

广东省枫香单木干材生物量生长模型的研建

何 潇¹,赵嘉诚¹,曹 磊¹,李海奎^{1*},徐期瑚²

(1. 中国林业科学研究院 资源信息研究所,北京 100091;2. 广东省林业调查规划院,广东 广州 510520)

摘 要:枫香(*Liquidambar formosana*)是我国闽北林区重要的乡土树种,生长迅速、适应性强,在观赏、药用、用材等方面都有着重要作用。单木模型是林分模型的基础,通过建立单木生物量生长模型,在时间维度上分析林木生物量生长的动态变化,以期为全面评价森林的固碳能力提供科学依据。采用典型抽样的方法,从广东省 9 个地区的一类样地附近抽取枫香样木 40 株(天然起源 25 株,人工起源 15 株),破坏性实测各组分的生物量并进行树干解析得到样木的生物量生长数据。基于逻辑斯蒂(Logistic)、坎派兹(Gompertz)和理查德(Richards)3 种基础生长方程,利用哑变量的方法,建立分起源和立地等级的枫香干材生物量生长模型,以决定系数 R^2 、均方根误差 RMSE、总相对误差 TRE 和平均预估误差 MPE 4 个指标来评价各模型,进而分析枫香干材生物量的生长过程。结果表明,Richards 方程在基础模型中效果最佳($R^2=0.61$,RMSE=50 kg);与 Richards 方程相比,哑变量模型 R^2 提高了 11%,RMSE 降低了 7.95 kg;起源与立地等级对枫香干材生物量均产生了较大影响,在天然起源的高立地等级条件下,枫香干材理论最大连年生长量和平均生长量分别在其生长的第 23 年和第 38 年到达。

关键词:干材生物量生长;哑变量;树干解析;枫香

中图分类号:S781 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)06-0236-07

Construction of Individual Bole Biomass Growth Models for *Liquidambar formosana* in Guangdong Province

HE Xiao¹, ZHAO Jia-cheng¹, CAO Lei¹, LI Hai-kui^{1*}, XU Qi-hu²

(1. Research Institute of Forest Resource Information Techniques, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Guangdong Institute of Forestry Inventory and Planning, Guangzhou, Guangdong 510520, China)

Abstract: *Liquidambar formosana* is an important native species in the forest region of Northern Fujian. It grows rapidly with strong adaptability, and plays important roles in ornamental, medicinal and timbering values. Individual tree model is the basis of stand model. The dynamic changes in individual biomass growth were analyzed in the time dimension by establishing individual tree biomass growth model to provide a scientific basis for the comprehensive evaluation of the carbon sequestration capacity of the forest. Forty *L. formosana* trees were typically sampled (25 were from natural stands and 15 from plantations) around national forest inventory permanent sample plots in 9 different regions in Guangdong Province and the data of biomass growth were obtained by the destructive measurement of the biomass of each component and stem analysis. Based on the basics growth equation of Logistic, Gompertz and Richards, bole biomass growth models of distinguishing the stand origin and site quality with dummy variables of *L. formosana* were constructed, these models were evaluated by four indexes: coefficient of determination (R^2), root mean

收稿日期:2018-03-08 修回日期:2018-07-17

基金项目:广东省林业科技专项“广东主要碳汇造林树种生物量模型研建”(2015-02);广东省林业科技创新平台建设项目“广东省碳汇计量监测创新平台建设”(2016CXPT03)。

作者简介:何 潇,男,在读硕士,研究方向:林业统计与生物数学模型。E-mail:hexiaonuist@163.com

*通信作者:李海奎,男,研究员,博士,研究方向:林业统计及计算机应用。E-mail:lihk@caf.ac.cn

square error (RMSE), total relative error (TRE) and mean prediction error (MPE) The growth of *L. formosana* was further analyzed. The results showed that the fitting of Richards equation took the lead among base models ($R^2=0.61$, RMSE=50 kg); compared with the Richards equation, R^2 raised by 11% and RMSE decreased by 7.95 kg to the model with dummy variables; the stand origin and site quality had a greater impact on the bole biomass of *L. formosana*. Under natural origin and high site quality, theoretical maximum of current annual increment and mean annual increment achieved at 23 a and 38 a, respectively.

