

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.011

广东省针叶树种蓄积量和生物量 生长模型研究

黄金金^{1,2}, 刘晓彤^{1,2}, 张逸如^{1,2}, 李海奎^{1,2*}

(1. 中国林业科学研究院资源信息研究所, 北京 100091; 2. 国家林业和草原局森林经营与生长模拟重点实验室, 北京 100091)

摘要: [目的] 量化表征森林蓄积量和生物量与年龄的关系, 为预测森林蓄积量和生物量提供依据。[方法] 基于广东省 3 个针叶树种 5 期连清数据, 通过保留木林分平均胸径和林龄之间的关系, 分别以生长潜力和生长速度分级、是否考虑竞争、分步和联合建模共 8 种组合, 构建林分蓄积量和生物量生长模型, 并评价模型拟合优度; 以独立的 4 期连清数据为验证样本, 评价模型的适用性。[结果] (1) 不同种模型系确定系数皆在 0.980 以上, 平均预估误差在±1% 以内, 总体相对误差在±0.5% 以内。综合模型拟合和预测效果, 以生长速度分级、不考虑竞争的分步模型最优, 竞争对模型的适用性影响不大。(2) 最优模型蓄积量和生物量的估计误差最大分别为 10.36% 和 10.22%, 模型适用性较好, 4 期估计误差表现为中期高于首末两期。(3) 马尾松生长潜力最大, 杉木最小, 对杉木的估计效果优于马尾松和湿地松。(4) 立地质量等级越高, 生长量的极值越大, 达到最高峰所需年限也更短; 同一立地质量下马尾松生长量最大, 其次为湿地松, 杉木最小。[结论] 含参数分级和林分特征的蓄积量和生物量模型, 可以反映立地质量对广东省针叶树种蓄积量和生物量预测的影响, 为精确估测森林储量提供方法学支持, 也为其他地区林分水平生长模型的构建提供借鉴。

关键词: 生长模型; 蓄积量; 生物量; 竞争; 分级; 广东省

中图分类号: S718.55

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)03-0093-10

森林蓄积量和生物量是反映森林资源水平的基本指标, 精准估测森林蓄积量和生物量, 可以为林业资源管理决策提供科学依据^[1]。国内外关于蓄积量和生物量模型的研建主要集中于单木水平, 而林分水平的较少, 尚未形成我国林业行业标准^[2]。林分水平的生长模型能直接预测林分蓄积量和生物量, 减少单木的误差积累^[3-4]。目前估计区域尺度蓄积量和生物量的建模方法有多种, 应用较多的一是以异速生长方程为基础, 根据林分总胸高断面面积、林分优势高、林分平均高等估计林分以及区域的地上生物量^[5-6]; 二是生物量转换因子法, 张会儒等^[7]将全国森林类型按照林分优势树种归并为 9 类, 构建了全国主要树种组林木与材积相容的

生物量回归模型; 三是通过单木模型推算, 傅煜等^[8]通过 Monte Carlo 法反复模拟由单木生物量模型推算区域尺度地上生物量, 估计了江西省杉木地上总生物量, 秦立厚等^[9]分析量化单木生物量模型中各种不确定性来源, 估计区域地上生物量。

大量研究表明, 林木胸径与林木年龄之间存在紧密的生长关系, 为建立有关的胸径生长模型奠定了基础^[10-14]。曹磊^[15-16]和龙时胜等^[17]采用 Richards 生长方程拟合树木直径与年龄的生长关系, 模型的拟合优度较高, 其中龙时胜等^[17]利用模型估计林分平均年龄时, 拟合年龄与真实年龄的绝对误差最大值为 2 年, 相对误差最大值为 8.2%, 两者间的差异性较小, 说明利用林木多期直径估计异龄林林

收稿日期: 2021-10-21 修回日期: 2021-12-31

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金 (CAFYBB2018ZB006); 国家自然科学基金项目 (31770676、31872704)

作者简介: 黄金金, 硕士研究生。主要研究方向: 林业统计与生物数学模型。E-mail: Huang202098@163.com

* 通讯作者: 李海奎, 研究员。主要研究方向: 林业统计与生物数学模型。E-mail: lihk@jifrit.ac.cn

分平均年龄具有较高的可行性。大量研究^[18-20]认为,林分蓄积量、生物量生长主要受树木自身大小、竞争因子和立地条件的影响。

本研究以广东省 3 个针叶树种 155 块样地为对象,利用 5 期连清数据,基于林分平均胸径与年龄的生长关系估计样地林龄,进而建立林分水平的蓄积量和生物量生长模型,以体现生长潜力的参数 *a* 分级和与生长速度有关的参数 *b* 分级、考虑林分竞争与否、分步建模(一元非线性回归)和联合建模(非线性误差变量联立方程组)共 8 种组合,构建模型系,评价模型的拟合优度和预测效果,筛选最优模型,以期实现对广东省针叶林蓄积量和生物量的准确估计。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

广东省位于 20°13'~25°31' N 和 109°39'~117°19' E,处于东亚季风区,包括了热带、中亚和南亚热带 3 种气候,年均气温 22.3℃,月降水量约 313 mm,年日照时数约 1 746 h,太阳辐射总量约 4 200~5 400 MJ·m⁻²,生长期水热充足,利于植被生长。地貌类型复杂多样,以低山、丘陵为主,地势北高南低。

1.2 数据来源

建模数据:从广东省第 5—9 次连清数据中,选择马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)、湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.) 3 个针叶树种,筛选

5 次清查中皆存在且保留木大于 5 株的样地,共 155 块(马尾松林 91 块、湿地松林 16 块、杉木林 48 块),样地分布见图 1。固定样地为 0.0667 hm²,样木调查因子包括样木号、胸径,单株材积按广东省地方一元材积表^[21]计算获得,单株生物量按行业标准生物量模型^[22-24]获得。为避免株数差异造成样地蓄积量和生物量的差异,本研究中样地蓄积量和生物量为样地内 5 期保留木的蓄积量和生物量算数平均值,统计量如表 1 所示。

