

# 广东主要乡土阔叶树种单木生长模型构建\*

林丽平<sup>1</sup> 徐期瑚<sup>1</sup> 罗勇<sup>1</sup> 薛春泉<sup>1</sup> 张宁<sup>2</sup>

(1. 广东省林业调查规划院, 广东广州 510520; 2. 揭西县国有河寮林场, 广东揭阳 515400)

**摘要** 以广东主要乡土阔叶树种樟树 (*Cinnamomum camphora*)、木荷 (*Schima superba*) 和枫香 (*Liquidambar formosana*) 不同径阶各 90 株伐倒木为研究对象, 以年龄为自变量分起源进行建模, 并对其生长规律进行研究。结果表明: (1) 在现有立地水平下, 广东省樟树、木荷、枫香人工起源的胸径自然生长极值依次为 47.8、56.6 和 50.3 cm, 天然起源的胸径自然生长极值依次为 44.8、52.6 和 43.4 cm; 人工起源的树高自然生长极值依次为 17.0、21.5 和 20.3 m, 天然起源的树高自然生长极值依次为 13.3、20.1 和 18.1 m; 人工起源的材积自然生长极值依次为 1.437、2.161 和 3.308 m<sup>3</sup>, 天然起源的材积自然生长极值依次为 1.177、1.572 和 1.366 m<sup>3</sup>; 人工起源的胸径、树高和材积自然生长极值均比天然的要高。(2) 拟合出樟树人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Schumacher、Gompertz 和 Schumacher 模型, 樟树天然林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Richards 和 Logistic 模型; 木荷人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Schumacher、Richards 和 Logistic 模型; 木荷天然林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Schumacher 和 Logistic 模型; 枫香人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Logistic 和 Schumacher 模型; 枫香天然林胸径、树高和材积的最优生长模型均为 Logistic 模型。(3) 模型检验采用樟树、木荷、枫香的胸径、树高和材积最优模型的理论值与实际值进行线性拟合, 模型拟合效果都非常显著; 胸径的  $R^2$  值在 0.669 6~0.874 5 之间, 树高的  $R^2$  值在 0.580 5~0.873 7 之间, 材积的  $R^2$  值在 0.614 8~0.734 7 之间。

**关键词** 生长模型; 起源; 立木年龄

中图分类号: S758.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-2053 (2018) 03-0014-09

## Study on the Growth Models for Main Native Broadleaf Tree Species in Guangdong Province

LIN Liping<sup>1</sup> XU Qihu<sup>1</sup> LUO Yong<sup>1</sup> XUE Chunquan<sup>1</sup> ZHANG Ning<sup>2</sup>

(1. Guangdong Province Forestry Surveying and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. National Heshhe Forest Farm in Jiexi County, Jieyang, Guangdong 515400, China)

**Abstract** In order to establish the growth models of *Cinnamomum camphora*, *Schima superba* and *Liquidambar formosana*, the main native broadleaf tree species in Guangdong province were divided into natural forest and planted forest according to the origin. The growth models were built with age as the independent variable according to different diameter. The results showed that: (1) At the level of the existing site, the extreme DBH of *C. camphora*, *S. superba* and *L. formosana* in planted forest were 47.8, 56.6 and 50.3 cm, which in natural forest were 44.8, 52.6 and 43.4 cm; The extreme height of *C. camphora*, *S. superba* and *L. formosana* in planted forest were 17.0, 21.5 and 20.3 m, which in natural forest were 13.3, 20.1 and 18.1 m; The extreme

\* 基金项目: 广东省林业科技专项 (2015-02); 广东省林业科技创新平台建设项目 (2016CXPT03)。

第一作者: 林丽平 (1988 —), 女, 工程师, 主要从事林业碳汇计量与监测工作, E-mail: 239813728@qq.com。

volume of *C. camphora*, *S. superba* and *L. formosana* in planted forest were 1.437, 2.161 and 3.308 m<sup>3</sup>, which in natural forest were 1.177, 1.572 and 1.366 m<sup>3</sup>. The DBH, height and volume in planted forest were higher than natural forest. (2) The optimal growth fitting model of DBH, height and volume in *C. camphora* planted forest were Schumacher, Gompertz and Schumacher model, which in natural forest were Schumacher, Richards and Logistic model. The optimal growth fitting model of DBH, height and volume in *S. superba* planted forest were Schumacher, Richards and Logistic model, which in natural forest were Gompertz, Schumacher and Logistic model. The optimal fitting model of DBH, height and volume in *L. formosana* planted forest were Gompertz, Schumacher and Logistic model, which in natural forest were Logistic, Logistic, Logistic model. (3) Through the verification of diameter, height and volume of the optimal model of *C. camphora*, *S. superba* and *L. formosana*, we can see the that the fitting results between the theoretical value and the actual value were very significant, the DBH  $R^2$ s was between 0.669 6~0.874 5, the height  $R^2$ s was between 0.580 5~0.873 7, and the volume  $R^2$ s was between 0.614 8~0.734 7.

