

# 海南木麻黄无性系生长过程研究

张勇<sup>1</sup>, 仲崇禄<sup>1\*</sup>, 陈羽<sup>1</sup>, 陈珍<sup>1</sup>, 姜清彬<sup>1</sup>, 韩强<sup>1</sup>, 方发之<sup>2</sup>

(1. 中国林业科学研究院热带林业研究所, 广东广州 510520; 2. 海南林业科学研究所, 海南海口 571100)

**摘要:** [目的] 为了研究海南地区木麻黄无性系的生长过程, 并确定其数量成熟龄和合理轮伐期。 [方法] 本研究利用海南岛 3 个试验点 4 个相同无性系 10 a 的生长数据分析了木麻黄无性系的树高、胸径和材积的生长规律。 [结果] 表明: 木麻黄无性系树高和胸径的生长均呈“先快后慢”的生长模式, 造林后 1~6 a 为快速生长期, 6 a 后进入缓慢生长期; 材积生长则呈“慢—快—慢”的 S 型生长模式, 造林后 1~3 a 为慢速生长期, 4~7 a 为快速生长期, 8 a 后进入缓速生长期。根据材积年平均生长量和连年生长量曲线的相交点, 各无性系材积生长的数量成熟龄处于 6~9 a。利用 3 个试验点 4 个无性系获得的材积生长平均值, 拟合了木麻黄无性系材积生长曲线的 Richards 模型, 并得出材积快速增长的起始期  $t_1 = 4.9$  a, 终止期  $t_2 = 8.4$  a, 最大相对生长速率期  $t_m = 6.9$  a, 最大材积增长速率  $25.8 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。 [结论] 综合上述结果, 建议海南地区将木麻黄无性系的轮伐期定为 6~9 a。

**关键词:** 木麻黄无性系; 生长规律; 数量成熟龄; 生长曲线; 轮伐期

中图分类号: S792.93

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)04-0588-07

## Studies on Growth Processes of Casuarina Clones in Hainan Island

ZHANG Yong<sup>1</sup>, ZHONG Chong-lu<sup>1</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, CHEN Zhen<sup>1</sup>,  
JIANG Qing-bin<sup>1</sup>, HAN Qiang<sup>1</sup>, FANG Fa-zhi<sup>2</sup>

(1. Research Institute of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China;

2. Hainan Research Institute of Forestry, Haikou 571100, Hainan, China)

**Abstract:** [Objective] To study the growth patterns and determine their quantitative maturity and appropriate rotation age of casuarina clones in Hainan island. [Methods] The field test data of ten years' growth data of height, diameter at breast height (DBH), and volume of 4 casuarina clones at 3 trial sites of Hainan Island were collected to analyze the growth processes of different casuarina clones. [Results] Both the height and DBH growth of casuarina clones presented a “fast-slow” growth pattern. The fast-growing phase appeared 1-6 years after planting, and then the slow-growing phase appeared. The volume growth presented a “slow-fast-slow” pattern. The slow-growing phase appeared from the first year to the third year after planting, and fast-growing phase appeared in the 4th to 7th year after planting, then slow-growing phase appeared again. Based on the volume curve intersection point of mean annual increment and current annual increment, the quantitative maturity of casuarina clones was in the 6th to 8th year after planting. Based on the volume mean value of 4 casuarina clones in 3 trial sites, Richards curve of volume growth of casuarina clone in Hainan Island was fitted. The characteristic values obtained from Richards curve are as follows: the initial phase of fast-growing of volume growth  $t_1 = 4.9$  years after planting, the termination phase  $t_2 = 8.4$  years, the period of maximum relative growth rate  $t_m = 6.9$  years, and the maximum volume growth rate  $V_m =$

收稿日期: 2016-07-13 修回日期: 2017-03-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(31470634); 广东省林业科技创新资金项目(2014KJCX017); “十二·五”林业科技支撑计划专项项目(2012BAD01B0603)

作者简介: 张勇(1975—), 男, 副研究员, 从事木麻黄遗传育种研究。

\* 通讯作者: 仲崇禄(1961—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事林木遗传育种研究。

25.8 m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>. [ **Conclusion** ] Based on the aforementioned results, the rotation of casuarina clone in Hainan Island are recommended as 6–9 years after planting.