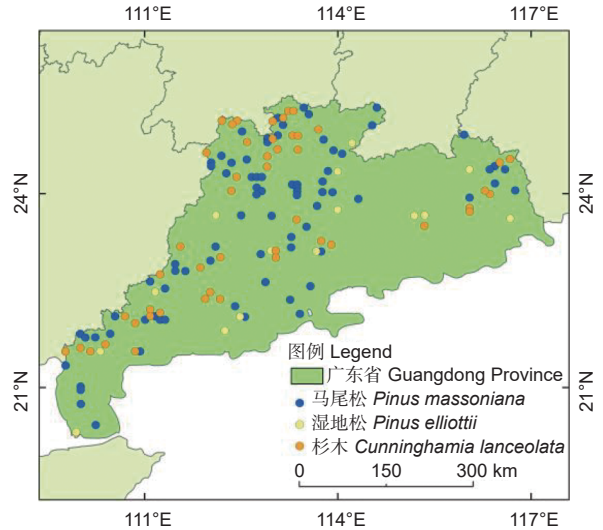


图 1 建模数据固定样地分布示意图

Fig. 1 Distribution map of fixed sample plots of modeling data

样地胸径采用林分平均胸径:

$$D_g = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i^2} \quad (1)$$

表 1 建模数据统计量

Table 1 Modeling data statistics

树种 Tree species	统计量 Statistics	1997年	2002年	2007年	2012年	2017年
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	胸径 DBH/cm	10.2±3.2	13.4±3.9	15.6±4.2	17.8±4.5	20.4±5.0
	蓄积量 Volume/dm ³	43.7±51.3	83.0±75.0	120.5±92.8	164.3±112.6	228.3±143.1
	生物量 Biomass/kg	42.8±46.2	79.7±69.1	113.9±85.8	154.0±105.1	213.3±134.8
湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	胸径 DBH/cm	8.2±2.0	12.1±2.5	14.7±3.1	17.0±3.5	19.2±4.1
	蓄积量 Volume/dm ³	19.2±13.5	54.5±30.1	91.1±47.6	132.5±66.7	183.7±99.6
	生物量 Biomass/kg	21.5±12.8	53.8±27.2	85.0±40.9	120.5±56.9	164.3±85.2
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	胸径 DBH/cm	8.8±2.8	11.7±3.3	13.5±3.6	15.0±3.7	16.7±4.1
	蓄积量 Volume/dm ³	33.1±42.4	66.4±66.5	93.8±82.6	121.2±91.2	159.0±112.7
	生物量 Biomass/kg	22.7±25.1	43.0±38.7	59.2±47.9	75.2±52.7	97.2±65.0

注:数据为平均值±标准差。

Note: The data is average ± standard deviation.

式中, D_g 为林分平均胸径, n 为样木株数, d_i 为样木胸径。

验证数据: 选取 2002 年达到起测胸径、存在

于 4 次连清中, 且保留木大于 5 株的样地, 共 126 块, 其中马尾松 59 块、湿地松 22 块、杉木 45 块。各统计量如表 2 所示。

表 2 验证数据统计量

Table 2 Verification data statistics

树种 Tree species	统计量 Statistics	2002年	2007年	2012年	2017年
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	胸径 DBH/cm	9.8±3.5	12.4±4.0	14.9±4.6	18.0±5.4
	蓄积量 Volume/dm ³	37.1±43.0	65.6±61.1	102.2±84.9	162.6±120.7
	生物量 Biomass/kg	37.3±39.4	64.0±55.8	97.2±77.9	152.5±111.0
湿地松 <i>Pinus elliottii</i>	胸径 DBH/cm	8.4±1.7	12.1±2.8	15.4±3.6	18.8±4.4
	蓄积量 Volume/dm ³	19.2±11.9	54.1±33.5	101.8±56.5	169.1±94.5
	生物量 Biomass/kg	21.2±11.3	54.1±30.2	94.2±48.6	151.8±80.9
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	胸径 DBH/cm	8.8±2.6	11.2±2.9	13.2±3.2	15.2±3.3
	蓄积量 Volume/dm ³	29.9±26.8	54.7±42.5	81.4±57.4	116.1±73.3
	生物量 Biomass/kg	20.7±16.4	36.0±25.1	51.9±33.5	72.3±42.4

注: 数据为平均值±标准差。
Note: The data is average ± standard deviation.

2 方法

2.1 模型构建

采用 Mitscherlich 理论生长方程, 拟合 5 期林分平均胸径和相应时间间隔之间的关系; 以 Richards 理论生长方程, 拟合样地平均蓄积量和生物量与相应时间间隔之间的关系。

$$D_{gij} = a_1 * (1 - e^{-b_1 * (age_i + ad_j)}) \quad (i = 1, 2, \dots, 155; j = 1, 2, \dots, 5) \quad (2)$$

$$V_{ij} = a_2 * (1 - e^{-b_2 * (age_i + ad_j)})^{c_2} \quad (i = 1, 2, \dots, 155; j = 1, 2, \dots, 5) \quad (3)$$

$$BIO_{ij} = a_3 * (1 - e^{-b_3 * (age_i + ad_j)})^{c_3} \quad (i = 1, 2, \dots, 155; j = 1, 2, \dots, 5) \quad (4)$$

式中: D_{gij} 、 V_{ij} 、 BIO_{ij} 分别为第 i 个样地第 j 期的样地平均胸径、蓄积量和生物量, age_i 是第 i 个样地的初期林龄, ad_j 为第 j 期与初期 (1997 年) 的时间间隔, a_1 、 a_2 、 a_3 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c_2 、 c_3 为参数。

基于上述胸径、蓄积量和生物量 3 个生长方程, 分别以体现生长潜力的参数 a 分级和与生长速度有关的参数 b 分级、考虑竞争与否、分步或联合建模等 8 种组合, 构建模型系 (表 3)。

2.1.1 含林木竞争的胸径生长方程 对于林分水

平模型来说, 与树冠有关的竞争指数能较好地反映树木间的竞争关系, 因此选用基于交角且对象木与竞争木距离小于 10 m 的竞争指数 ju_{10} , 详见惠刚盈等^[25]。由于林木竞争对单木胸径的生长具有较大的影响, 但对林分平均胸径的影响并不算太大, 为解释林木竞争对林分生长的影响, 故将竞争指数引入了胸径生长方程:

$$D_{gij} = a_1 * (1 - e^{-b_1 * (e^{ju_{10ij}^{b_0}}) * (age_i + ad_j)}) \quad (5)$$