**Key words** growth model; origin; tree age

森林生态系统是陆地生态系统的主体，在维护全球气候系统、调节全球碳平衡、减缓大气温室气体浓度上升等方面具有不可替代的作用。林木的生长过程是指林木在一定立地条件下，随年龄变化而发生变化的生长规律。建立林木生长模型是研究林木生长规律的有效手段，林木生长模型是预测森林未来发展、评估生产潜力的定量依据<sup>[1]</sup>。单木生长模型是指用来描述单株林木生长过程的模型<sup>[2]</sup>，单木生长模型是最基础的模型，与林分和径阶生长模型相比，其适用性更广<sup>[3]</sup>。目前关于单木生长模型国内外已有大量研究<sup>[4-5]</sup>，常见树种的单木生长模型在实践中均能较好地应用，例如，雷相东等<sup>[6]</sup>研究了金沟岭林场的针阔混交林基于混合效应的单木断面积生长模型，李春明<sup>[7]</sup>研究了杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 林单木胸径生长量模型，胡焕香等<sup>[8]</sup>研究了湖北桂花林场檫木 (*Sassafras tzumu*) 次生林单木生长模型，茹正忠等<sup>[9]</sup>研究了中带及湖北省湿地松 (*Pinus elliottii*) 立地指数与树高生长模型，但有关广东乡土阔叶树种胸径、树高、材积的生长模型研究鲜见报道。樟树 (*Cinnamomum camphora*)、木荷 (*Schima superba*) 和枫香 (*Liquidambar formosana*) 是广东典型地带性乡土阔叶树种，也是广东森林碳汇工程项目主要造林树种。掌握了解广东主要乡土阔叶树种的生长特征及规律，并建立其胸径、树高和材积的生长模型，对科学经营、深入推广和培育广东乡土阔叶树种优质木材具有重要意义。本研究以广东樟树、木荷和枫香各 90 株共 270 株伐倒木为研究对象，按最优建模方案建立其胸径、树高和材积生长模型，为制定最佳森林经营决策，预测森林未

来的变化趋势和效益评估提供技术支撑和理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广东全省境内，北回归线横贯而过，东南濒临南海，西北有南岭，地势北高南低，水热条件优越，地理坐标为 109° 45' ~117° 20' E，20° 09' ~25° 31' N，面积 17.97 万 km<sup>2</sup>，其中林地面积 10.87 万 km<sup>2</sup>。该区属于东亚季风区，是全国光、热和水资源最丰富的地区之一，年平均气温 21.8 °C，最冷月 1 月平均气温为 13.3 °C，最热月 7 月平均气温为 28.5 °C，降水充沛，年平均降水量 1 789.3 mm，年太阳总辐射量在 4 200~5 400 MJ/m<sup>2</sup> 之间。广东省地带性森林植被的主要类型为中亚热带常绿阔叶林、南亚热带常绿阔叶林和少量热带季雨林。主要地带性土壤类型为砖红壤、赤红壤和红壤等。研究区及采样地分布情况见图 1。

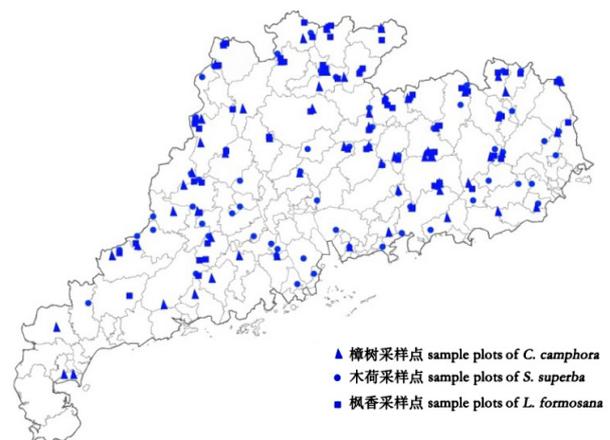


图 1 研究区及采样地分布情况  
Fig.1 Study reign and sample plots

## 1.2 试验材料

建模样本来自采集时间为2013年及2016年的广东省樟树、木荷、枫香3个树种的伐倒木数据,以广东省第8次连清样地中的樟树、木荷和枫香3个树种分布情况为基础数据,每个树种按分布情况分别采伐90株样木(其中40株解析木),3个树种共270株(解析木120株)。每个树种取样按2、4、6、8、12、16、20、26、32、38 cm共10个径阶分配,采用单株伐倒法进行伐倒木测定。测定因子包括所处的立地条件(海拔、坡位、坡向、坡度)以及树种的起源、胸径、树高、枝下高、冠幅和坐标等。样木年龄的调查包括两个部分:有进行树干解析的,以树干年轮分析0号盘(0.3 m)处的年轮数为该样木的年龄;未进行树干解析的样木,观测伐桩(0.1 m)上的年轮数,并结合调查种植年限推测样木年龄,其中剔除1株枫香年龄异常数据。各样木调查情况