Key words: bole biomass growth; dummy variable; stem analysis; *Liquidambar formosana*

森林是陆地生态系统最大的碳库,其固碳能力是评价全球大气碳收支的重要参数。作为森林固碳能力的计算基础和森林生态系统运转的物质来源的森林生物量,在固碳增汇、促进生态系统碳循环、维持全球碳平衡等方面发挥着重要作用^[1]。近年来,随着各国对全球气候变化的重视程度不断加深,森林生物量的测定和估算已成为当代林业生产和科研的焦点^[2]。我国对森林生物量的研究内容多为利用生物量模型、生物量估算参数、3S 技术等方法在大尺度上对森林生物量及碳储量进行估算^[3]来评价森林的固碳能力。

然而,对森林生物量及其固碳能力的评价不仅应体现在空间尺度上,更应该将森林不同时期的固碳效率考虑在内——在对当前阶段森林固碳率有一个准确的评价的基础上,对未来几年、几十年内,其生物量及固碳能力的变化也应有一个合理的估计。这种动态变化是森林经营方面的重要参考指标^[4]。但是,森林生长周期长、长期定位监测困难等特点,使得如何对森林生长过程进行评价与动态预测成为林业工作中的重点和难点^[5]。建立生长模型,往往是解决这一问题的有效途径。

生长模型,描述了林木个体或者林分大小随时间的变化^[6]。单木生长模型是以林分中各单株林木作为基本单位,它从竞争机制出发,通常用来预测林木胸径、断面积或树高等的生长过程^[7]。单木生长模型可以直接判定各株单木的生长状况,以单木模型为基础可以模拟林分的生长,更加详尽地描述林分的结构和动态^[8-9]且有较好的适用性^[10]。最早的生长模型主要包括逻辑斯蒂(Logistic)、坎派兹(Gompertz)、单分子式(Mitscherlich)、理查兹(Richards)等在内的基础模型,后来逐步扩展为考虑林木之间竞争的,与距离有关的生长模型(distance-dependence)和与距离无关的生长模型(distance-independence)^[11]。近年来,尽管我国学者已对单木生长模型进行了广泛研究^[12-13],但林分年龄(尤其是天然林)的确定难度较大且不同时期林木生物量的测定成本较高,导致我国主要树种生物量生长模型一直极为缺乏,但有关研究表明,年龄对单木

和林分生物量影响极显著^[14]。对于已经建立好的可靠的生长模型,尽管林木的年龄无法准确确定,但两个生长期之间的时间间隔是可以确定的,在森林经营措施不改变条件下,已知任意时间的森林生物量均可根据生长方程直接推出若干年后的生物量。但由于不同的林木,受立地条件、气候因子、人为活动等多种因素的影响,同一树种的单株生物量生长过程往往不尽相同。因此,对于同一树种不同生长速度,一般需要分别建模,这样不仅工作量较大,而且使模型不相容。而在模型中加入区分生长环境特征的哑变量则可以解决以上问题^[15]。

枫香(*Liquidambar formosana*)为金缕梅科枫香属落叶乔木,是我国闽北林区重要的乡土树种,生长迅速、适应性强,有较强的耐火性和对毒性气体的抗性,在观赏、药用、用材等方面都有着重要作用且颇具造林绿化的潜力。本文基于广东省枫香解析木,利用哑变量技术,建立枫香单木干材生物量生长模型,合理地分析该树种不同生长速度下生物量生长的动态变化,以期为指导森林经营工作及全面评价森林固碳能力提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文根据枫香在广东省的分布,从广州、河源、惠州、茂名、梅州、清远、韶关、云浮、肇庆 9 个地区中的一类固定样地附近,使用典型抽样的方法,抽取 40 株胸径较大、树高接近林分平均高、干型通直饱满、无明显病虫害、梢头完整的枫香样木进行树干解析。伐倒之前记录树种、起源(其中 25 株属于天然起源,15 株为人工起源),并准确测量基部位置、胸径、树高、枝下高、东西南北 4 个方向的冠幅。枫香解析木的基本统计信息如表 1 所示。之后采用破坏性方法将样木伐倒,分干材、树皮、树枝、树叶称鲜质量,并分别抽取样品带回实验室,在 85℃ 恒温下烘干至恒质量,根据样品鲜质量和干质量分别推算样木各部分干质量并汇总得到地上部分干质量。根据外业测量的每株样木根颈处、0.5/10、1/10、2/10、3/10、4/10、5/10、6/10、7/10、8/10、9/10 处的带皮直

