

桉树纸浆用材林树冠结构与林分因子的关系研究^{*}

张水花¹ 刘丽婷³ 苏晨辉¹ 莫晓勇²

(1. 广东省林业调查规划院, 广东 广州 510520; 2. 华南农业大学 林学与风景园林学院, 广东 广州 510642;
3. 江西省林业科学院, 江西 南昌 330032)

摘要 以国营雷州林业局纪家林场 1 至 5 年生的华桉 1 号 (*Eucalyptus urophylla*×*E. tereticornis* 无性系)、DH32-29 (*E. urophylla*×*E. grandis* 无性系) 无性系为对象, 通过 SPSS 软件曲线模拟与综合分析, 研究两个无性系树冠结构与林分因子之间的关系, 得出两个无性系树冠表面积、树冠体积随着年龄生长的变化规律, 发现华桉 1 号的树冠小于 DH32-29, 表明华桉 1 号的生长潜力比 DH32-29 小, 在生产实践中已得到验证; 成功模拟了两个无性系树冠表面积、树冠体积分别与树高、胸径、冠幅及冠长之间共 16 个关系模型, 综合比较各模型, 两个无性系的树冠表面积、树冠体积均与冠长拟合最好, 而与其它 3 个林分因子的拟合程度较差, 对树冠表面积而言, 与树高的拟合较好, 次之为胸径; 对树冠体积而言, 与胸径拟合较好, 次之为树高。

关键词 桉树无性系; 树冠结构; 林分因子; 数学模型

中图分类号: S756.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-2053 (2018) 03-0036-06

Study on Relationship Between Crown Structure and Stand Factors of *Eucalyptus* Pulpwood Plantation

ZHANG Shuihua¹ LIU Liting³ SU Chenhui¹ MO Xiaoyong²

(1. Guangdong Province Forestry Surveying and Planning Institute, Guangzhou, Guangdong 510520, China; 2. College of Forestry and Landscape Architecture, South China Agriculture University, Guangzhou, Guangdong 510642, China; 3. Jiangxi Academy of Forestry, Nanchang, Jiangxi 330032, China)

Abstract The paper studied the relationship between crown structure and stand factors of 1 to 5 years of *Eucalyptus* hua'an 1 and DH32-29 on Jijia forest farm in Leizhou Forestry Bureau by SPSS curve simulation of and comprehensive analysis, it was concluded that the growth variation of crown surface area and crown volume of two clones with age, and found the crown of *Eucalyptus* hua'an 1 was less than DH32-29, and indicated that the growth potential of *Eucalyptus* hua'an 1 was less than DH32-29, and this has been proven in the production practice; and successfully simulated 16 mathematical models between the crown surface area, crown volume respectively and tree height, diameter at breast height, crown width and crown length, after comprehensive comparison between models, and found the crown surface area and crown volume were both best fitted with crown length, on the degree of fitting of the other 3 stand factors, in terms of crown surface area, it was better fitted with tree height, and followed by diameter at breast height, in terms of crown volume, it was better fitted with diameter at breast height, and followed by tree height.

Key words *Eucalyptus* clones; crown structure; stand factor; mathematical model

^{*} 基金项目: 科技部国家重点研发计划 (2016YFD0600505)。

第一作者: 张水花 (1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为森林经理, E-mail: zhangshuihua0807@163.com。

通信作者: 莫晓勇 (1962—), 男, 教授, 主要从事森林经理、人工林培育、遗传育种研究, E-mail: motree@163.com。

随着林业的发展及森林集约经营程度的不断提高，社会对森林生长动态信息的需求也逐渐增加。近年来，基于树冠结构及其生长规律估测树木生长及木材质量等模型不断涌现^[1-2]，对人工林的空间结构优化及集约管理等具有重要意义。树冠结构研究已成为国内外研究的热点之一。