见表1所示。

## 1.3 材积的计算

有关材积计算按《立木生物量建模样本采集技术规程(LY/T 2259-2014)》<sup>[10]</sup>中“伐倒木树高等长区分改进求积法”有关公式进行计算。

$$V = \pi/40000 \times (d_0^2/4 + d_{0.5}^2/2 + 3d_1^2/4 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 + d_6^2 + d_7^2 + d_8^2 + 5d_9^2/6) \times H/10 \cdots (1)$$

式中,  $d_i$  ( $i = 0, 0.5, 1, 2, \dots, 9$ ) 分别表示0、0.5/10、1/10、2/10、 $\dots$ 、9/10树高处的直径(cm),  $H$ 为树高(m),  $V$ 为材积( $m^3$ ),  $\pi$ 取3.14159。

## 1.4 基本模型的确定及评价

研究数据采用Microsoft excel 2007进行处理,模型参数估计使用R软件的nlme过程进行计算,运用该函数算法来解决非线性最小二乘问题,本研究选用以下7个生长函数<sup>[11-14]</sup>。

Logistic 函数:

表 1 3 个树种建模数据统计

Tab.1 Three tree species modeling data statistics

树种 Species	起源 Origin	变量 Variables	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	标准差 SD	样木株数 Number of trees
樟树 <i>C. camphora</i>	人工 Planted	年龄 Age/a	2	41	14.516	10.807	31
		胸径 DBH/cm	2	40	14.048	11.206	31
		树高 Height/m	1.7	17.6	8.400	4.029	31
	天然 Natural	材积 Volume/ $m^3$	0.001	0.789	0.142	0.214	31
		年龄 Age/a	3	58	18.641	12.158	59
		胸径 DBH/cm	1.9	41	14.763	10.145	59
木荷 <i>S. superba</i>	人工 Planted	树高 Height/m	1.9	16.6	9.606	3.722	59
		材积 Volume/ $m^3$	0.001	0.924	0.159	0.228	59
		年龄 Age/a	4	31	15.140	7.827	43
	天然 Natural	胸径 DBH/cm	2.1	38.9	12.874	9.098	43
		树高 Height/m	2.5	18.7	10.154	4.213	43
		材积 Volume/ $m^3$	0.001	0.905	0.128	0.195	43
枫香 <i>L. formosana</i>	人工 Planted	年龄 Age/a	4	45	18.213	11.213	47
		胸径 DBH/cm	1.7	51.5	15.730	12.179	47
		树高 Height/m	3.02	23.1	10.254	4.834	47
	天然林 Natural	材积 Volume/ $m^3$	0.001	1.803	0.224	0.367	47
		年龄 Age/a	2	41	14.719	9.124	32
		胸径 DBH/cm	2.2	39.6	13.341	10.435	32
天然林 Natural	树高 Height/m	3.2	21	11.252	5.503	32	
	材积 Volume/ $m^3$	0.001	1.043	0.178	0.288	32	
	年龄 Age/a	1	61	17.018	11.470	57	
	胸径 DBH/cm	1.8	43.5	14.642	10.370	57	
天然林 Natural	树高 Height/m	3	26.6	11.780	5.178	57	
	材积 Volume/ $m^3$	0.001	1.331	0.190	0.284	57	

$$y = a / (1 + b \times \exp(-c \times t)) + \varepsilon \dots\dots\dots(2)$$

Gompertz 函数:

$$y = a \times \exp(-b \times \exp(-c \times t)) + \varepsilon \dots\dots\dots(3)$$

Richards 函数:

$$y = a \times (1 - \exp(-b \times t))^c + \varepsilon \dots\dots\dots(4)$$

Korf 函数:

$$y = a \times \exp(-b \times t)^{-c} + \varepsilon \dots\dots\dots(5)$$

Mitscheerlich 函数:

$$y = a \times (1 - b \times \exp(-c \times t)) + \varepsilon \dots\dots\dots(6)$$

Schumacher 函数:

$$y = a \times \exp(-b / t) + \varepsilon \dots\dots\dots(7)$$

Weibull 函数:

$$y = a \times (1 - \exp(-(t / b)^c)) + \varepsilon \dots\dots\dots(8)$$

式中: 方程(2)~(8)为理论方程, 其中:  $a$ 表示林木生长极值参数,  $b$ 表示与初始值有关的参数(或生长速率参数),  $c$ 表示生长速率参数(或与同化作用幂指数相关参数),  $t$ 为年龄,  $y$ 为林木在 $t$ 年时的胸径(cm)、树高(m)或材积( $m^3$ )。