径与去皮直径,计算出树干的带皮材积与去皮材积,继而由式(1)求得每株样木的干材生物量材积转换系数 R :

$$R_i = \frac{Biomass_i}{V_i} (i=1,2,3,\dots,40) \tag{1}$$

式中, $Biomass_i$ 为第 i 株样木实测干材生物量, V_i 为第 i 株样木去皮材积。

在转换系数确定后,从 1.3 m 处开始以 2 m 为一个区分段,在每个区分段中央截取圆盘并包括根茎及梢底圆盘,将圆盘抛光后查数年轮,以 5 a 为一个龄级,分别量取东西和南北 2 个方向上各龄级的直径,取其平均值作为该龄级的直径,之后根据中央断面区分求积式计算各个龄级的材积,假设不同龄级的材积与生物量的转换系数相同,则可以通过式(2)求得每株样木各龄级生物量 $Biomass$:

$$Biomass_{it} = R_i \cdot V_{it} (i=1,2,3,\dots,40) \tag{2}$$

式中, $Biomass_{it}$ 为第 i 株样木 t 年龄干材生物量, V_{it} 为第 i 株样木 t 年龄去皮材积。

表 1 枫香解析木基本统计量

Table 1 Descriptive statistics of sampling trees

| 变量 | 平均值 | 标准差 | 最小值 | 最大值 |
|-------------------|-------|-------|------|-------|
| 胸径/cm | 23.8 | 9.1 | 11.6 | 43.5 |
| 树高/m | 16.4 | 3.7 | 8.9 | 26.6 |
| 年龄/y | 27 | 13 | 11 | 82 |
| 材积/m ³ | 0.31 | 0.25 | 0.04 | 0.92 |
| 生物量/kg | 145.2 | 124.0 | 6.3 | 445.0 |

1.2 方法

1.2.1 基础模型 本文选取 Logistic 及其变形式、Gompertz 和 Richards 这 4 种符合生物学意义且被国内外学者广泛使用^[16-18]的生长方程作基础模型,其模型形式分别为:

Logistic 方程:

$$B = \frac{A}{1 + me^{-\alpha}} + \epsilon(A, m, r > 0) \tag{3}$$

Logistic 方程变形式:

$$B = \frac{A}{1 + \exp(\frac{b_1 - t}{b_2})} + \epsilon(A, b_1, b_2 > 0) \tag{4}$$

Gompertz 方程:

$$B = A \cdot e^{-me^{-\alpha}} + \epsilon(A, m, r > 0) \tag{5}$$

Richards 方程:

$$B = A \cdot (1 - e^{-\alpha})^c + \epsilon(A, r, c > 0) \tag{6}$$

式中, B 为林木生物量; t 为林木年龄; A 为林木生长的最大值参数,即 $A = B_{\max}$; m 是与初始值有关的参数; r 是内禀增长率(最大生长速率)参数; c, b_1, b_2 为模型参数; ϵ 为误差项。

基础模型中的参数 A 的确定,首先对所有样本

拟合生物量与胸径、树高的二元模型 ($B = a \cdot D^b H^c$),然后带入已知较大的胸径以及中国植物志^[19]记载的枫香最高树高,得到理论最大生长量 A ,最后估计其他参数。

1.2.2 哑变量模型 天然林与人工林的具有不同的立地条件、气候条件,在人工林中林木还受到人为经营措施的影响,使得不同起源的生物量生长情况有所不同。同一树种即使在相同立地条件下,不同树木之间生长速度也会有所差异,这是受个体差异所影响的,林木受到气候、土壤质量、水分和温度影响时,林木的生长速度差异将更明显。本文用调查时实际测量的各样本树高与径阶的关系,将所有样木划分为“高”($n=11$)、“中”($n=17$)和“低”($n=12$)3 个立地等级,分等级建立生物量生长模型。划分具体步骤为:首先确定每株样木所属径阶,然后用每株样木的实测树高除以该样木的所属径阶,在同一径阶内,把该比值的最大(小)值作为最大(小)区间的中间值,以此划分 3 个区间,最后在每个径阶内把样木分为 3 个立地等级,得到 3 个立地等级。

从拟合出的 4 种基础方程中选出 1 个最优方程,在参数 A 上引入代表枫香起源的哑变量,在参数 R 上引入区分不同生长速度的哑变量,使得有不同起源和立地等级的枫香的生物量生长用一个生物量生长模型来表示,有利于减少工作量。基于最优基础方程,分起源和立地等级建立哑变量模型。以 Richards 方程为例,哑变量模型形式如下:

$$B = (A + A_0 f_0) \cdot (1 - e^{-(r_1 f_1 + r_2 f_2)t})^C + \epsilon \tag{7}$$

式中, A_0 表示天然林与人工林下生物量生长的最大值之差; $r_i (i=1,2)$ 代表中、低立地等级与高立地等级下生物量的生长速率之差; C 为不同生长速度下模型形状参数的差异; f_0 为区分起源的哑变量,天然林下 $f_0=0$,人工林下 $f_0=1$; $f_i (i=1,2)$ 为区分立地等级的哑变量,在高立地等级下 $f_1=0, f_2=0$; 中立地等级下 $f_1=1, f_2=0$; 低立地等级下 $f_1=0, f_2=1$; ϵ 为误差项。其他变量含义同上。