我国对树冠相关方面的研究多集中在北方树种上，如杨树、松类等，桉树作为我国三大造林树种之一，广泛分布于我国南方大部分地区，是我国南方速生丰产林的战略性树种^[3-4]，对其树冠结构也作了一些相关研究。李维国等^[5]以树冠结构的特征参数为因变量、胸径和树高为自变量进行一元回归分析，建立了刚果 12 号桉三林一号无性系树冠结构模型。胥辉等^[6]运用灰色系统理论及叶面积静态模型等方法，结合赤桉（*Eucalyptus camaldulensis*）胸径生长量与叶面积实测数据，成功模拟了其叶面积模型。余雪标等^[7]探讨了桉树树冠结构参数与其林木生长指标之间的相关关系，并构建了桉树人工林树冠的生长模型。黄宝强等^[8]运用灰色系统理论研究赤桉和巨桉（*E. grandis*）人工林生长规律，并建立了其生长预估模型，便于预测赤桉和巨桉的生长趋势及其生长规律，并为培育短周期工业用材林提供科学依据。周元满等^[9]应用阶跃函数模型，成功模拟了雷州半岛 4 个不同桉树品系（巨尾桉 *E. grandis* × *E. urophylla* 无性系、刚果 12 号桉 *E. 12ABL* 无性系、尾叶桉 *E. urophylla* 无性系、尾叶桉实生林）冠幅和树龄之间的关系模型。周元满^[10]以短轮伐期桉树 U6 无性系为对象，探讨了其冠幅生长规律，并构建了其冠幅生长的阶跃函数模型。从 2006 年至今，对桉树树冠结构的研究较少报道，特别值得注意的是，桉树树冠结构与材积之间关系方面的研究尚未报道。树冠包括了光合作用的重要组分——

枝、叶，它的大小能直接反映树木竞争及占有生长空间的能力，并对树木的干形有很大影响，进而影响树木的生长量。树冠大小指标有绝对指标和复合指标之分。绝对指标（冠幅、冠长等）不能用其构建竞争指标，如生长空间指数、生长空间竞争指数等^[2,11-12]，而且不能够用来进一步分析林分的空间结构，也不能为空间优化提供参考^[13]。而复合指标（树冠表面积、树冠体积等）能够做到。本文以华桉 1 号（*E. urophylla* × *E. tereticornis* 无性系）、DH32-29（*E. urophylla* × *E. grandis* 无性系）为研究对象，研究华桉 1 号、DH32-29 树冠表面积、树冠体积与林分因子之间的关系，以期对林分的空间结构调整及合理化经营提供参考。

1 研究区概况

研究区域设置于广东省湛江市国营雷州林业局纪家林场，地理坐标为 20° 18' ~ 21° 30' N，109° 39' ~ 110° 38' E，属热带湿润性季风气候，年平均气温 23.5℃，最高气温 38.9℃，最低气温 1.4℃；年降雨量 1 855 mm，相对湿度 82%~84%，干湿季节明显。低丘陵缓坡地形，土壤类型为浅海沉积物砖红壤。

2 研究方法

2.1 野外调查

2014 年 3 月上旬，在国营雷州林业局纪家林场华桉 1 号、DH32-29 无性系人工林中，以空间代替时间的方法，两无性系各确定 5 个调查小班，各小班年龄依次为 1、2、3、4、5 a 生。每一调查小班采用四角一心的调查方法，设置 5 个固定样地，规格为 20 m × 20 m。在样地内逐株测定树高、胸径、第一活枝高和冠幅等主要测树因子。各调查样地基本生长信息见表 1。

表 1 样地基本生长信息

Tab.1 Basic growth information of sample plots

年龄 Age/a	小班面积		平均树高		平均胸径		平均第一活枝高		平均树冠长度		平均冠幅		每公顷蓄积量	
	Small class area/hm ²		Average tree height/m		Average diameter at breast height/cm		The Average first live branch height/m		Average tree crown length/m		Average crown breadth/m		Volume per hectare/ (m ³ · hm ⁻²)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	4.4	6.0	3.7	3.6	3.6	3.4	1.0	0.8	2.7	2.8	2.08	1.78	9.0000	10.0300
2	10.3	8.3	7.7	8.2	6.7	7.0	4.3	4.4	3.4	3.8	2.34	2.36	54.5334	64.9298
3	5.8	11.1	10.0	11.7	8.2	8.7	5.8	7.2	4.2	4.5	2.36	2.40	95.6726	116.8884
4	4.7	4.6	14.0	14.7	9.4	10.2	10.0	10.5	4.0	4.3	2.18	2.22	146.0176	176.5278
5	6.1	6.4	15.4	17.5	10.4	11.2	11.5	13.3	3.9	4.2	2.04	2.16	217.6170	390.9828

注：A 为华桉 1 号，B 为 DH32-29。Note: A is hua'an 1 and B is DH32-29.