为了检验生长方程的拟合效果, 拟合优度( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、平均偏差(ME)、平均绝对偏差(MAE)对模型的拟合效果进行评价, 模型评价公式如下:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \dots\dots\dots(9)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / (n - p)} \dots\dots\dots(10)$$

$$ME = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n \dots\dots\dots(11)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n |\hat{y}_i - y_i| / n \dots\dots\dots(12)$$

式中:  $y_i$ 是样本某因子的实测值,  $\hat{y}_i$ 是 $y_i$ 的无偏估计值,  $\bar{y}$ 是样本实测值的平均值,  $n$ 是样本数量,  $p$ 是参数的个数。我们通常认为 RMSE、ME、MAE 越接近 0,  $R^2$  的值越接近 1, 模型拟合效果越好。

## 2 结果与分析

### 2.1 胸径、树高、材积的生长方程模拟及模型评价

2.1.1 胸径生长方程模拟及评价 从表 2 分析可以看出, 樟树、木荷、枫香人工起源胸径的最优生长方程依次为 Schumacher、Schumacher 和 Gompertz 方程; 天然起源的最优生长方程依次为 Gompertz、Gompertz 和 Logistic 方程。各因子调整后的拟合优度均在 0.669 5~0.874 4 之间, 平均偏差、平均绝对偏差、均方根误差较小, 模型的拟合效果较好。各因子的参数估计值表明: 在现有立地水平下, 广东省樟树、木荷、枫香人工起源的胸径的自然生长极值依次为 47.8、56.6 和 50.3 cm, 天然起源的胸径的自然生长极值依次为 44.8、52.6 和 43.4 cm。可以看出, 人工林的胸径生长极值均大于天然林的生长极值。

2.1.2 树高生长方程模拟及评价 从表 3 分析可以看出, 樟树、木荷、枫香人工起源树高的最优生长方程依次为 Gompertz、Richards 和 Logistic 方程; 天然起源的最优生长方程依次为 Richards、Schumacher 和 Logistic 方程。各因子调整后的拟合优度均在 0.580 5~0.873 5 之间, 平均偏差、平均绝对偏差、均方根误差较小, 模型的拟合效果较好。各因子的决定系数参数估计值表明: 在现有立地水平下, 广东省樟树、木荷、枫香人工起源的树高的自然生长极值依次为 17.0、21.5 和 20.3 m, 天然起源的树高的自然生长极值依次为 13.3、20.1 和 18.1 m。可以看出, 人工林的树高生长极值均大于天然林的生长极值。

2.1.3 材积生长方程模拟及评价 从表 4 分析可以看出, 樟树、木荷、枫香人工起源材积的最优生长方程依次为 Schumacher、Logistic 和 Schumacher 方程; 天然起源的最优生长方程均为 Logistic 方程。各因子调整后的拟合优度均在 0.614 2~0.731 5 之间, 平均偏差、平均绝对偏差、均方根误差较小, 模型的拟合效果较好。各因子的决定系数参数估计值表明: 在现有立地水平下, 广东省樟树、木荷、枫香人工起源的材积的自然生长极值依次为 1.437、2.161 和 3.308  $m^3$ , 天然起源的材积的自然生长极值依次为 1.177、1.572 和 1.366  $m^3$ 。可以看出, 人工林的材积生长极值均大于天然林的生长极值。

表 2 胸径最优生长模型拟合  
Tab. 2 Optimal growth model fitting of DBH

树种 Species	起源 Origin	模型形式 Model form	$a$	$b$	$c$	$R^2$	ME	MAE	RMSE
樟树 <i>C. camphora</i>	人工 Planted	Schumacher	47.805 2	15.202 6		0.802 9	0.412 5	3.702 3	5.060 5
	天然 Natural	Gompertz	44.844 2	2.607 1	0.045 8	0.669 5	-0.044 0	4.233 9	5.935 0
木荷 <i>S. superba</i>	人工 Planted	Schumacher	56.622 1	22.199 3		0.723 5	0.618 1	3.833 5	4.842 1
	天然 Natural	Gompertz	52.616 5	3.510 2	0.057 6	0.806 6	-0.017 0	3.824 4	5.476 9
枫香 <i>L. formosana</i>	人工 Planted	Gompertz	50.311 3	3.480 5	0.063 5	0.798 8	-0.028 3	3.071 6	4.840 0
	天然 Natural	Logistic	43.398 9	11.665 8	0.099 5	0.874 4	-0.073 7	2.531 2	3.743 0