1.2.3 模型评价 基于 Forstat^[20]和 R 软件的 nls 和 nlme^[21]包进行模型拟合并采用以下 4 个指标进行模型评价^[22],包括决定系数 R^2 ,均方根误差 RMSE,总相对误差 TRE 和平均预估误差 MPE。计算公式分别为:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \tag{8}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - 1}} \tag{9}$$

$$TRE = \frac{\sum y_i - \sum \hat{y}_i}{\sum \hat{y}_i} \times 100\% \tag{10}$$

$$MPE=\frac{t_{\alpha} \cdot (\sqrt{\frac{\sum (y_i-\hat{y}_i)^2}{n-p}}/\bar{y})}{\sqrt{n}} \times 100\% \quad (11)$$

式中, y_i 为实测值, \hat{y}_i 为模型预测值, n 为样本量, p 为模型参数, t_{α} 为是置信水平为 α 时的 t 值。

对于包含哑变量的参数的选择及设置问题,一方面从统计学上对模型参数的 t 检验是否显著来考虑。首先将每个参数都设置哑变量进行模型拟合,如若在显著水平 $\alpha=0.05$ 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。另一方面,用非线性额外平方和方法^[23](non-linear extra sum of squares method)检验哑变量的引入是否有意义。该检验需要对全模型(full model)和删减模型(reduced model)进行拟合。全模型是指通过扩充哑变量形式的参数,实现对不同生长速度下都有各自对应参数的完整模型。而删减模型是全模型的一部分,它嵌套在全模型中,“删减”掉一些没有意义的哑变量,降低了模型参数个数,但几乎不降低模型精度,使模型更佳简化^[24]。这一过程通过对统计量 F^* 进行检验来完成:

$$F^*=(\frac{SSE_R-SSE_F}{df_R-df_F})\frac{df_F}{SSE_F}\sim F(df_R-df_F,df_F) \quad (12)$$

式中, SSE_R 是删减模型的残差平方和, SSE_F 为全模型的残差平方和, df_R 和 df_F 分别为删减模型和

全模型的自由度。

2 结果与分析

2.1 最优基础模型

表 2 是 4 种基础模型的拟合参数和指标评价结果,最大生长量 A 由胸径、树高的二元模型生物量模型($B=0.0214D^{1.78}H^{1.12}$)得到。可以看出,所有模型各参数全部极显著($P<0.01$)。Logistic 方程式(3)给出的最大生长速率(0.04)大于 Gompertz 式(5),0.02)和 Richards 方程式(6),0.01)。Richards 方程的 R^2 达到 0.6 以上,其次是 Gompertz 方程,Logistic 及其变形式 R^2 的最小,仅 0.5;RMSE 也显示出同样的规律,Richards 方程优于 Gompertz 方程,Logistic 及其变形式的 RMSE 最大,为 57.33 kg;Richards 和 Gompertz 方程的 $TRE<10\%$,而 Logistic 及其变形式的 TRE 最大,为 11.80%,所有模型给出的 TRE 均 <0 ,说明 4 种生长曲线对样木的生物量估计整体偏高;所有方程的 MPE 差别不大,均处在 5%左右。从 4 个评价指标上看,Richards 方程在所有评价指标上效果最优,拟合结果较好,其次是 Gompertz 方程,而 Logistic 及其变形式的拟合效果较差,且二者在拟合效果上几乎无任何差异,4 种基础生长模型的拟合效果如图 1 所示。综合考虑,选择 Richards 方程为最优基础模型。

表 2 基础生长模型参数和评价结果

| Table 2 Estimated parameters and evaluated results for basic growth equations | | | | | | | |
|---|-------|---------|---------|-------|---------|--------|-------|
| 方程 | 参数估计值 | | P 值 | R^2 | RMSE/kg | TRE/% | MPE/% |
| Logistic(3) | m | 30.5 | <0.01 | 0.50 | 57.33 | -11.80 | 5.60 |
| | r | 0.047 4 | <0.01 | | | | |
| Covariant form of Logistic(4) | b_1 | 72.1 | <0.01 | 0.50 | 57.33 | -11.80 | 5.60 |
| | b_2 | 21.1 | <0.01 | | | | |
| Gompertz(5) | m | 4.16 | <0.01 | 0.56 | 53.61 | -8.48 | 5.24 |
| | r | 0.024 6 | <0.01 | | | | |
| Richards(6) | c | 1.71 | <0.01 | 0.61 | 50.99 | -5.55 | 4.98 |
| | r | 0.013 7 | <0.01 | | | | |