式中: b_0 为竞争指数参数, ju_{10ij} 为第 i 个样地第 j 期的竞争指数 (样地竞争指数为样地内所有保留木竞争指数的算数平均值), 其余同上。

2.1.2 参数分级 为了兼顾区域尺度上立地质量的多样性以提高模型在大尺度范围内的适用性, 对参数 a 或 b 分级代替立地质量的差异, 以参数 a 分级为例:

将式 (2) 作为立地质量划分等级的分级方程, 已知林分平均胸径 D_{gij} 和时间间隔 ad_j , 以样地号和树种号构成的唯一编号作为参数 a 和 age 的哑变量, 树种作为参数 b 的哑变量, 拟合方程 (6)。将参数 a_1 从低到高排序, 并按照有序样本聚类分为 6 类。

$$D_{gij} = a_i * (1 - e^{-b_{1k} * (age_i + ad_j)}) \quad (6)$$

式中: a_1 ($i = 1, 2, \dots, 155$) 是第 i 个样地的参数,

表 3 8 种模型系
Table 3 Eight model systems

模型 Models	方程 Equation	模型 Models	方程 Equation
Model 1	$D_{gij} = a1_m * (1 - e^{-b1_k * (age_i + ad_j)})$ $V_{ij} = a2_m * (1 - e^{-b2_k * (age_i + ad_j)})^{c2_k}$ $BIO_{ij} = a3_m * (1 - e^{-b3_k * (age_i + ad_j)})^{c3_k}$	Model 5	$D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (age_i + ad_j)})$ $V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k}$ $BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k}$
Model 2	$D_{gij} = a1_m * (1 - e^{-b1_k * (e^{ju10_{ij}})^{b_0} * (age_i + ad_j)})$ $V_{ij} = a2_m * (1 - e^{-b2_k * (age_i + ad_j)})^{c2_k}$ $BIO_{ij} = a3_m * (1 - e^{-b3_k * (age_i + ad_j)})^{c3_k}$	Model 6	$D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (e^{ju10_{ij}})^{b_0} * (age_i + ad_j)})$ $V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k}$ $BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k}$
Model 3	$\begin{cases} D_{gij} = a1_m * (1 - e^{-b1_k * (age_i + ad_j)}) \\ V_{ij} = a2_m * (1 - e^{-b2_k * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \\ BIO_{ij} = a3_m * (1 - e^{-b3_k * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \end{cases}$	Model 7	$\begin{cases} D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (age_i + ad_j)}) \\ V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \\ BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \end{cases}$
Model 4	$\begin{cases} D_{gij} = a1_m * (1 - e^{-b1_k * (e^{ju10_{ij}})^{b_0} * (age_i + ad_j)}) \\ V_{ij} = a2_m * (1 - e^{-b2_k * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \\ BIO_{ij} = a3_m * (1 - e^{-b3_k * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \end{cases}$	Model 8	$\begin{cases} D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (e^{ju10_{ij}})^{b_0} * (age_i + ad_j)}) \\ V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \\ BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \end{cases}$

$b1_k$ ($k = 1, 2, 3$ 时分别代表马尾松、湿地松和杉木) 是第 k 个树种的参数, 其余同上。

2.1.3 分步建模 以 Model 5 为例, 基于式 (2), 以参数 a 区别树种, 以参数 b 区别立地质量差异, 以唯一编号作为初期林龄 age (未知) 的哑变量, 根据 5 期林分平均胸径 D_{gij} 和时间间隔 ad_j 之间的关系来估计样地初期林龄 age_i , 见式 (7)。将 age_i 作为式 (3) 和 (4) 的自变量, 以参数 c 区别树种, 其余参数处理同上, 分别拟合样地平均蓄积量 V_{ij} 和生物量 BIO_{ij} 与林龄 age_i 的关系, 即式 (8) 和 (9)。

$$D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (age_i + ad_j)}) \quad (7)$$

$$V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \quad (8)$$

$$BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \quad (9)$$

式 (7) ~ (9) 中: $a1_k$ 、 $a2_k$ 、 $a3_k$ ($k = 1, 2, 3$) 分别为胸径、蓄积量和生物量生长方程中的第 k 个树种的参数, $b1_m$ 、 $b2_m$ 、 $b3_m$ ($m = 1, 2, \dots, 6$) 分别为胸径、蓄积量和生物量生长方程中的第 m 个立地质量等级的参数, $c2_k$ 、 $c3_k$ ($k = 1, 2, 3$) 分别为蓄积量和生物量生长方程中的第 k 个树种的参数, 其余同上。

2.1.4 联合建模 为了比较建模方法对生长模型拟合优度和估测精度的差异, 除分步建模法外, 本研究还采用了联合建模法, 以 Model 7 为例。由于林龄未知, 且 3 个方程中年龄参数 age 是一致的,

基于式 (2) ~ (4), 参数处理同分步建模法, 根据林分平均胸径、蓄积量和生物量与时间间隔之间的关系, 采用非线性误差变量联立方程组法同时拟合 3 个方程, 即式 (10)。

$$\begin{cases} D_{gij} = a1_k * (1 - e^{-b1_m * (age_i + ad_j)}) \\ V_{ij} = a2_k * (1 - e^{-b2_m * (age_i + ad_j)})^{c2_k} \\ BIO_{ij} = a3_k * (1 - e^{-b3_m * (age_i + ad_j)})^{c3_k} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 模型评价

考虑各模型参数不同, 为了检验 8 种模型系的拟合效果, 采用以下 4 项模型评价指标: 确定系数 R^2 、估计值标准误差 SEE 、平均预估误差 MPE 、总体相对误差 TRE , 公式详见文献^[26]。

2.3 模型验证

(1) 确定立地质量等级和林龄 (以参数 b 分级为例)