表 3 树高最优生长模型拟合  
Tab. 3 Optimal growth model fitting of height

树种 Species	起源 Origin	模型形式 Model form	$a$	$b$	$c$	$R^2$	ME	MAE	RMSE
樟树 <i>C. camphora</i>	人工 Planted	Gompertz	16.998 8	1.666 9	0.065 4	0.729 9	-0.014 0	1.619 0	2.167 7
	天然 Natural	Richards	13.320 5	0.105 4	1.197 1	0.690 7	-0.007 1	1.660 0	2.106 3
木荷 <i>S. superba</i>	人工 Planted	Richards	21.472 6	0.033 2	0.747 6	0.580 5	-0.001 1	2.234 3	2.795 9
	天然 Natural	Schumacher	20.119 6	9.785 5		0.617 6	0.111 0	2.329 5	3.022 1
枫香 <i>L. formosana</i>	人工 Planted	Logistic	20.299 3	7.697 6	0.167 3	0.873 5	0.025 1	1.436 9	2.023 3
	天然 Natural	Logistic	18.091 5	5.003 1	0.160 0	0.748 8	0.000 4	2.062 7	2.642 5

表 4 材积最优生长模型拟合  
Tab. 4 Optimal growth model fitting of volume

树种 Species	起源 Origin	模型形式 Model form	$a$	$b$	$c$	$R^2$	ME	MAE	RMSE
樟树 <i>C. camphora</i>	人工 Planted	Schumacher	1.437 3	37.097 2		0.713 8	0.003 1	0.065 3	0.116 7
	天然 Natural	Logistic	1.176 8	50.429 7	0.090 7	0.614 2	-0.004 2	0.084 6	0.143 8
木荷 <i>S. superba</i>	人工 Planted	Logistic	2.160 7	325.379 9	0.157 8	0.685 0	-0.002 3	0.060 2	0.112 4
	天然 Natural	Logistic	1.572 4	96.469 8	0.122 6	0.682 6	-0.010 4	0.128 1	0.211 4
枫香 <i>L. formosana</i>	人工 Planted	Schumacher	3.307 5	49.672 5		0.727 9	-0.000 6	0.086 4	0.152 7
	天然 Natural	Logistic	1.366 1	58.525 6	0.109 9	0.731 5	-0.012 0	0.083 7	0.149 7

## 2.2 模型的检验

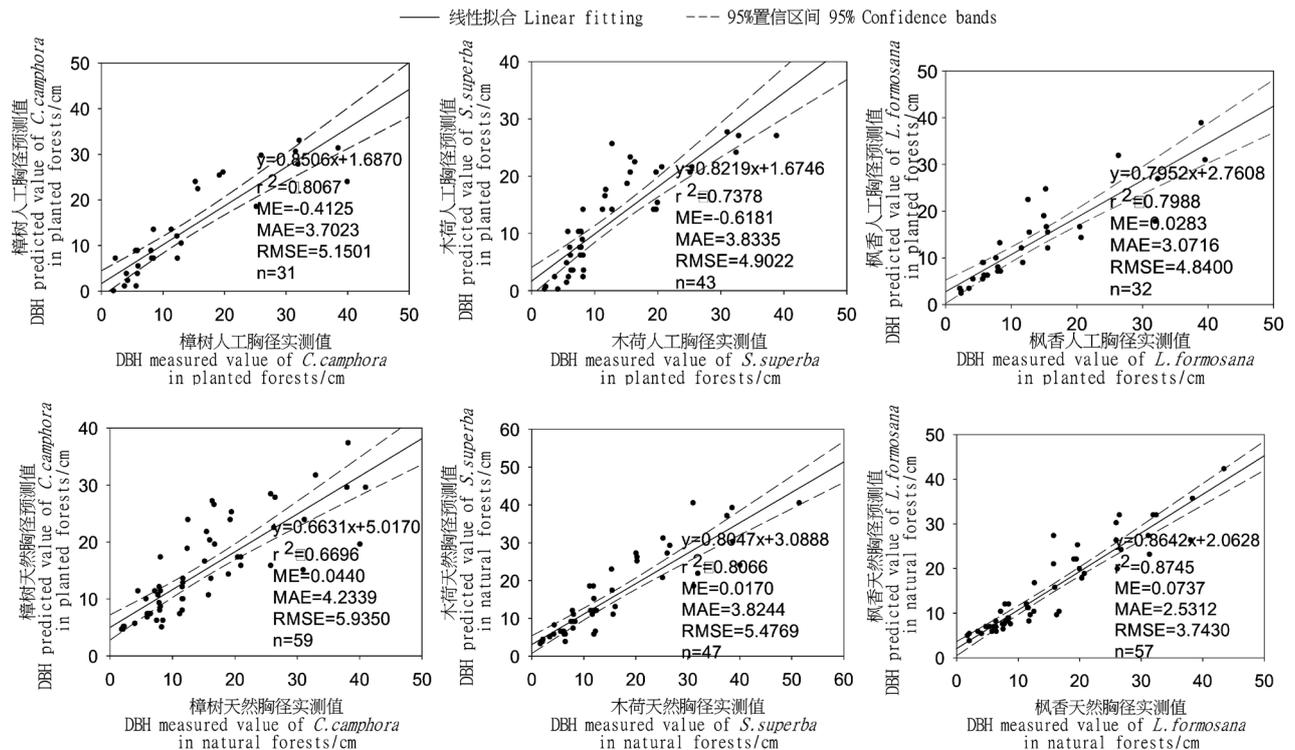
模型的检验采用樟树、木荷、枫香的胸径、树高和材积最优模型的理论值与实际值进行线性拟合(表 5),最后利用  $R^2$ 、ME、MAE、RMSE 进行预测精度比较。验证结果(图 2)分析表明,与实际观测值相比,模型拟合的胸径、树高和材积结果都非常显著。胸径的  $R^2$  值在 0.669 6~0.874 5 之间,ME 值在 -0.618 1~0.073 7