2.2 哑变量模型的评价

基于最优基础模型构建哑变量模型,表 3 为哑变量模型各拟合参数和指标评价结果,立地等级从高到低,带有哑变量的 Richards 方程式(7)给出的生长速率参数估计值也逐渐下降。与基础模型相比,哑变量模型 R^2 提高了 11%,RMSE 降低了 7.95 kg, TRE 也下降了 1.85%,该值 >0 ,说明哑变量模型对样木的生物量估计偏低,MPE 指标进一步减少。综合来看,哑变量模型明显优于 Richards 基础模型,说明将哑变量引入方程中,细化了模型的使用范围,大幅提高了模型拟合效果。

从模型拟合预测值对实测值散点图(图 1)中也可以看出,基础模型(上半幅)的拟合值相对于理想标准线较为离散,年龄较小的林木干材生物量预测值几乎全都处于标准线的上方,几棵大树的预测值距离标准线也比较远,整体拟合效果比较差;哑变量模型(下半幅)则较为紧密,年龄较小的林木均匀分布在标准线的两侧,拟合效果很好,仅有几株年龄较大的林木拟合效果较差。哑变量模型和基础模型都有一些偏离标准线预测值较大的值,但基础模型的偏离程度远远大于哑变量模型。

2.3 不同起源与立地等级下的枫香干材生物量生长差异

由表 4 可以看出,不同起源和立地等级的生长特征有所差异,平均生长量和连年生长量的最大年龄均随着立地等级的不断降低而增加,数量成熟龄差距明显;在立地等级相同时,连年生长量与平均生长量的最大值由于起源的不同也出现了差异,而这种差异在立地等级较高时表现的更为明显;同时天然起源最大生长量要大于人工起源的最大生长量,这点由哑变量模型中 A_0 的估计值 <0 也可以发现。图 3 给出了天然林高立地等级的枫香干材生物量连年生长量与平均生长量的关系。在幼龄和中龄阶段干材迅速生长,连年增长量与平均生长量都随年龄的增加而不断增大,生长率持续上升,但连年生长量增加速度较快,最大连年生长量(13.3 kg)在 23 a 处到达。连年生长量与平均生长量于 38 a 相交,此

时平均生长量(8.4 kg)达到最大值,之后生长逐渐趋于缓慢,连年生长量小于平均生长量。

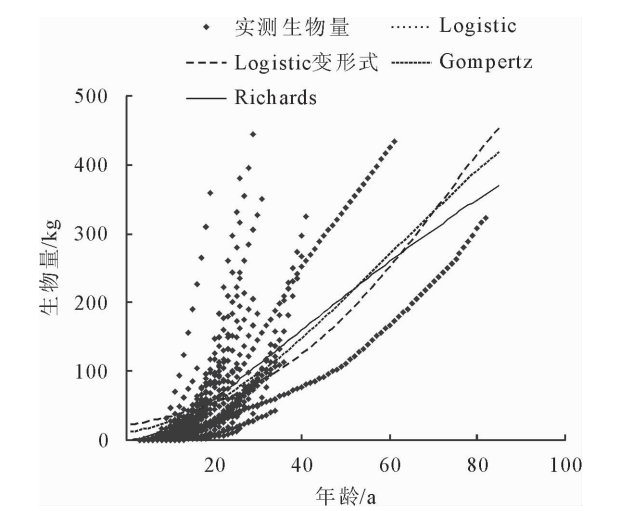


图 1 4 种基础生长模型拟合效果

Fig. 1 Model fitting effects of four basic growth models

表 3 哑变量生长模型参数和评价结果

| Table 3 Estimated parameters and evaluated results for r growth model with dummy variables | | | | | | |
|--|-------|---------|---------|-------|---------|-------|
| 方程 | 参数估计值 | | P 值 | R^2 | RMSE/kg | TRE/% |
| 哑变量模型 (式 7) | A | 455 | <0.01 | 0.72 | 43.04 | 3.70 |
| | A_0 | -166 | <0.01 | | | |
| | r | 0.071 5 | <0.01 | | | |
| | r_1 | 0.019 3 | <0.01 | | | |
| | r_2 | 0.025 4 | <0.01 | | | |
| | c | 5.148 1 | <0.01 | | | |
| | | | | | | 4.15 |