根据胸径生长方程反推林龄计算公式, 如下:

$$page_{ij} = \frac{-\ln(1 - \frac{D_{gij}}{a1_k})}{b1_m * (e^{ju10_{ij}})^{b_0}} \quad (i = 1, 2, \dots, 126; j = 1, 2, \dots, 4) \quad (11)$$

式中, $page_{ij}$ 为第 i 个样地第 j 期的样地林龄, 当不引入竞争指数时 $b_0 = 0$, 其余同上。

由于验证样本所在样地的立地质量等级 m 和初期林龄皆未知, 需先确定立地质量等级, 再由式 (11) 求出林龄, 才可估计蓄积量和生物量。当立地质量分级时, 至少需要两期胸径才能确定样地的立地质量等级, 薛春泉等^[27] 发现长周期确定的

等级比短周期稳定, 因此本研究采用期初 (2002年) 和期末 (2017年) 2期胸径来确定样地的立地质量等级, 确定方法如下:

$$OSC_i = \min |page_{i4} - page_{i1} - 15| \quad (12)$$

式中, $page_{i1}$ 和 $page_{i4}$ 为第*i*个样地期初和期末的样地林龄, 该方法的直观解释就是使推算的2002年和2017年林龄间隔与实际林龄间隔 (15年) 相差最小的立地质量等级, 即为该样地的立地质量等级。

根据式 (12) 确定样地的立地质量等级后可知参数 b_m , 再由式 (11) 计算初期 (2002年) 林龄 age , 则2007年、2012年、2017年时样地的林龄分别由初期林龄相应加上5、10、15年。

(2) 模型估测效果评价指标

由蓄积量和生物量生长方程估计样地平均蓄积量和生物量, 样地总蓄积量和总生物量可由平均蓄积量和生物量乘以株数获得, 按式 (13) ~ (14) 计算各树种4个时期下区域尺度蓄积量和生物量估计的总相对误差 EV 和 $EBIO$ 。

$$EV = \frac{\sum_{i=1}^n (PV_i - V_i) * N_i}{\sum_{i=1}^n V_i * N_i} \quad (13)$$

$$EBIO = \frac{\sum_{i=1}^n (PBIO_i - BIO_i) * N_i}{\sum_{i=1}^n BIO_i * N_i} \quad (14)$$

式中: n 为样地数, N_i 为第*i*个样地的保留木株数, PV_i 、 V_i 分别为第*i*个样地平均蓄积量的估计值和真实值, $PBIO_i$ 、 BIO_i 分别为第*i*个样地平均生物量的估计值和真实值。

2.4 生长量函数

连年生长量函数 $Z(t)$ 为总生长过程曲线 $y(t)$ 的

一阶导数, 为树木在某年的实际生长速度, 即连年生长量随年龄 t 变化的函数。Richards 生长方程的连年生长量方程为:

$$Z(t) = \frac{dy(t)}{dt} = a \cdot b \cdot c \cdot (1 - e^{-bt})^{c-1} \cdot e^{-bt} \quad (15)$$

平均生长量函数 $\theta(t)$ 用来表示树木在某一时刻的平均生长速度, 总生长过程曲线 $y(t)$ 除以年龄 t 则可得平均生长量依年龄变化的函数。Richards 生长方程的平均生长量方程为:

$$\theta(t) = \frac{y(t)}{t} = \frac{a}{t} \cdot (1 - e^{-bt})^c \quad (16)$$

3 结果

3.1 模型拟合

表4列出了8种模型系的拟合评价指标。整体上看, 8种模型系的3个生长方程拟合确定系数 R^2 皆达0.980以上, 总相对误差 TRE 在 $\pm 0.5\%$ 以内, 平均预估误差 MPE 在 $\pm 1\%$ 以内, 拟合效果良好, 但各模型间的4项指标差异不大。当控制建模方法和立地质量分级的参数相同、仅比较竞争影响时, 引入竞争指数对模型拟合优度的提升没有明显的作用, 如Model 5和Model 6拟合指标间差异甚微、Model 2较Model 1的蓄积量和生物量生长方程的拟合效果甚至出现了一定程度的下降; 类似地, 可以发现参数 b 分级模型的拟合优度较参数 a 分级模型稍好; 当控制竞争影响和分级参数相同时, 相对于分步建模, 采用含度量误差的联立方程组时, 蓄积量和生物量生长方程的拟合效果有所提高, 但是胸径生长方程的拟合效果稍差。

表4 模型拟合评价指标

Table 4 Model fitting evaluation index

模型 Models	胸径 DBH				蓄积量 Volume				生物量 Biomass			
	R^2	SEE/cm	TRE/%	MPE/%	R^2	SEE/dm ³	TRE/%	MPE/%	R^2	SEE/kg	TRE/%	MPE/%
Model 1	0.984	0.77	0.00	0.36	0.985	13.42	-0.54	0.83	0.987	10.97	-0.08	0.79
Model 2	0.985	0.75	0.00	0.35	0.982	14.54	-0.71	0.90	0.985	11.93	-0.27	0.85
Model 3	0.981	0.74	-0.35	0.35	0.986	12.74	-0.90	0.79	0.989	10.32	-0.48	0.74
Model 4	0.981	0.75	-0.20	0.35	0.986	12.67	-0.64	0.78	0.989	10.28	-0.14	0.74
Model 5	0.985	0.74	0.00	0.35	0.986	12.83	-0.11	0.79	0.988	10.84	0.11	0.78
Model 6	0.985	0.74	0.00	0.35	0.986	13.01	-0.12	0.80	0.987	11.02	0.10	0.79
Model 7	0.981	0.74	-0.01	0.35	0.987	12.27	0.15	0.76	0.989	10.26	0.31	0.73
Model 8	0.982	0.73	-0.04	0.34	0.988	12.15	0.00	0.75	0.989	10.17	0.17	0.73

3.2 模型验证

8 种蓄积量和生物量生长方程的模型验证指标分别如图 2 和图 3 所示。总体而言, 各模型的预测效果都较好, 从图 2 可知, 区域尺度蓄积量估计误差最大的仅有 17.62%, 说明蓄积量估计精度可达 82.38% 以上; 从图 3 可知, 区域尺度生物量估计误差最大的仅有 12.51%, 则生物量估计精度可达 87.49% 以上。8 个模型中以基于参数 b 分级的分步模型 (即 Model 5 和 Model 6) 预测效果最优, 其对 3 个树种 4 期蓄积量和生物量的估计误