**Keywords:** casuarina clone; growth pattern; quantitative maturity; growth curve; rotation age

木麻黄 (*Casuarina equisetifolia* Forst.) 是我国最成功的外引树种之一, 已成为我国华南和东南沿海地区重要的生态防护林和用材林树种, 对防治台风危害、防海浪侵蚀和对贫瘠干旱的沿海沙地上的植被恢复起到不可替代的作用<sup>[1]</sup>。海南省约有 5 万 hm<sup>2</sup> 的木麻黄人工林<sup>[2]</sup>, 除沿海岸线的基干防护林带外, 其余木麻黄人工林均为用材林, 其木材主要用于生产木片、旋切板及建筑用材等。在海南, 木麻黄绝大部分采用无性系造林, 其轮伐期主要凭经验确定, 一般为 7~10 a。对于以经济效益为主要目的的速生用材林树种, 确定合适的轮伐期, 可以减少因过早或过迟砍伐造成的经济损失或浪费, 提高土地使用效率。国内外关于桉树 (*Eucalyptus* L' Hérít)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)、大叶杨 (*Populus lasiocarpa* Oliv.) 等主要造林树种轮伐期的研究较多, 热带速生树种杂种尾巨桉 (*E. urophylla* × *E. grandis*) 在广西地区的最佳轮伐期被定为 5~7 a<sup>[3]</sup>。在中国亚热带地区, 杉木的合理轮伐期在不同的整地条件上差异很大, 控制火烧整地的轮伐期是 15 a, 砍除杂草整地的轮伐期是 25 a, 而自然林的轮伐期甚至 > 100 a<sup>[4]</sup>。纸浆材用途杨树的合理采伐年龄被建议为 7 a<sup>[5]</sup>, 但培养大中径材的合理采伐

龄要达到 12~14 a<sup>[6]</sup>。叶功富等<sup>[7]</sup>研究了福建沿海地区实生木麻黄防护林带或片林的生长发育规律, 将其生长发育过程划分为幼林、速生、干材、成熟和过熟 5 个阶段, 造林 25 a 时达到数量成熟; 但国内外尚无关于木麻黄无性系轮伐期方面的研究报道。数量成熟龄指林分或林木的材积平均生长量达到最大值时对应的年龄, 或平均生长量与连年生长量相等的年龄, 是确定林木轮伐期的重要指标之一<sup>[8]</sup>。本研究通过分析海南木麻黄无性系在 3 个试验点的生长规律, 探讨木麻黄无性系的数量成熟龄, 为海南地区木麻黄无性系最佳轮伐期的确定提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

2003 年 9 月在海南东部、北部和西部 3 个试验点建立木麻黄无性系测定林, 各试验地概况见表 1, 参试无性系 45~50 个。本研究从中选取 17 号、34 号、7 号和 10 号 4 个无性系进行分析<sup>[9]</sup>, 其选择依据为, 入选无性系在这 3 个试验点均具有较高的保存率, 且生长表现较一致, 分别代表了 3 个试验点参试无性系中优良和中等两个生长表现水平。

表 1 3 个木麻黄无性系试验点的试验地概况

Table 1 Summarized information of 3 trial sites for casuarina clones field testing

试验点 Trial site	地点 Location	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔 Altitude/m	年均气温 Temperature/°C	年均降水量 Rainfall/mm	土壤 pH 值 pH value	土壤类型 Soil type
海南东部 East of Hainan	文昌市迈号镇 Maiahao town, Wenchang city	19°30'	110°47'	38	23.8	1 721.6	5.4	滨海沙土 Coastal sandy soil
海南北部 North of Hainan	海口市岛东林场 Daodong Forest Farm, Haikou	19°59'	110°41'	30	23.8	2 022	5.9	滨海沙土 Coastal sandy soil
海南西部 West of Hainan	东方市四更镇 Sigeng town, Dongfang city	19°13'	108°40'	12	24.5	1 150	5.7	滨海沙土 Coastal sandy soil

### 1.2 试验设计与造林措施

无性系测定林于 2003 年 9 月台风雨季时营建, 3 个试验点均采用随机区组设计, 4 次重复。文昌试验点采用 4 株 × 5 行小区, 每小区 20 株, 株行距 2 m × 3 m; 岛东试验点和东方试验点均采用 8 株 × 2 行小区, 每小区 16 株, 株行距 1.5 m × 3 m。造林时不施基肥, 造林后第 2 年每株追施 NPK 复合肥 100 g。