2.2 树冠表面积、树冠体积的测算

传统数学方法估算树冠表面积及树冠体积一般是将树冠看作圆锥体近似求算。本文将树冠最长处作为分界点,把树冠看成上下两个圆锥体,但树冠最长枝水平投影长度在东、南、西、北4个方向上不等,故可以将树冠整体区分为4部分(4个半径不同、母线不同、高度相同的圆锥体)进行树冠表面积、树冠体积的估算。则根据圆锥体求体积公式及侧面积公式结合勾股定理得树冠表面积公式(1)、树冠体积公式(2):

$$\text{树冠表面积} = \frac{\pi}{4} \times [r_1(r_1^2 + h^2)^{1/2} + r_2(r_2^2 + h^2)^{1/2} + r_3(r_3^2 + h^2)^{1/2} + r_4(r_4^2 + h^2)^{1/2}] \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{树冠体积} = \frac{\pi}{2} \times (r_1^2 + r_2^2 + r_3^2 + r_4^2) \times h \dots \dots (2)$$

其中: r_1 、 r_2 、 r_3 、 r_4 分别为东、西、南、北各方向的最长枝水平投影长度, h 为树冠长度。

2.3 数据分析

主要通过 Microsoft excel 2007 进行数据整理与分析,并运用 SPSS 19.0 统计软件进行曲线回归,构建华桉 1 号、DH32-29 两个无性系树冠结构与林分因子之间的预估模型。

3 结果与分析

3.1 树冠表面积、树冠体积的估算结果

根据已测量数据(4个方向上的最长枝水平投影长度及树冠长度),华桉 1 号、DH32-29 树冠表面积、树冠体积的估算结果如表 2。

由表 2 可知,从树冠表面积、树冠体积的连年生长量及年平均生长量来看,华桉 1 号均低于 DH32-29,说明华桉 1 号树冠生长慢于 DH32-

29;从华桉 1 号、DH32-29 的树冠表面积、树冠体积生长变化规律来看,两者呈现基本一致的规律。连年生长量方面,树冠表面积、树冠体积呈现上升—下降—上升变化趋势,且 3 年至 4 年之间,它们的连年生长量开始小于 0,之后,虽有所上升,但仍小于 0,最终趋于 0;从年平均生长量来看,2 年后树冠表面积与树冠体积增加开始下降。以上可表明华桉 1 号、DH32-29 两个无性系的树冠在前 3 年内,随着年龄的增加而增大,但生长到第 3 年后,树冠开始减小,最终趋于稳定。

3.2 华桉 1 号、DH32-29 树冠结构与林分因子的预估模型

建立模型的目的并不是“复制”现实,而是为理解和预测复杂的现实系统提供一个有效的代替,将定性的关系量化^[14]。本文主要通过 SPSS 软件对华桉 1 号、DH32-29 的树冠表面积、树冠体积与林木因子(树高、胸径、冠幅及冠长)进行曲线模拟,通过综合比较各模型关系式(线性方程、对数方程、倒数方程、二次方程、三次方程、复合方程、幂方程、S 方程、增长方程、指数方程、Logistic 方程),选出最优拟合方程。

3.2.1 树冠表面积与林分因子的预估模型 分别以树高、胸径、冠幅、冠长为自变量,以树冠表面积为因变量,SPSS 软件模拟后,将各模型综合比较后,发现:华桉 1 号树冠表面积与树高二次方程拟合最优($R^2=0.965$, $F=27.733$, $\text{Sig.}=0.035$),其它拟合方程的拟合优度 R^2 均在 0.9 以下,而且其中部分的 $\text{Sig.} > 0.05$,则方程无意义;与胸径 S 方程拟合最优($R^2=0.900$, $F=27.123$, $\text{Sig.}=0.014$),虽二次、三次方程的拟

表 2 不同年龄华桉 1 号、DH32-29 树冠表面积、树冠体积估算结果

Tab.2 Estimated results of crown surface area and crown volume for hua'an 1 and DH32-29 of different ages