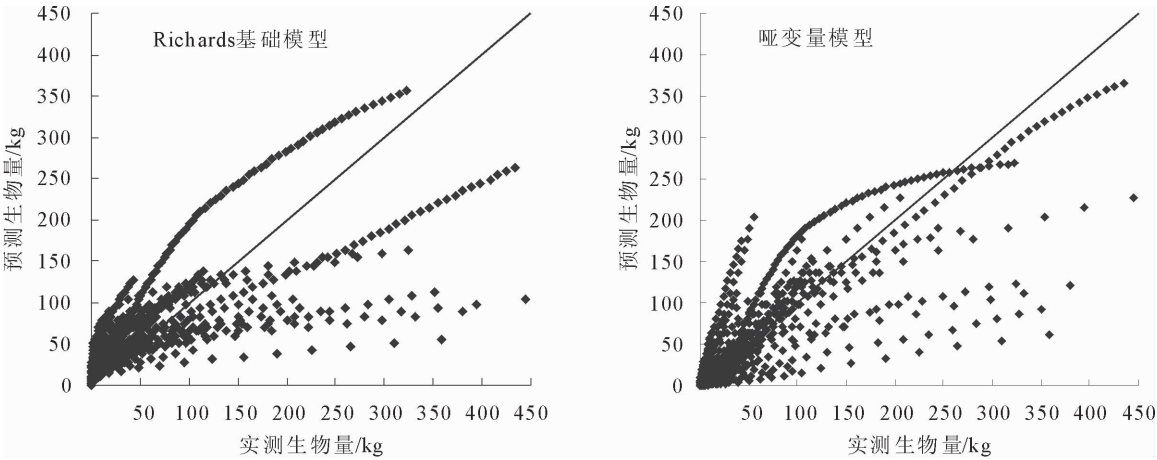


图 2 基础模型和哑变量模型的干材生物量预测值对实测值散点

Fig. 2 Scatter plot of the predicted bole biomass of basics and dummy variable models against measured bole biomass

3 结论与讨论

通过对不同起源、地区抽取的枫香样本进行树干解析,建立了广东省枫香干材生物量生长模型。样本之间生长过程的差异主要是样本所在林分的起源、立地质量及其周围环境等因素综合影响的结果。人工林中由于存在各种抚育经营措施,使林木更早地进入速生期,生长速率应高于同时期的天然林。

增加起源和立地等级的哑变量模型的最大生长速率参数差异显著,与黄勇来^[25]得到的枫香人工林较天然林生长更为迅速结论一致。陈波涛^[26]等通过对贵州省枫香树的调查,发现林木由于受到气候的影响,在土壤条件基本一致的情况下,低海拔地区下的生长量大于高海拔地区,高积温地区大于低积温地区。这些结果也印证了划分起源和立地等级来建模的合理性。我国南方枫香天然林一般于21~40 a

表 4 不同起源和立地等级下的生物量
最大生长年龄和生长量

| Table 4 Maximum growth age and increment of biomass on different origins and sites quality | | | | | |
|--|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 起源 | 立地等级 | 连年最大生长量 /kg | 连年生长量最大年龄 /a | 平均最大生长量 /kg | 平均生长量最大年龄 /a |
| 天然林 | 高 | 13.3 | 23 | 8.4 | 38 |
| | 中 | 9.7 | 31 | 6.1 | 52 |
| | 低 | 8.6 | 36 | 5.4 | 59 |
| 人工林 | 高 | 8.4 | 23 | 5.3 | 38 |
| | 中 | 6.2 | 31 | 3.9 | 52 |
| | 低 | 5.4 | 36 | 3.4 | 59 |

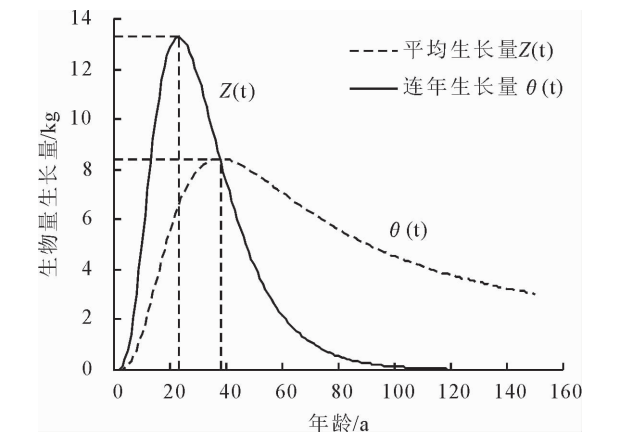


图 3 天然林高立地质量干材生物量连年生长量与
平均生长量的关系

Fig. 3 Relationship between current annual increment and mean annual increment of bole biomass on natural origin and high sites quality