### 1.3 生长观测

2004 年 10 月开始, 每年对无性系测定林进行生长观测, 截止 2014 年试验林被强台风“威马逊”破坏, 共获得了 10 a 的观测数据。观测指标主要包括树高 ( $H$ , m) 和胸径 ( $DBH$ , cm), 通过树高和胸径计算单株材积 ( $V$ , m<sup>3</sup> · 株<sup>-1</sup>)、单位面积材积 (m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>) 及材积年平均生长量 (m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>) 和材积连年生长量 (m<sup>3</sup> · hm<sup>-2</sup>)。

单株材积计算公式为:

$$V = 3.141\ 592\ 6 \times DBH^2 \times H / 120\ 000^{[10]}$$

材积年平均生长量 = 单位面积材积 / 生长年龄

材积连年生长量 = 当年单位面积材积 - 上1年单位面积材积

### 1.4 材积生长模型的拟合

选用 Logistic 模型<sup>[11]</sup>、Richards 模型<sup>[12-13]</sup> 和 Gompertz 模型<sup>[14]</sup> 3 个常用模型,应用软件 ForStat<sup>[15]</sup> 分别对木麻黄无性系每年材积观测值的生长曲线进行拟合,从中筛选出拟合效果最佳的模型,进一步利用最佳模型分别对木麻黄 4 个无性系和 3 个试验点的材积生长曲线进行拟合,获得各生长曲线的特征值。3 种生长曲线的基本模型分别为:

$$\text{Logistic 模型: } y = \frac{K}{1 + ae^{-bt}} \quad (1)$$

$$\text{Richards 模型: } y = K(1 - ae^{-bt})^{\frac{1}{1-m}} \quad (2)$$

$$\text{Gompertz 模型: } y = Ke^{-ae^{-bt}} \quad (3)$$

式中: $y$  为材积( $m^3 \cdot hm^{-2}$ ), $K$  为相应的理论最大值( $m^3 \cdot hm^{-2}$ ), $a, b$  为模型的生长参数( $b$  为相对增长速率, $a$  为系数), $e \approx 2.718\ 28$  (常数), $t$  为材积生长的年龄;(2) 式中的  $m$  与方程的曲线形状有关,决定了曲线拐点的位置,在生物学意义上与树木的同化作用相关<sup>[13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 木麻黄无性系树高生长过程

由图 1 可知:3 个试验点中,4 个木麻黄无性系的树高快速生长期均在造林后 1~6 a 间,特别是第 2 年(文昌试验点和岛东试验点)或第 3 年(东方试验点)处于高速生长阶段,其后的连年生长量逐渐降低,在第 6 年后生长速度明显降低,树高进入缓慢生长的平台期。

### 2.2 木麻黄无性系胸径生长过程

由图 2 可知:3 个试验点中,4 个木麻黄无性系胸径的快速生长期均在造林后 1~6 a 间,和树高的基本一致,特别是造林后第 2 年,文昌试验点和岛东试验点的胸径都处于连年生长量的最高点,但东方试验点的连年生长量最高点出现在造林后第 5 年,第 6 年后 3 个试验点各无性系的胸径连年生长曲线较平缓,进入缓慢生长期。

### 2.3 木麻黄无性系的材积生长过程和数量成熟龄的确定

由图 3~5 可知:3 个试验点中,4 个无性系材

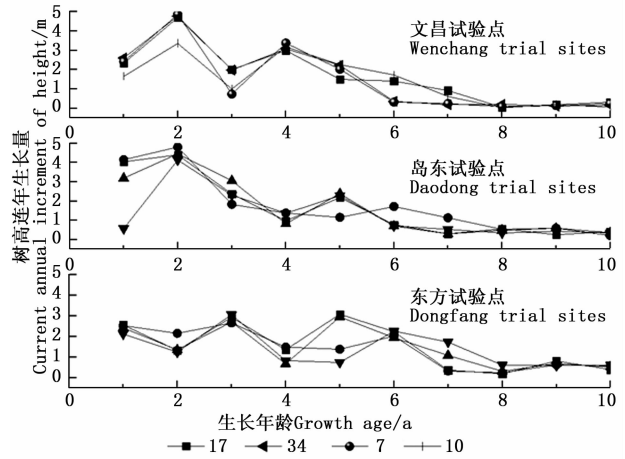


图 1 3 个试验点 4 个木麻黄无性系的树高连年生长量曲线  
Fig. 1 Current annual increment curves of height of 4 clones in 3 trial sites