年龄 Age/a	树冠表面积 Crown surface area/m ²		树冠表面积连年 生长量 Annual growth of crown surface area/ (m ² · a ⁻¹)		树冠表面积年 平均生长量 Average annual growth of crown surface area/ (m ² · a ⁻¹)		树冠体积 Crown volume/ m ³		树冠体积连 年生长量 Annual growth of crown volume/ (m ³ · a ⁻¹)		树冠体积年 平均生长量 Average annual growth of crown volume/(m ³ · a ⁻¹)	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	8.11	10.63			8.1100	10.6300	2.12	3.22			2.1200	3.2200
2	17.80	21.76	9.69	11.13	8.9000	10.8800	7.01	8.81	4.89	5.59	3.5050	4.4050
3	23.35	28.13	5.55	6.37	7.7833	9.3767	10.08	13.99	3.07	5.18	3.3600	4.6633
4	19.93	24.42	-3.42	-3.71	4.9825	6.1050	7.29	10.36	-2.79	-3.63	1.8225	2.5900
5	18.97	23.72	-0.96	-0.70	3.7940	4.7440	6.71	10.15	-0.58	-0.21	1.3420	2.0300

注: A 为华桉 1 号, B 为 DH32-29。Note: A is hua'an 1 and B is DH32-29.

合优度 R^2 在 0.9 以上, 但其 $\text{Sig.} > 0.5$, 方程无意义, 其余方程的 R^2 均在 0.9 以下; 与冠幅 S 方程拟合最优 ($R^2=0.791$, $F=11.359$, $\text{Sig.}=0.043$), 其它拟合方程 $\text{Sig.} > 0.5$, 故不予考虑; 与冠长其拟合优度 R^2 均在 0.9 以上, 绝大多数方程的 $\text{Sig.} < 0.5$, 但比较起来 S 方程拟合最优 ($R^2=0.948$, $F=54.921$, $\text{Sig.}=0.005$); DH32-29 树冠表面积与树高二次方程拟合最优 ($R^2=0.959$, $F=23.599$, $\text{Sig.}=0.041$), 其中部分拟合方程的拟合优度 R^2 虽在 0.959 以上, 但其 $\text{Sig.} > 0.05$, 故不予考虑; 与胸径 S 方程拟合最优 ($R^2=0.923$, $F=35.984$, $\text{Sig.}=0.009$), 而其它的拟合优度 $R^2 < 0.923$; 与冠幅 S 方程拟合最优 ($R^2=0.886$, $F=23.317$, $\text{Sig.}=0.017$), 其它拟合方程的拟合优度 R^2 均低于 S 方程的拟合优度; 与冠长其拟合优度 R^2 均在 0.960 以上, 其相应的 $\text{Sig.} < 0.5$, 但比较起来 S 方程拟合最优 ($R^2=0.989$, $F=259.322$, $\text{Sig.}=0.001$)。

从上述可以看出, 树冠表面积与树高、胸径、冠幅及冠长的拟合模型, 无论是华桉 1 号, 还是 DH32-29, 其均是树冠表面积与冠长拟合最好, 相对来说, 冠长是决定树冠表面积大小的一个非常重要的因子。各模型参数估计值如表 3。

3.2.2 树冠体积与林分因子的预估模型 分别以树高、胸径、冠幅、冠长为自变量, 以树冠体积为因变量, SPSS 软件模拟后, 将各模型综合比较后, 发现: 华桉 1 号树冠体积与树高 S 方程拟合最优 ($R^2=0.809$, $F=12.719$, $\text{Sig.}=0.038$), 其中二次、三次方程的拟合优度 R^2 虽比 S 方程的拟合优度大, 但其 $\text{Sig.} > 0.05$, 其余方程的拟合