差较其余模型稍小, 且在不同树种和不同时期的表现都较为稳定, 说明模型适用性较好。以 Model 5 为例, 3 个树种中对杉木的估计效果稍好, 估计误差最大为 -5.25%, 而估计马尾松和湿地松时误差最大为 10.00% 和 10.36%。8 个模型对 3 个针叶树种的 4 期区域尺度蓄积量和生物量估计的误差, 大都表现出中期误差高于首末 2 期, 初期估计精度较高, 但明显出现低估的现象, 伴随着样地林龄的增大, 中期出现高估且精度稍低, 但到末期 (2017 年) 时估计误差降低, 精度有所提高。

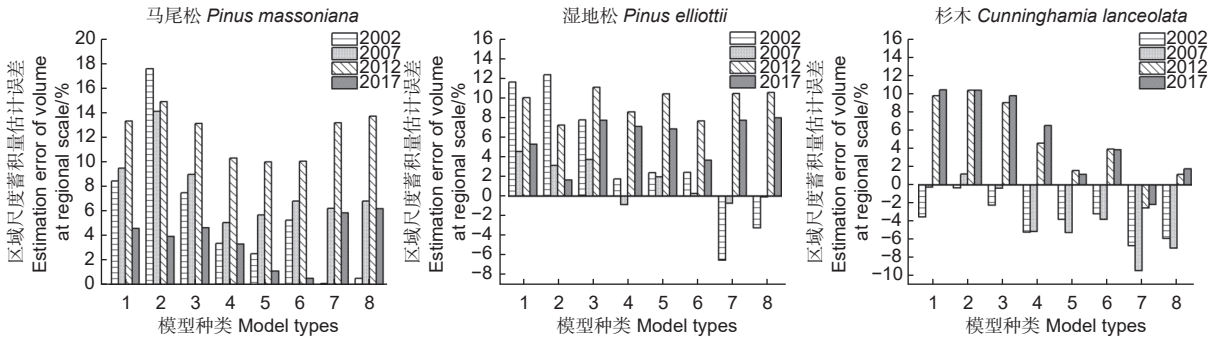


图 2 8 种蓄积量生长模型的区域尺度估计误差

Fig. 2 Regional-scale estimation errors of eight volume growth models

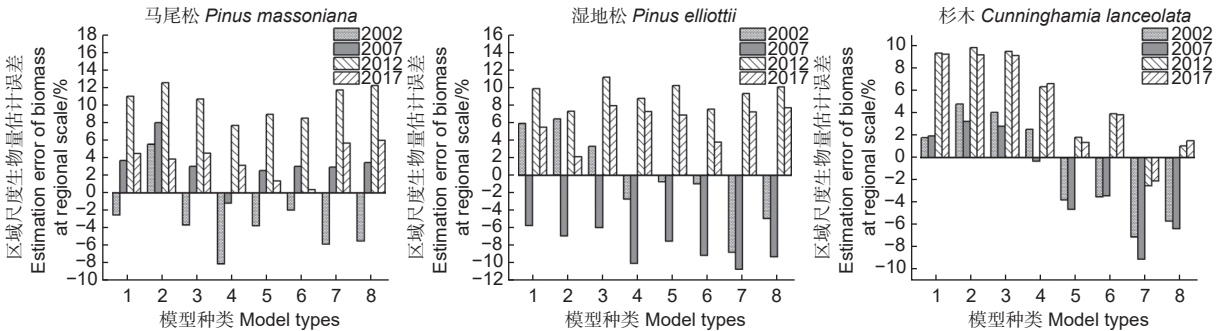


图 3 8 种生物量生长模型的区域尺度估计误差

Fig. 3 Regional-scale estimation errors of eight biomass growth models

3.3 最优模型

综合 8 个模型的拟合效果 (表 4) 和验证效果 (图 2、图 3), Model 5 最优, Model 6 次之。表 5 和表 6 列出了基于参数 b 分级的分步模型的模型参数估计值。由表 5 可知, 马尾松胸径、蓄积量和生物量的生长潜力均为最大, 杉木最小, 其中马尾松蓄积量和生物量的生长极限值可达湿地松和杉木的 2 倍以上。由表 6 可知, 立地质量等级越高, 树木的生长速度越快, 但是各等级下的林分蓄

积量生长速度均为最快, 其次为生物量, 胸径生长速度最慢。

3.4 蓄积量和生物量生长量函数

基于参数 b 分级不考虑竞争的分步建模 (即 Model 5) 最优, 为节约篇幅, 选择样地立地质量等级占比较多的等级 2、3 和 4, 绘制 Model 5 下蓄积量、生物量的连年生长量和平均生长量的关系曲线图 (图 4)。蓄积量和生物量的连年生长量、平均生长量均显示出立地质量越好, 生长量能达到

表 5 树种哑变量参数和竞争指数参数

Table 5 Dummy variable parameters of tree species and competition index parameters

模型 Models	因变量 Dependent variables	参数a Parameter a			参数c Parameter c			b0
		1	2	3	1	2	3	
Model 5	胸径 DBH	58.15	41.57	36.59	—	—	—	—
	蓄积量 Volume	1 827.54	853.40	761.84	2.709 1	2.857 1	2.926 5	—
	生物量 Biomass	1 892.76	760.24	460.70	2.596 8	2.546 1	2.593 4	—
Model 6	胸径 DBH	57.97	41.75	36.44	—	—	—	-0.281 0
	蓄积量 Volume	1 745.73	836.66	745.45	2.738 6	2.924 5	3.030 5	—
	生物量 Biomass	1 784.94	739.66	447.88	2.631 5	2.615 2	2.695 1	—

注: — 表示该方程中没有这个参数; 1、2、3分别表示马尾松、湿地松和杉木。

Note: — indicates that there is no such parameter in the equation. 1, 2 and 3 represent *Pinus massoniana*, *Pinus elliottii* and *Cunninghamia lanceolata*, respectively.

