇,等.广东省樟树立木生长规律和生长模型研究[J].中南林业科技大学学报,2018,38(6):23-29.
Lin L P, Xu Q H, Luo Y, et al. Study on the growth laws and models of *Cinnamomum Camphora* in Guangdong Province[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2018, 38(6): 23-29.
- [5] Canham C D, Papaik M J, Uriarte M, et al. Neighborhood analyses of canopy tree competition along environmental gradients in New England forests[J]. *Ecological Applications*, 2006, 16(2): 540-554.
- [6] Coomes D A, Allen R B. Effects of size, competition and altitude on tree growth[J]. *Journal of Ecology*, 2007, 95(5): 1084-1097.
- [7] 王金池,邓华锋,冉啟香,等.基于哑变量的云南松蓄积生长模型[J].森林与环境学报,2017,37(4):453-458.
Wang J C, Deng H F, Ran Q X, et al. The volume growth model of *Pinus yunnanensis* based on dummy variables[J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(4): 453-458.
- [8] 吴大荣.福建罗卜岩闽楠(*Phoebe bournei*)林中优势树种生态位研究[J].生态学报,2001,21(5):851-855.
Wu D R. A study on the niche of dominant species in *Phoebe bournei* forests in Luoboyan Nature Reserve of Fujian[J]. Acta Ecologica Sinica, 2001, 21(5): 851-855.
- [9] 吴大荣,朱政德.福建省罗卜岩自然保护区闽楠种群结构和空间分布格局初步研究[J].林业科学,2003,39(1):23-30.
Wu D R, Zhu Z D. Preliminary study on structure and spatial distribution pattern of *Phoebe bournei* in Luoboyan Nature Reserve in Fujian Province[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 23-30.
- [10] 游晓庆,彭诗涛,郭孝玉,等.闽楠天然次生林林分空间结构研究[J].江西农业大学学报,2016,38(4):660-667.
You X Q, Peng S T, Guo X Y, et al. A study on the spatial structure of natural secondary *Phoebe bournei* forest[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(4): 660-667.
- [11] 范繁荣.闽楠群落种间关联性的灰色系统理论分析[J].浙江林学院学报,2008,25(1):33-36.
Fan F R. Study of inter-specific correlation of *Phoebe bournei* communities by grey systems[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(1): 33-36.
- [12] 李雪云,潘萍,臧颢,等.闽楠天然次生林自然更新的影响因子研究[J].林业科学研究,2017,30(5):701-708.
Li X Y, Pan P, Zang H, et al. Study on factors affecting natural regeneration of natural secondary *Phoebe bournei* forest[J]. Forest Research, 2017, 30(5): 701-708.
- [13] 江香梅,肖复明,叶金山,等.闽楠天然林与人工林生长特性研究[J].江西农业大学学报,2009,31(6):1049-1054.
Jiang X M, Xiao F M, Ye J S, et al. A study on the growth characteristics of *Phoebe bournei* in natural forest and plantation stands[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2009, 31(6): 1049-1054.
- [14] 陈东阳.闽楠人工林与天然林生长特点比较[J].福建林业科技,2012,39(3):24-28.
Chen D Y. Contrast of growth characteristics of *Phoebe bournei* artificial forest and natural forest[J]. Journal of Fujian Forestry Science and Technology, 2012, 39(3): 24-28.
- [15] 董点,林天喜,唐景毅,等.紫椴生物量分配格局及异速生长方程[J].北京林业大学学报,2014,36(4):54-63.
Dong D, Lin T X, Tang J Y, et al. Biomass allocation patterns and allometric models of *Tilia amurensis*[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2014, 36(4): 54-63.
- [16] 钱升平,吕飞舟,边更战,等.基于简单竞争指标的青冈栎次生林林木竞争单元构建[J].林业资源管理,2016(2):56-61.
Qian S P, Lü F Z, Bian G Z, et al. Structure of tree competition unit of *Cyclobalanopsis glauca* secondary forest based on simple competition index[J]. Forest Resources Management, 2016(2): 56-61.
- [17] 唐守正,郎奎建,李海奎.统计与生物数学模型计算:ForStat教程[M].北京:科学出版社,2009.
Tang S Z, Lang K J, Li H K. Statistic and biometric model calculation: ForStat course[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [18] 李忠国,孙晓梅,陈东升,等.基于哑变量的日本落叶松生长模型研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2011,39(8):69-74.
Li Z G, Sun X M, Chen D S, et al. Dummy variables model of increment of *Larix kaempferi*[J]. Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition), 2011, 39(8): 69-74.
- [19] 曾伟生,唐守正.立木生物量方程的优度评价和精度分析[J].林业科学,2011,47(11):106-113.
Zeng W S, Tang S Z. Goodness evaluation and precision analysis

- of tree biomass equations[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2011, 47(11): 106–113.
- [20] 张炜, 何兴炳, 唐森强, 等. 四川桢楠生长特性与分布 [J]. *林业科技开发*, 2012, 26(5): 38–41.
Zhang W, He X B, Tang S Q, et al. Study on the growth characteristics and distribution of *Phoebe zhennan* in Sichuan[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2012, 26(5): 38–41.
- [21] 龙汉利, 张炜, 宋鹏, 等. 四川桢楠生长初步分析 [J]. *四川林业科技*, 2011, 32(4): 89–91.
Long H L, Zhang W, Song P, et al. An analysis of the growth of *Phoebe zhennan* in Sichuan[J]. *Journal of Sichuan Forestry Science & Thecnology*, 2011, 32(4): 89–91.
- [22] 刘发林. 南方集体林区木荷次生林生长规律及经营技术研究 [D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2013.
Liu F L. Research on growth law and management technique of *Schima superba* in southern collective forest region[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2013.
- [23] 唐继新, 麻静, 贾宏炎, 等. 南亚热带珍稀濒危树种格木生长规律研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2015, 35(7): 37–44.
Tang J X, Ma J, Jia H Y, et al. Study on the growth law of a rare and endangered tree species of *Erythrophleum fordii* in south subtropical area of China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2015, 35(7): 37–44.
- [24] 赵俊卉, 亢新刚, 张慧东, 等. 长白山主要针叶树种胸径和树高变异系数与竞争因子的关系 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(8): 1832–1837.
Zhao J H, Kang X G, Zhang H D, et al. Relationships between coefficient of variation of diameter and height and competition index of main coniferous trees in Changbai Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(8): 1832–1837.
- [25] 胡焕香, 余济云, 李俊, 等. 湖北桂花林场橡木次生林单木生长模型的研究 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(4): 61–65.
Hu H X, She J Y, Li J, et al. Study on individual tree growth model of *Sassafras tsumu* secondary forest on Osmanthus Forest Farm in Hubei Province[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2013, 33(4): 61–65.
- [26] 朱光玉, 罗小浪. 湖南栎类天然混交林优势木树高曲线哑变量模型研究 [J]. *林业资源管理*, 2017(4): 22–29.
Zhu G Y, Luo X L. Dominant height-diameter models for mixed *Quercus* forest based on dummy variable[J]. *Forest Resources Management*, 2017(4): 22–29.
- [27] 沈国舫, 翟明普. 森林培育学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2013.
Shen G F, Zhai M P. *Silviculture*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2013.

(责任编辑 冯秀兰
责任编辑 雷相东)