优度 R^2 均低于 S 方程的拟合优度; 与胸径 S 方程拟合最优 ($R^2=0.841$, $F=15.884$, $\text{Sig.}=0.028$), 其它拟合优度 R^2 小于 0.8; 与冠幅 S 方程拟合最优 ($R^2=0.770$, $F=10.032$, $\text{Sig.}=0.048$), 其它拟合方程 $\text{Sig.} > 0.5$, 故不予考虑; 与冠长 S 方程拟合最优 ($R^2=0.910$, $F=30.505$, $\text{Sig.}=0.012$), 其余方程的拟合优度 R^2 均在 0.9 以下; DH32-29 树冠体积与树高 S 方程拟合最优 ($R^2=0.889$, $F=24.080$, $\text{Sig.}=0.016$), 其它方程 $\text{Sig.} > 0.05$, 故不予考虑; 与胸径 S 方程拟合最优 ($R^2=0.892$, $F=24.735$, $\text{Sig.}=0.016$), 其它拟合方程除了幂方程 ($R^2=0.824$, $F=14.008$, $\text{Sig.}=0.033$) 外, 其它方程的 $\text{Sig.} > 0.5$; 与冠幅 S 方程拟合最优 ($R^2=0.879$, $F=21.891$, $\text{Sig.}=0.018$), 其它拟合方程的拟合优度 R^2 均低于 S 方程的拟合优度; 与冠长其拟合优度 R^2 均在 0.9 以上, 其相应的 $\text{Sig.} < 0.5$, 但比较起来 S 方程拟合最优 ($R^2=0.980$, $F=145.494$, $\text{Sig.}=0.001$)。

从上述可以看出, 树冠体积与树高、胸径、冠幅及冠长的拟合模型中拟合较优的模型与树冠表面积一样, 两个无性系均与冠长拟合最好, 同样, 相对来说, 冠长也是决定体积大小的一个非常重要的因子。各模型参数估计值如表 4。

3.3 模型验证

通过模拟华桉 1 号、DH32-29 两个无性系树冠结构与林分因子之间的关系模型, 得到冠长与树冠表面积、树冠体积的关联性最密切, 它直接影响着树冠表面积、树冠体积的大小。本研究仅对树冠表面积、树冠体积与冠长的关系模型做验证。将国营雷州林业局纪家林场 2014 年度所量

表 3 不同年龄华桉 1 号、DH32-29 树冠表面积与林分因子关系模型参数估计值
Tab.3 Parameter estimate of mathematical model between crown surface area and stand factors for hua'an 1 and DH32-29 of different ages

项目 Item	参数估计值 Parameter estimate									
	方程 Equation		常数 Constant		b1		b2		b3	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
树冠表面积与树高 Crown surface area and tree height	二次	二次	-9.306	-4.033	5.543	4.704	-0.242	-0.180	0	0
树冠表面积与胸径 Crown surface area and diameter at breast height	S	S	3.609	3.674	-5.307	-4.365	0	0	0	0
树冠表面积与冠幅 Crown surface area and crown breadth	S	S	4.746	5.891	-4.443	-6.18	0	0	0	0
树冠表面积与冠长 Crown surface area and crown length	S	S	4.925	4.849	-7.498	-6.931	0	0	0	0

注: A 为华桉 1 号, B 为 DH32-29。Note: A is hua'an 1 and B is DH32-29.

测的两个无性系的冠长（1 到 5 年），通过冠长与树冠表面积、树冠体积的关系模型，得到树冠表面积、树冠体积的模拟值，然后将模拟值与平均值进行比较，如图 1、图 2，可以看出模型能很好的模拟华桉 1 号、DH32-29 两个无性系 1 到 5 年的树冠表面积、树冠体积，各模拟值与平均值之

表 4 不同年龄华桉 1 号、DH32-29 树冠体积与林分因子关系模型参数估计值

Tab.4 Parameter estimate of mathematical model between crown volume and stand factors for hua'an 1 and DH32-29 of different ages

项目 Item	参数估计值 Parameter estimate									
	方程 Equation		常数 Constant		b1		b2		b3	
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
树冠体积与树高 Crown volume and tree height	S	S	2.594	2.843	-6.395	-5.856	0	0	0	0
树冠体积与胸径 Crown volume and diameter at breast height	S	S	2.892	3.058	-7.396	-6.293	0	0	0	0
树冠体积与冠幅 Crown volume and crown breadth	S	S	4.531	6.310	-6.32	-9.030	0	0	0	0
树冠体积与冠长 Crown volume and crown length	S	S	4.752	4.785	-10.546	-10.119	0	0	0	0

注：A 为华桉 1 号，B 为 DH32-29。Note: A is hua'an 1 and B is DH32-29.