之间,MAE 值在 2.531 2~4.233 9 之间, RMSE 值在 3.743 0~5.935 0 之间;树高的  $R^2$  值在 0.580 5~0.873 7 之间,ME 值在 -0.111 0~0.014 0 之间,MAE 值在 1.436 9~2.329 5 之间, RMSE 值在 2.023 3~3.056 3 之间;材积的  $R^2$  值在 0.614 8~0.734 7 之间;ME 值在 -0.003 1~0.012 0 之间,MAE 值在 0.060 2~0.128 1 之间, RMSE 值在 0.112 4~0.211 4 之间。

表 5 胸径、树高和材积实测值与理论值线性拟合检验结果

Tab. 5 Linear fitting between the measured value and the theoretical value of DBH, height and volume

树种 Species	变量 Variables	起源 Origin	$R^2$	ME	MAE	RMSE
樟树 <i>C. camphora</i>	胸径 DBH	人工 Planted	0.806 7	-0.412 5	3.702 3	5.150 1
		天然 Natural	0.669 6	0.044 0	4.233 9	5.935 0
	树高 Height	人工 Planted	0.730 0	0.014 0	1.619 0	2.167 7
		天然 Natural	0.690 8	0.007 1	1.660 0	2.106 3
	材积 Volume	人工 Planted	0.714 1	-0.003 1	0.065 3	0.118 8
		天然 Natural	0.614 8	0.004 2	0.084 6	0.143 8
木荷 <i>S. superba</i>	胸径 DBH	人工 Planted	0.737 8	-0.618 1	3.833 5	4.902 2
		天然 Natural	0.806 6	0.017 0	3.824 4	5.476 9
	树高 Height	人工 Planted	0.580 5	0.001 1	2.234 3	2.795 9
		天然 Natural	0.621 5	-0.111 0	2.329 5	3.056 3
	材积 Volume	人工 Planted	0.685 2	0.002 3	0.060 2	0.112 4
		天然 Natural	0.685 2	0.010 4	0.128 1	0.211 4
枫香 <i>L. formosana</i>	胸径 DBH	人工 Planted	0.798 8	0.028 3	3.071 6	4.840 0
		天然 Natural	0.874 5	0.073 7	2.531 2	3.743 0
	树高 Height	人工 Planted	0.873 7	-0.025 1	1.436 9	2.023 3
		天然 Natural	0.748 8	-0.000 4	2.062 7	2.642 5
	材积 Volume	人工 Planted	0.728 0	0.000 6	0.086 4	0.155 3
		天然 Natural	0.734 7	0.012 0	0.083 7	0.149 7