表 6 基于参数 b 分级的立地质量等级哑变量参数

Table 6 Site quality grade dummy variable parameters based on parameter b classification

模型 Models	因变量 Dependent variables	参数b哑变量估计值 Estimated values of dummy variable of parameter b					
		1	2	3	4	5	6
Model 5	胸径 DBH	0.007 7	0.012 6	0.018 0	0.024 9	0.035 3	0.052 7
	蓄积量 Volume	0.010 3	0.016 7	0.023 9	0.032 8	0.047 0	0.072 9
	生物量 Biomass	0.009 3	0.015 1	0.021 7	0.029 8	0.042 8	0.066 5
Model 6	胸径 DBH	0.007 8	0.012 9	0.018 3	0.025 4	0.035 6	0.054 2
	蓄积量 Volume	0.010 6	0.017 2	0.024 6	0.033 8	0.048 3	0.076 6
	生物量 Biomass	0.009 7	0.015 6	0.022 5	0.031 0	0.044 3	0.070 6

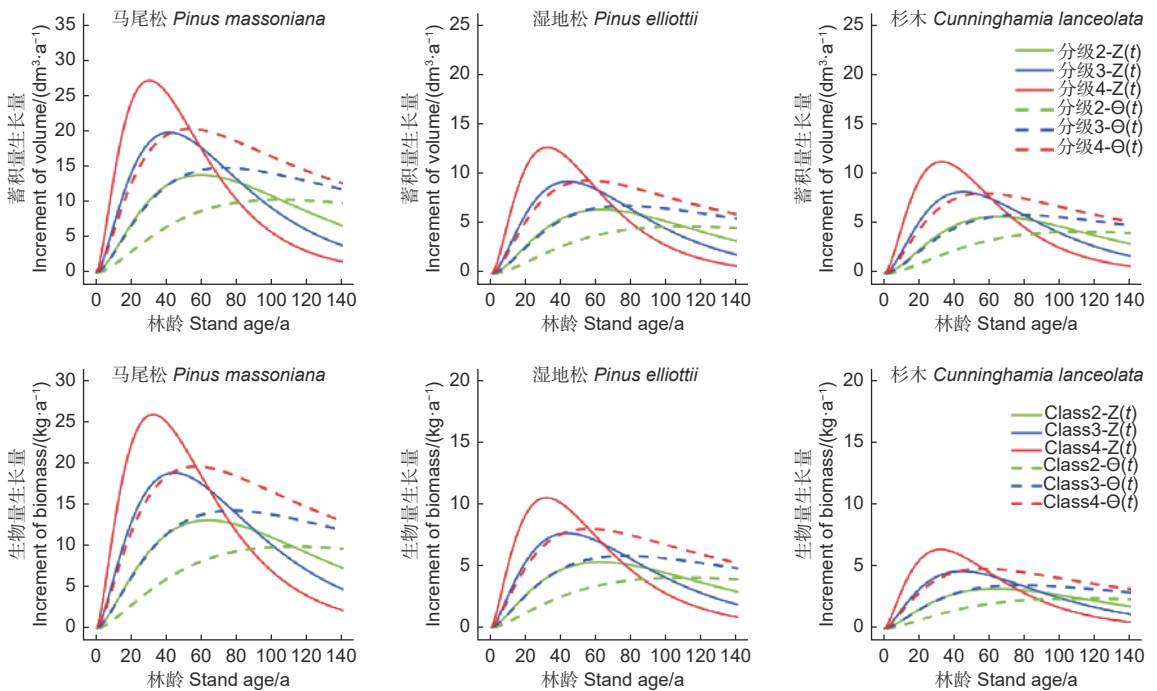


图 4 等级 2~4 的连年生长量和平均生长量

Fig. 4 Annual increment and average increment from class 2 to class 4

的极限值越大,且所需年限更短,各相邻等级间的差异随着等级的增加而逐渐加大。对于不同的树种来说,同一立地质量等级下的生长量均为马尾松>湿地松>杉木,生长量达到最大时的林龄为杉木>湿地松>马尾松,各树种间生长量差异随着等级的增加而逐渐加大。立地质量等级越高,平均生长量和连年生长量曲线相交时的样地年龄越小。

4 讨论

处理多树种问题是建立林分模型的一个难点,通常是将组成树种进行分组或合并^[28]。曾伟生等^[2]建立了东北林区林分水平的三储量模型,筛选出 10 种主要森林类型并引入哑变量体现差异后,蓄积量模型、生物量模型和碳储量模型的确定系数分别从 0.945、0.805、0.839 提高到 0.959、0.949、0.951。本研究对存在多个组成树种的样地按优势树种分属不同的样地,并构建哑变量区别广东省的 3 个主要针叶树种,从表 5 和图 4 可知,各树种间的生长潜力和生长量有较大的差异,表现为马尾松>湿地松>杉木,其中马尾松远超 2 倍左右,这是因为建模数据(表 1)中马尾松保留木大多为天然林,而杉木的起源大多为人工林,Zeng 等^[29]研究结果表明同一直径的单木地上生物量估计值在不同起源上存在一定差异,天然林的生物量大于人工林。此外,在同一立地质量下,不同树种间生长量的差异主要是由于树种特性的差异引起的,不同树种对同一区域的生长适应程度并不一致,马尾松可能更适宜广东的立地条件。各树种间区域尺度蓄积量和生物量的预测精度也有较大的差异,对杉木的估计效果较马尾松和湿地松稍好,可能原因是不同树种的建模样本量和检验样本量不一致,另一个可能的原因是不同的树种有不同最优的基础生长模型,如吴宏伟等^[30]研究发现,Schumacher 模型是湿地松林分蓄积量模型的最优基础模型。对于估计误差,大都表现出中期高于首末两期的现象,一方面可能是由于采用首末两期胸径数据来确定验证样本所在样地的立地质量等级,相较于中期,推算的各样地立地质量等级更贴合期初和期末时的实际情况,因此用于林龄确定、估计蓄积量和生物量时,3 个生长方程中反映立地质量差异的参数更为稳定,模型的预测效果会更好。另一方面随着林龄增大,蓄积量和生物量逐渐积累,公式(13)和(14)分母变大,这可能使后期的估计误差降低,估计效果更好。