间的 R 值均为 0.999，且 $P < 0.01$ 。虽模型的模拟值比平均值偏高，但各相对误差均在 4% 以下，符合统计分析误差允可的合理范围内，所以模型所模拟的树冠表面积、树冠体积具有可靠性，为树冠表面积、树冠体积的测算提供了一种新的方法。

4 结论与讨论

本研究通过传统数学方法估算树冠表面积和树冠体积，并分析了他们随年龄增长的变化规律及模拟了树冠表面积、树冠体积与林分因子（树

高、胸径、冠幅、冠长）之间的关系模型，得到如下规律。

4.1 华桉 1 号的树冠生长慢于 DH32-29，表明华桉 1 号的生长潜力比 DH32-29 小，在其生产实践中已得到验证。但两个无性系的树冠表面积、树冠体积其生长规律基本一致，即 1 至 3 年这个阶段，是华桉 1 号、DH32-29 两个无性系树冠的形成期和生长期，即在此阶段树冠表面积和树冠体积均达到最大，之后，随着年龄的增长，树冠表面积和树冠体积开始减少，最终趋于稳定，而此时主要以树木的胸径和树高生长为主，即材积持

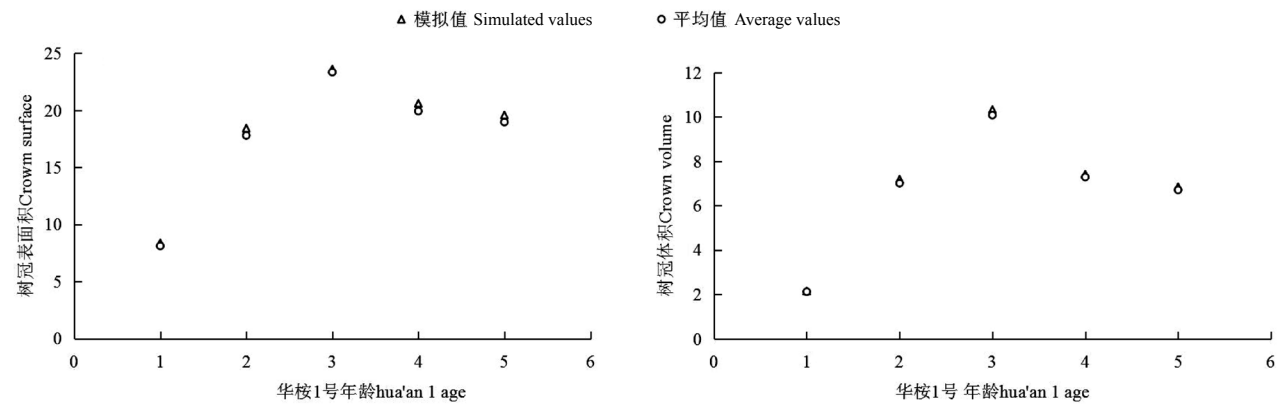


图 1 不同年龄华桉 1 号、DH32-29 树冠表面积模拟值与平均值比较

Fig.1 Comparison of simulated and average values of crown surface area for hua'an 1 and DH32-29 of different ages

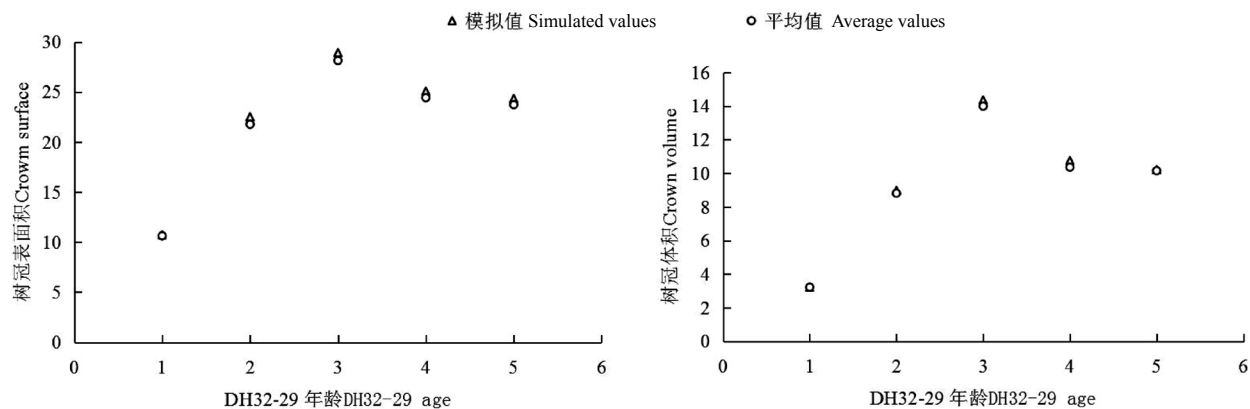


图 2 不同年龄华桉 1 号、DH32-29 树冠体积模拟值与平均值比较

Fig.2 Comparison of simulated and average values of tree crown volume for hua'an 1 and DH32-29 of different ages