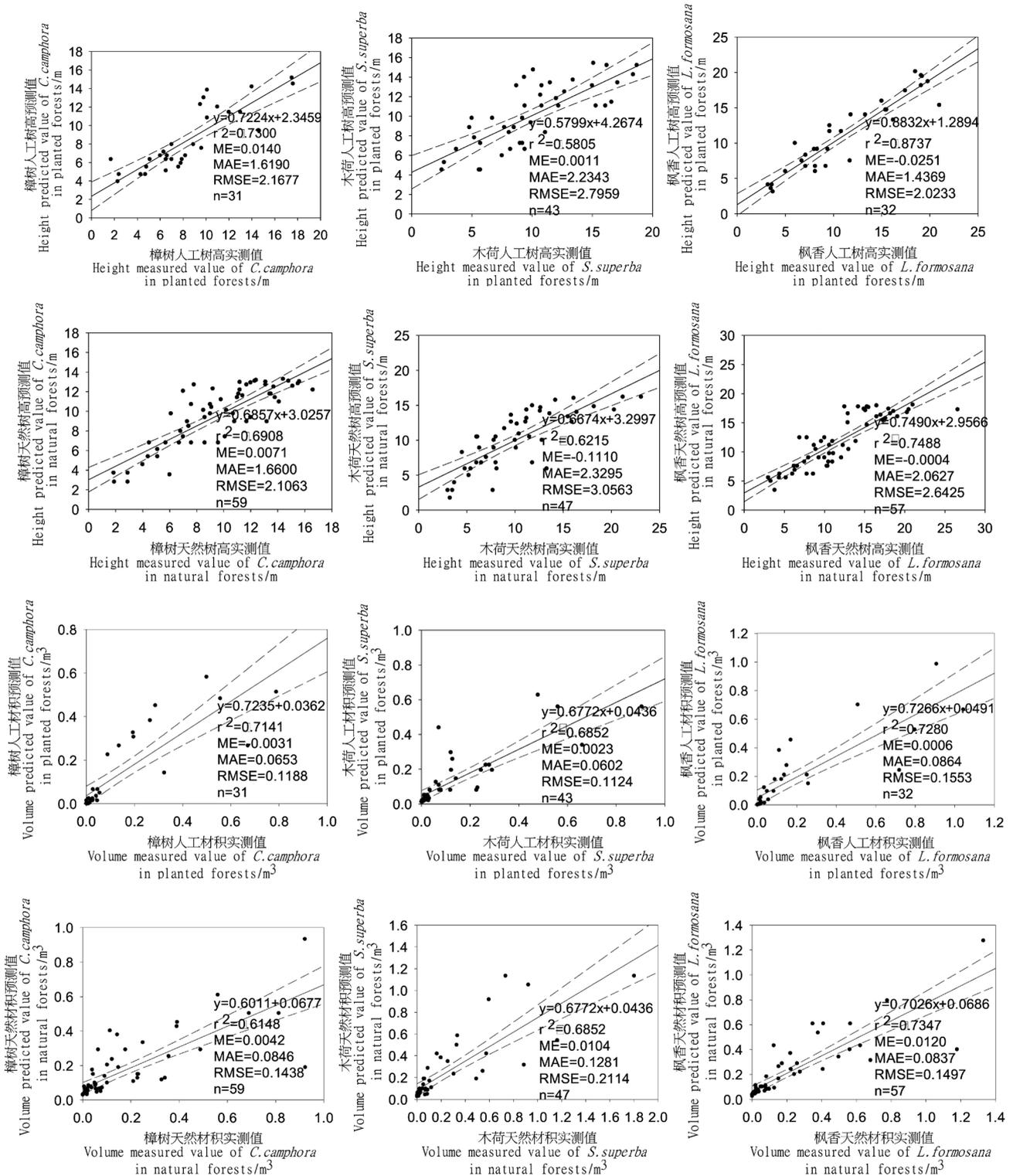


图 2 人工和天然起源胸径、树高和材积最优模型评估

Fig.2 Optimal DBH, height and volume model assessment diagram in planted and natural origin forests

### 3 结论与讨论

#### 3.1 在现有立地水平下，广东省樟树、木荷、枫

香人工起源的胸径的自然生长极值依次为 47.8、56.6 和 50.3 cm，天然起源的胸径的自然生长极值依次为 44.8、52.6 和 43.4 cm；人工起源的树高

的自然生长极值依次为 17.0、21.5 和 20.3 m，天然起源的树高的自然生长极值依次为 13.3、20.1 和 18.1 m；人工起源材积的自然生长极值依次为 1.437、2.161 和 3.308 m<sup>3</sup>，天然起源的材积的自然生长极值依次为 1.177、1.572 和 1.366 m<sup>3</sup>。这与龙汉利<sup>[15]</sup>、李沛<sup>[16]</sup>和周火明等<sup>[17-18]</sup>的研究结果略有差异，原因可能是由于地理差异、解析木数量的大小以及解析木最大年龄的大小影响了模型的结果。人工林的胸径、树高和材积自然生长极值要比天然林的要高。因此，在后续的森林经营管理中，通过提高土壤肥力，加强人工经营措施等，可获得更高的单株立木生长量。

3.2 拟合出樟树人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Schumacher、Gompertz 和 Schumacher 模型，其表达式依次为

$$\begin{aligned} D &= 47.8052 \times \exp(-15.2026 / t), \\ H &= 16.9988 \times \exp(-1.6669 \times \exp(-0.0654 \times t)), \\ V &= 1.4373 \times \exp(-37.0972 / t); \end{aligned}$$

樟树天然林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Richards 和 Logistic 模型，其表达式依次为

$$\begin{aligned} D &= 44.8442 \times \exp(-2.6071 \times \exp(-0.0458 \times t)), \\ H &= 13.3205 \times (1 - \exp(-0.1054 \times t))^{1.1971}, \\ V &= 1.1768 / (1 + 50.4297 \times \exp(-0.0907 \times t)); \end{aligned}$$

木荷人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Schumacher、Richards 和 Logistic 模型，其表达式依次为

$$\begin{aligned} D &= 56.6221 \times \exp(-22.1993 / t), \\ H &= 21.4726 \times (1 - \exp(-0.0332 \times t))^{0.7476}, \\ V &= 2.1607 / (1 + 325.3799 \times \exp(-0.1578 \times t)); \end{aligned}$$