非线性独立回归估计法的估计效果优于含度量误差变量联立方程组法,因为分步建模时,3 个方程都是独立拟合给出参数的最优估计,而采用联立方程组法联立求解时,由于方程中林龄一致的约束,为保证方程之间的联系,得到更优化的参数估计,各方程较独立拟合时都有了不同的变化。从拟合评价指标(表 4)可以看出,对比分步建模法,采用联立方程组法可以提高蓄积量和生物量生长方程的拟合效果,但是却降低了胸径生长方程的拟合优度,导致林分年龄的估计精度有所下降,使用验证数据集检验模型的适用性时,由于林分年龄未知,确定首期林龄成为关键的一步,所以胸径生长方程的拟合效果直接影响了验证时的估计精度。由于林分大部分为混交林,具有年龄不一、树种结构关系复杂等特点,因此探究林木间竞争作用对林分结构和生长变化的影响至关重要。一般而言,模型中的参数个数越多,拟合效果会更优,但是引入竞争指数后对于模型的拟合效果(表 4)和估计精度(图 2、3)没有明显的提高。虽然从理论上讲包含树木空间位置的竞争指数对预测林木生长更有效,但 Biging 等^[31]研究发现与距离无关的竞争指数比与距离有关的竞争指数预测单木生长更好,臧灏等^[32]探究人工杉木林胸径生长对竞争的响应时也发现对比于与距离有关的单木竞争指标,采用与距离无关的单木竞争指标的生长模型估计精度更高。竞争指数表现的预测能力依赖于树种、立地条件等因素,这些因素的变化会导致不同类型的竞争指数表现不一致,且不具有决定性^[33-34]。本研究引入竞争指数对林分模型的适用性没有明显影响,可能与选取的竞争指数有关,也有可能和立地的限制有关,因为在较大范围内密度对林分蓄积量、生物量的影响不大^[35]。

模型的应用范围和模型的预测精度相关联,当模型应用于大尺度的森林资源测算时,若忽略立地质量的差异必然导致模型估计结果的不准确。立地质量是指在某一立地上既定森林或其他植被类型的生产潜力^[35],既定立地上的不同树种和相同的树种在不同的立地上的立地质量都是有差异的。本研究为体现广东省样地间的立地质量多样性,分别对与生长潜力有关的参数 a 和与生长速度有关的参数 b 进行分级,结果表明以参数 b 分级体现立地质量的差异优于参数 a 分级。薛春泉等^[26]研究发现生长速度分级的胸径生长方程与地上生物量的异速生长方程构成的模型系,不仅拟合效果达到了 0.95

以上,区域尺度生物量的估计误差也下降到了8%以内,这与本研究参数 b 分级模型预测效果较好具有一致性。另外,林分蓄积量和生物量的生长量随着立地质量的提高而增加,说明立地质量等级越高,森林蓄积量和生物量密度越大。立地质量与森林生产力相关,不同的立地质量代表着不同的生产力,立地质量越高,林分的生长速率越快,达到最大生长量所需的年限也更短。赵菡等^[36]用优势木树高等级代替立地等级估计江西省不同立地质量等级的马尾松林生物量,研究发现不同立地等级的地上生物量均值估计结果随着立地质量等级的升高而增大,这与本研究结果一致。

5 结论

本研究以广东省3种针叶优势树种为研究对象,利用1997—2017年的5期森林资源连续清查数据,基于林分平均胸径、蓄积量和生物量与相应调查时间间隔的关系建立林分生长模型,实现了对广东省蓄积量和生物量的准确估计。本研究结论如下:(1)基于与生长速度有关的参数 b 分级不考虑竞争的分步模型最优,引入竞争指数与否差异不大。(2)最优模型的区域尺度蓄积量和生物量估计误差最大分别为10.36%和10.22%,模型的适用性较好,4期的估计误差表现为中期高于首末两期。(3)不同树种中以马尾松的生长潜力最大,杉木最小,但是模型对杉木的估计效果较马尾松和湿地松稍好。(4)立地质量等级越高,生长量极值越大,达到最高峰所需年限也更短;同一立地质量下马尾松的生长量最大,其次为湿地松,杉木最小。

参考文献:

- [1] 欧光龙,胥辉.森林生物量模型研究综述[J].西南林业大学学报:自然科学,2020,40(1):1-11.
- [2] 曾伟生,孙乡楠,王六如,等.东北林区10种主要森林类型的蓄积量、生物量和碳储量模型研建[J].北京林业大学学报,2021,43(3):1-8.
- [3] 张雄清,张建国,段爱国.基于单木水平和林分水平的杉木兼容性林分蓄积量模型[J].林业科学,2014,50(1):82-87.
- [4] Chave J, Condit R, Aguilar S, et al. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences, 2004, 359(1443): 40-420.
- [5] 罗云建,张小全,王效科,等.森林生物量的估算方法及其研究进展[J].林业科学,2009,45(8):129-134.
- [6] 董利虎,李凤日.三种林分生物量估算方法的比较[J].应用生态学报,2016,27(12):3862-3870.
- [7] 张会儒,唐守正,王泰瑜.与材积兼容的生物量模型的建立及其估计方法研究[J].林业科学研究,1999,12(1):53-59.
- [8] 傅煜,雷渊才,曾伟生.单木生物量模型估计区域尺度生物量的不确定性[J].生态学报,2015,35(23):7738-7747.
- [9] 秦立厚,张茂震,钟世红,等.森林生物量估算中模型不确定性分析[J].生态学报,2017,37(23):7912-7919.
- [10] 杨惠滨,国庆喜.地形与竞争因子对红松胸径与年龄关系的影响[J].生态学报,2016,36(20):6487-6495.
- [11] Zeide B. Analysis of growth equations[J]. Forest Science, 1993, 39(3): 594-616.
- [12] Takahashi K, Homma K, Vetrova V P, et al. Stand structure and regeneration in a Kamchatka mixed boreal forest[J]. Journal of Vegetation Science, 2001, 12(5): 627-634.
- [13] Stewart B J, Neily P D, Quigley E J, et al. Selected Nova Scotia old-growth forests: Age, ecology, structure, scoring[J]. The Forestry Chronicle, 2003, 79(3): 632-644.
- [14] 胡云云,亢新刚,赵俊卉.长白山地区天然林林木年龄与胸径的变动关系[J].东北林业大学学报,2009,37(11):38-42.
- [15] 曹磊.基于多期保留木实测胸径估计吉林省蒙古栎天然林年龄[D].北京:中国林业科学研究院,2020.
- [16] 曹磊,刘晓彤,李海奎,等.广东省常绿阔叶林生物量生长模型[J].林业科学研究,2020,33(5):61-67.
- [17] 龙时胜,曾思齐,甘世书,等.基于林木多期直径测定数据的异龄林年龄估计方法[J].中南林业科技大学学报,2018,38(9):1-8.
- [18] Lhotka J M, Loewenstein E F. An individual-tree diameter growth model for managed uneven-aged oak-shortleaf pine stands in the Ozark Highlands of Missouri, USA[J]. Forest Ecology and Management, 2011, 261(3): 770-778.
- [19] 彭妮,李凤日,董利虎.黑龙江省长白落叶松人工林单木生长模型[J].南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(3):19-27.
- [20] Maily D, Turbis S, Pothier D. Predicting basal area increment in a spatially explicit, individual tree model: a test of competition measures with black spruce[J]. Revue Canadienne De Recherche Forestière, 2003, 33(3): 435-443.
- [21] 中华人民共和国农林部.立木材积表(LY208-77)[S].北京:中国标准出版社,1977.
- [22] 国家林业局.立木生物量模型及碳计量参数——马尾松(LY/T 2263-2014)[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [23] 国家林业局.立木生物量模型及碳计量参数——湿地松(LY/T 2261-2014)[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [24] 国家林业局.立木生物量模型及碳计量参数——杉木(LY/T 2264-2014)[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [25] 惠刚盈,胡艳波,赵中华,等.基于交角的林木竞争指数[J].林业科学,2013,49(6):68-73.
- [26] 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.
- [27] 薛春泉,徐期瑚,林丽平,等.基于异速生长和理论生长方程的广东省木荷生物量动态预测[J].林业科学,2019,55(7):86-94.
- [28] 雷相东,李希菲.混交林生长模型研究进展[J].北京林业大学学报,2003,25(3):105-110.
- [29] Zeng W S, Zhang H R, Tang S Z. Using the dummy variable model approach to construct compatible single-tree biomass equations at different scales — a case study for Masson pine (*Pinus massoniana*) in southern China[J]. NRC Research

Press, 2011, 41(7): 1547-1554.

- [30] 吴宏伟, 田 意, 黄光灿, 等. 基于非线性度量误差的湿地松生长模型[J]. 林业资源管理, 2019 (6): 71-76.
- [31] Biging G S, Dobbertin M. A comparison of distance-dependent competition measures for height and basal area growth of individual conifer trees[J]. For Sci, 1992, 38(3): 695-720.
- [32] 臧 颢, 刘洪生, 黄锦程, 等. 竞争和气候及其交互作用对杉木人工林胸径生长的影响[J]. 林业科学, 2021, 57 (3): 39-50.
- [33] Daniels R F, Burkhardt H E, Clason T R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1986, 16(6): 1230-1237.
- [34] Kuehne C, Weiskittel A R, Waskiewicz J. Comparing performance of contrasting distance-independent and distance-dependent competition metrics in predicting individual tree diameter increment and survival within structurally-heterogeneous, mixed-species forests of Northeastern United States[J]. Forest Ecology and Management, 2019, 433: 205-216.
- [35] 孟宪宇. 测树学[M]. 3 版. 北京: 中国林业出版社, 2006, 176, 290-291.
- [36] 赵 茜, 雷渊才, 符利勇. 江西省不同立地等级的马尾松林生物量估计和不确定性度量[J]. 林业科学, 2017, 53 (8): 81-93.

Growth Models of Stand Volume and Biomass of Coniferous Species in Guangdong Province

HUANG Jin-jin^{1,2}, LIU Xiao-tong^{1,2}, ZHANG Yu-ru^{1,2}, LI Hai-ku^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Forest Management and Growth Modelling, National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] To quantitatively characterize the relationship between forest volume as well as biomass and stand age for predicting forest volume and biomass in the future. [Methods] Based on the forest inventory data with five times of *Pinus massoniana*, *Pinus elliottii* and *Cunninghamia lanceolata* in Guangdong, the stand volume and biomass growth models were established by constructing the relationship between the average DBH and stand age, which was developed with 8 forms, respectively, including growth potential and grow rate classifications, developing models with competition or not, and developing models separately or simultaneously. [Result] (1) The determination coefficients of the eight model systems were more than 0.980. The mean prediction errors (MPE) were within $\pm 1\%$. The total relative errors were within $\pm 0.5\%$. Comprehensively considering the goodness of fit and prediction accuracy of each model, the separate model based on the classification of parameter related to growth rate without considering competition was the best. Moreover, model with competition did not significantly improve the model performance. (2) The gap of MPE values of the best stand volume model and worst model was 10.36%, and the gap of biomass model was 10.22%, which indicated that the models were suitable. Besides, the MPE values from the second and third period data were larger than the first and the last period data. (3) The growth potential of *Pinus massoniana* was the largest, by contrast that of *Cunninghamia lanceolata* was the smallest. The growth models of *Cunninghamia lanceolata* were better than those of *Pinus massoniana* and *Pinus elliottii*. (4) The higher the site quality was, the greater the maximum growth was, and the time of trees growing to the maximum growth in the higher site quality stands was shorter. In addition, in the same quality site, the growth of *Pinus massoniana* was the largest, followed by *Pinus elliottii*, *Cunninghamia lanceolata*. [Conclusion] The volume and biomass models including parameters with growth classification and stand characteristics depicts the effects of site quality on forest growth in Guangdong, which provides methodological support for accurately estimating carbon storage, and also provides a reference for the construction of stand growth models in other regions.

Keywords: growth model; volume; biomass; competition; classification; Guangdong