续增加，待到 5 年或 6 年后，树木生长开始变慢，这是常见的前期速生性树种的树冠与材积生长的阶段性滞后效应，所以将其轮伐期定为 5 年或 6 年。

4.2 通过 SPSS 软件成功模拟树冠表面积、树冠体积分别与各林分因子（树高、胸径、冠幅、冠长）之间的关系模型，得出两个无性系共 16 个模型，综合比较各模型，两个无性系的树冠表面积、树冠体积均与冠长拟合最好，相对来说，冠长是决定树冠表面积及树冠体积大小的一个非常重要的因子。而与其它 3 个林分因子的拟合程度，对树冠表面积而言，与树高的拟合较好，次之为胸径；对树冠体积而言，与胸径拟合较好，次之为树高。

4.3 通过模拟所得到的最优方程，可以应用到林业实践当中。树冠表面积和树冠体积是衡量林分空间结构大小的重要指标，但它们不易获得，其所涉及的测量指标，相对树高、胸径、冠幅、冠长等来说，量测较复杂。若知道它们与林分因子（如冠长等）的关系模型，仅通过林分因子（如冠长等）就可以得到树冠表面积和树冠体积，故可以将外业调查项目简化，大大提高工作效率，因此，树冠结构与林分因子关系模型的构建，为树冠表面积、树冠体积估算提供一种新的方法。

本文构建的模型虽对树冠表面积、树冠体积预测的精度比较高，但在树木生长的立地条件、郁闭度、抚育措施及经营措施等不同的情况下，其模型预测的偏差将加大，所以该模型在以后的应用中，需要不断的修正。

参考文献

[1] 贾炜玮. 樟子松人工林枝条生长及节子大小预测模型的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2006.

[2] 刘兆刚, 李凤日, 于金成. 落叶松人工林单木模型的研究[J]. 植物研究, 2003, 23(2): 237-244.

[3] 曹永建, 李兴伟, 王剑菁, 等. 高温干燥处理对桉树木材抗干缩性能的影响研究[J]. 广东林业科技, 2015, 31(2): 78-83.

[4] 吴琼辉, 张浩. 广东省桉树人工林发展现状与可持续发展对策[J]. 林业与环境科学, 2006, 22(3): 133-136.

[5] 李维国, 余雪标, 唐真正, 等. 刚果12号桉三林一号无性系树冠结构特征及地上部分生物量的分配[J]. 热带农业科学, 1999(1): 26-30.

[6] 胥辉, 马焕成, 王学力, 等. 赤桉叶面积动态模型的研究[J]. 云南林业科技, 2000(1): 19-22.

[7] 余雪标, 徐大平, 龙腾, 等. 连栽桉树人工林生长特性和树冠结构特征[J]. 林业科学, 2000, 36(S1): 137-142.

[8] 黄宝强, 谢茂华, 黄健翔, 等. 桉树人工林生长预测模型的研究[J]. 林业实用技术, 2004(1): 6-7.

[9] 周元满, 谢正生, 刘新田. 雷州半岛不同桉树品系树冠生长预测模型研究[J]. 福建林业科技, 2005, 32(4): 10-13.

[10] 周元满, 谢正生, 刘素青, 等. 短轮伐期桉树林分树冠生长的阶跃函数模型[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(2): 59-62.

[11] 马履一, 王希群. 生长空间竞争指数及其在油松、侧柏种内竞争中的应用研究[J]. 生态科学, 2006, 25(5): 385-389.

[12] 孜来比·买木提名, 杨华, 赵广亮, 等. 单木竞争指标的研究进展[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(6): 152-158.

[13] 张成程, 李凤日, 赵颖慧. 落叶松人工林空间结构优化的探讨[J]. 植物研究, 2008, 28(5): 632-636.

[14] 周丹卉, 贺红士, 孙国臣, 等. 林窗模型及其在全球气候变化研究中的应用[J]. 生态学杂志, 2007, 26(8): 1303-1310.