木荷天然林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Schumacher 和 Logistic 模型，其表达式依次为：

$$\begin{aligned} D &= 52.6165 \times \exp(-3.5102 \times \exp(-0.0576 \times t)), \\ H &= 20.1196 \times \exp(-9.7855 / t), \\ V &= 1.5724 / (1 + 96.4698 \times \exp(-0.1226 \times t)); \end{aligned}$$

枫香人工林胸径、树高和材积的最优生长模型分别为 Gompertz、Logistic 和 Schumacher 模型，其表达式依次为：

$$\begin{aligned} D &= 50.3113 \times \exp(-3.4805 \times \exp(-0.0635 \times t)), \\ H &= 20.2993 / (1 + 7.6976 \times \exp(-0.1673 \times t)), \\ V &= 3.3075 \times \exp(-49.6725 / t); \end{aligned}$$

枫香天然林胸径、树高和材积的最优生长模型均为 Logistic 方程，其表达式依次为：

$$\begin{aligned} D &= 43.3989 / (1 + 11.6658 \times \exp(-0.0995 \times t)); \\ H &= 18.0915 / (1 + 5.0031 \times \exp(-0.1600 \times t)); \\ V &= 1.3661 / (1 + 58.5256 \times \exp(-0.1099 \times t)). \end{aligned}$$

3.3 模型的检验采用樟树、木荷、枫香的胸径、树高和材积最优模型的理论值与实际值进行线性拟合，模型拟合的胸径、树高和材积结果都非常显著。胸径的  $R^2$  值在 0.669 6 ~ 0.874 5 之间，树高的  $R^2$  值在 0.580 5 ~ 0.873 7 之间，材积的  $R^2$  值在 0.614 8 ~ 0.734 7 之间。

3.4 建立广东主要乡土阔叶树种樟树、木荷、枫香的胸径、树高和材积的最优生长模型，可以揭示其生长动态变化规律，对其制定最佳经营决策，预测其未来变化趋势并进行效益评估，都具有重要的现实意义。在建立最优模型时，本研究只建立了单一立地条件的生长模型，在以后的研究中，需根据立地指数分级分别建立不同立地指数的生长模型，进一步提高模型的精度。

3.5 本研究成果可对广东主要乡土阔叶树种单株胸径、树高和材积生长模型构建提供参考，宜在建模样本的变量幅度范围内应用。在实际应用中由于受到如立地条件、土壤条件、经营措施、经济条件或其它人为因素等影响，结果可能出现差异，所以应因地制宜地对模型进行调整与分析。

## 参考文献

- [1] 刘四海, 曾伟生. 马尾松宏观尺度单木生长模型研究[J]. 林业资源管理, 2017(2): 28-33.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 李文馨, 刘世波. 包括气候变量的大尺度柏木胸径单木生长模型[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(3): 74-77.
- [5] 孙拥康, 李际平, 吕勇. 西洞庭湖区杉木林分相对树高曲

- 线模型的研究[J].中南林业科技大学学报, 2012, 32 (9): 47-50.
- [6] 雷相东, 李永慈, 向玮.基于混合模型的单木断面积生长模型[J].林业科学, 2009, 45 (1): 74-80.
- [7] 李春明.基于两层次线性混合效应模型的杉木林单木胸径生长量模型[J].林业科学, 2012, 48(3): 66-73.
- [8] 胡焕香, 余济云, 李俊, 等.湖北桂花林场檫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.
- [9] 茹正忠, 龙应忠, 童方平.中帶及湖北省湿地松立地指数与树高生长模型[J].广东林业科技, 1995, 11(4): 43-45.
- [10] 国家林业局.立木生物量建模样本采集技术规程: LY/T 2259-2014[S].北京: 中国标准出版社, 2014.
- [11] 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.
- [12] 段爱国, 张建国, 童书振.6种生长方程在杉木人工林分直径结构上的应用[J].林业科学研究, 2003, 16(4): 423-429.
- [13] 彭舜磊, 王得祥.火地塘林区铁杉生长规律研究[J].西北农林科技大学学报自然科学版, 2008, 36(4): 83-88.
- [14] Pukkala T, Lähde E, Laiho O.Using optimization for fitting individual-tree growth models for uneven-aged stands[J].European Journal of Forest Research, 2011, 130(5): 829-839.
- [15] 龙汉利, 梁国平, 辜云杰, 等.四川香樟人工林生长特性研究[J].四川林业科技, 2011, 32(4): 1-4.
- [16] 李沛.木荷人工林常用数表以及经济成熟的研究[D].福州: 福建农林大学, 2015.
- [17] 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.
- [18] 周火明, 毛燕, 向莉, 等.鄂东北枫香混交林生长规律研究[J].华东森林经理, 2017, 31(1): 37-40.