生长迅速,51~70 a 成熟;人工林于 11~20 a 生长迅速,31~50 a 成熟^[27]。而本研究显示,广东省枫香干材生物量于 23~36 a 迅速生长,在 38~59 a 成熟。枫香干材生物量在天然高立地等级的条件下,连年生长量与平均生长量于 38 a 相交,这与周火明^[28]等通过对枫香天然次生林研究,得到枫香材积的连年生长量在 10~40 a 时一直呈现较快的增长趋势,而在 50 a 时还未达到平均生长量最大值的结果相近。

选用 4 种国内外常用的理论生长方程,拟合广东省枫香干材生物量的生长过程, Richards 方程在所有基础模型中效果最优,拟合结果最好。基于 Richards 方程的哑变量模型,哑变量模型则进一步提升了精度,更加科学合理地描述了广东省枫香干材生物量的生长过程。使用哑变量模型进一步分析不同起源和立地等级下枫香干材生物量的生长过程:干材生物量生长的最大年龄随着立地等级的不断降低而增加,数量成熟龄差距明显;在立地等级相同而起源不同时,干材生物量的最大连年生长量与

平均生长量不同,在高立地等级较时差异更大。以天然林高立地等级为例,其干材生物量的最大连年生长量(13.3 kg)和最大平均生长量(8.4 kg)分别在 23 a 和 38 a 处到达,此后生长逐渐缓慢。

本模型的解析木建模样本取自整个广东省,适用范围为整个广东省,但由于生长模型缺乏对立地条件的输入,所以即使哑变量模型能够提高模型精度,但 72% 的解释力也不是很理想,此模型在某一林分下使用可能会产生较大误差,若能增加建模样本数量,获得更多解析木,则模型的解释力会随之增强,预估精度将会有所提高,减小误差。

参考文献:

[1] 李海奎,雷渊才. 中国森林植被生物量和碳储量评估[M]. 北京:中国林业出版社,2010.

[2] 王维枫,雷渊才,王雪峰,等. 森林生物量模型综述[J]. 西北林学院学报,2008,23(2):58-63.

WANG W F, LEI Y C, WANG X F, *et al.* A review of forest biomass models[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 58-63. (in Chinese)

[3] 曾伟生,陈新云,蒲莹,等. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J]. 林业科学研究, 2018, 31(1): 66-71.

[4] 曹扬,陈云明,渠美. 陕西省森林碳储量、生产力及固碳释氧经济价值的动态变化[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2013, 41(5): 113-120.

CAO Y, CHEN Y M, QU M, *et al.* Dynamic change of carbon storage, production and economic value of carbon capture and oxygen release by forest in Shaanxi Province[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci. Ed., 2013, 41(5): 113-120. (in Chinese)

[5] 刘平,王玉涛,杨帆. 基于单木生长模型的森林动态模拟系统研究进展[J]. 世界林业研究, 2011, 24(5): 25-30.

[6] WEST P W. Tree and Forest Measurement[M]. Heidelberg: Springer, 2009.

[7] BURKHART H E. Tree and stand models in forest inventory [J]. The Finnish Forest Research Institute, Research Papers, 1992, 444: 164-170.

[8] MABVURIRA D, MIINA J. Individual-tree growth and mortality models for *Eucalyptus grandis* (Hill) Maiden plantations in Zimbabwe[J]. Forest Ecology and Management, 2002, 161(1): 231-245.

[9] 邓成,吕勇,雷渊才,等. 林木生长和收获模型研究进展与发展趋势[J]. 林业调查规划, 2010, 35(1): 7-11.

[10] SIRONEN S. Estimating individual tree growth with the k-nearest neighbour and k-most similar neighbour methods[J]. Silva Fennica, 2001, 35(4): 453-467.

[11] 刘微,李凤日. 落叶松人工林与距离无关的单木生长模型[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(5): 24-27.

LIU W, LI F R. Distance-independent individual-tree growth models of *Larix olgensis* plantation[J]. Jouranal of Northeast Forestry University, 2010, 38(5): 24-27. (in Chinese)

[12] 姜立春,杜书立. 基于非线性混合模型的东北兴安落叶松树高和直径生长模拟[J]. 林业科学研究,2012,25(1):11-16.

[13] 何云松,陈亚文,林勇. 重庆市石宝镇马尾松单木生长模型研究[J]. 四川林业科技,2013,34(5):56-60.

[14] 王新英,史军辉,刘茂秀. 塔里木河流域不同林龄天然胡杨林生物量及养分积累特征[J]. 西北林学院学报,2018,33(3):45-51.
WANG X Y, SHI J H, LIU M X . Nutrient acculation and biomass characteristics of different-aged natural forests of *Populus euphratica* in the Tarim River Basin[J]. Journal of Northwest Forestry University,2018,33(3):45-51. (in Chinese)

[15] 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]. 西北农林大学科技学报: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]. Jouranl of Northwest A&F University;Nat. Sci. Edi. ,2011,39(8):69-74. (in Chinese)

[16] 李春明. 混合效应模型在森林生长模型中的应用[J]. 林业科学,2009,45(4):131-138.
LI C M. Application of mixed effects models in forest growth model[J]. Scientia Silvae Sinicae,2009,45(4):131-138. (in Chinese)

[17] 赵俊卉. 长白山云冷杉混交林生长模型的研究[D]. 北京:北京林业大学,2010.

[18] 赵晓云. 柳杉单立木生长模型拟合的初步研究[J]. 四川林业科技,2004,25(1):55-58.

[19] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社,1993.

[20] 唐守正,郎奎健,李海奎. 统计和生物数学模型计算[M]. 北京:科学出版社,2009.

[21] PINHEIRO J, BATES D, DEBROY S, *et al.* _nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. R package version 3. 1-131,2017. <https://cran.r-project.org/package=nlme>.

[22] 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 a-nalysis of tree biomass equations[J]. Scientia Silvae Sinicae,2011,47(11):106-113. (in Chinese)

[23] BATES D MWATTS D G. Nonlinear Regression Analysis and Its Applications[M]. New York;Wiley,1988.

[24] LI H,ZHAO P. Improving the accuracy of tree-level aboveground biomass equations with height classification at a large regional scale[J]. Forest Ecology and Management,2013,289:153-163.

[25] 黄勇来. 枫香天然林及人工林群落特征和生长过程比较[J]. 福建林学院学报,2004,24(4):361-364.
HUANG Y L. Comparison between community characteris-tics and growth of natural forest and plantation of *Liquidam-bar formosana* hance[J]. Journal of Fujian College of Forest-ry,2004,24(4):361-364. (in Chinese)

[26] 陈波涛,刘铁柱,文弢,等. 贵州省枫香资源的生长状况与良种选育策略初探[J]. 贵州林业科技,2005,33(3):17-19.

[27] 国家林业局. 国家森林资源连续清查技术规定[S]. 2014.

[28] 周火明,贺勇,侯梅,等. 红安县枫香天然次生林生长规律研究[J]. 湖北林业科技,2015,44(4):17-20.

(上接第 60 页)

[14] HAN L M, YU J N, JU W F. Salt and drought tolerance of transgenic *Salvia miltiorrhiza* Bunge with the TaLEA1 gene [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology,2007,33(2):109-114.

[15] GUAN B, HU Y, ZENG Y, *et al.* Molecular characterization and functional analysis of a vacuolar Na⁺/H⁺ antiporter gene (HcNHX1) from *Halostachys caspica* [J]. Molecular Biology Reports,2011,38(3):1889-1899.

[16] 严一诺,孙淑斌,徐国华,等. 菊芋 Na⁺/H⁺ 逆向转运蛋白基因的克隆与表达分析[J]. 西北植物学报,2007,27(7):1291-1298.
YAN Y N,SUN S B,XU G H, *et al.* Cloning and analysis of a Na⁺/H⁺ antiporter gene in *Helianthus tuberosus* L. [J]. Ac-ta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2007,27(7):1291-1298. (in Chinese)

[17] 谢文华. 盐胁迫下梭梭幼苗生理生态响应机制的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2007.

[18] LU Y, LEI J Q, ZENG F J, *et al.* Effects of NaCl treatments on growth and eco- physiological characteristics of *Tamaria ramosissima* [J]. Journal of Desert Research,2014,34(6):1509-1515.

[19] 张爱琴,庞秋颖,阎秀峰. 碱蓬属植物耐盐机理研究进展[J]. 生态学报,2013,33(12):3575- 3583.
ZHANG A Q,PANG Q Y,YAN X F. Advances in salt-toler-ance mechanisms of *Suaeda* plants [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(12):3575-3583. (in Chinese)

[20] 麻莹,郭立泉,张淑芳,等. 盐碱胁迫下抗碱牧草碱地肤溶质积累、分布特点及有机酸的生理贡献[J]. 草业学报,2013,22(1):193-200.
MA Y, GUO L Q, ZHANG S F, *et al.* Solute accumulation and distribution traits of an alkali resistant forage plant *Kochia sieversiana* and physiological contribution of organic acids under salt and alkali stresses [J]. Acta Prataculturae Sinica,2013,22(1):193-200. (in Chinese)