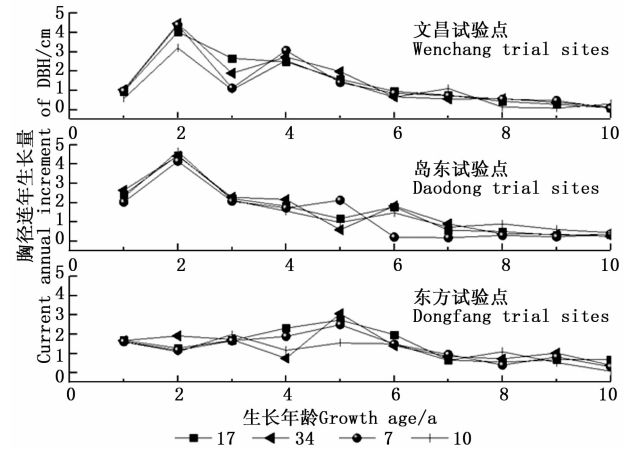


图 2 3 个试验点 4 个木麻黄无性系的胸径连年生长量曲线  
Fig. 2 Current annual increment curves of DBH of 4 clones in 3 trial sites

积的增加都呈现“慢-快-慢”的 S 型增长规律,均在造林后 1~3 a 内材积的增长相对缓慢,在 4~7 a 内进入材积高速增长期,但在第 8 年后材积增长速度变缓。此外,3 个试验点的木麻黄无性系在 4~6 a 达到材积连年生长量的最大值,其特点是相同地区(试验点)的不同无性系间差异不大,而不同地区间差异较大,如文昌试验点中 4 个无性系的材积连年生长量最早达到最大值,无性系 17 和 7 在第 4 年材积连年生长量便达到最大值;但在东方试验点中,无性系的最大材积连年生长量比文昌试验点的晚,4 个无性系均在第 6 年材积连年生长量达到最大值;岛东试验点介于文昌和东方试验点之间,一般在 5~6 a 材积连年生长量达到最大值。

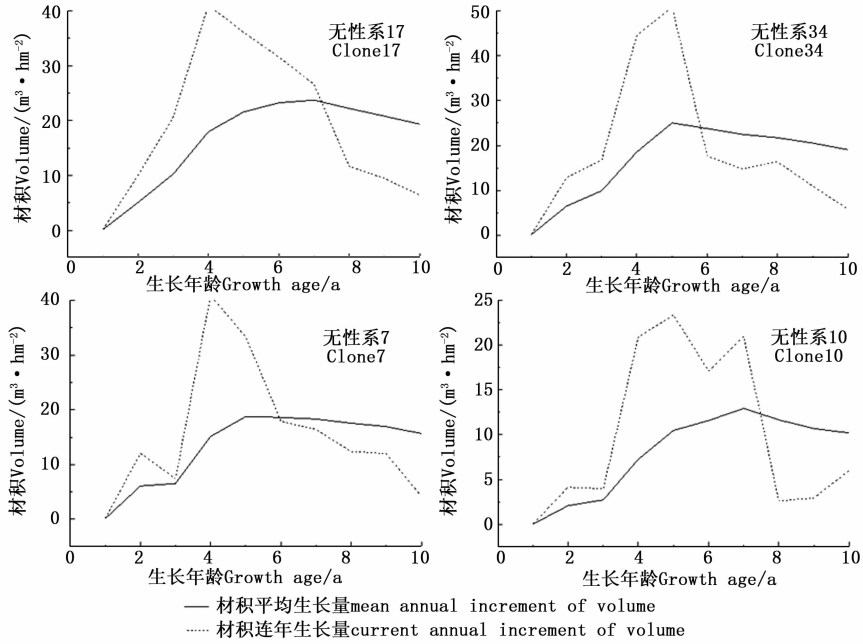


图3 文昌试验点4个无性系的材积平均生长量和连年生长量曲线  
 Fig. 3 Mean annual increment and current annual increment curves of volume of 4 clones in Wenchang trial site

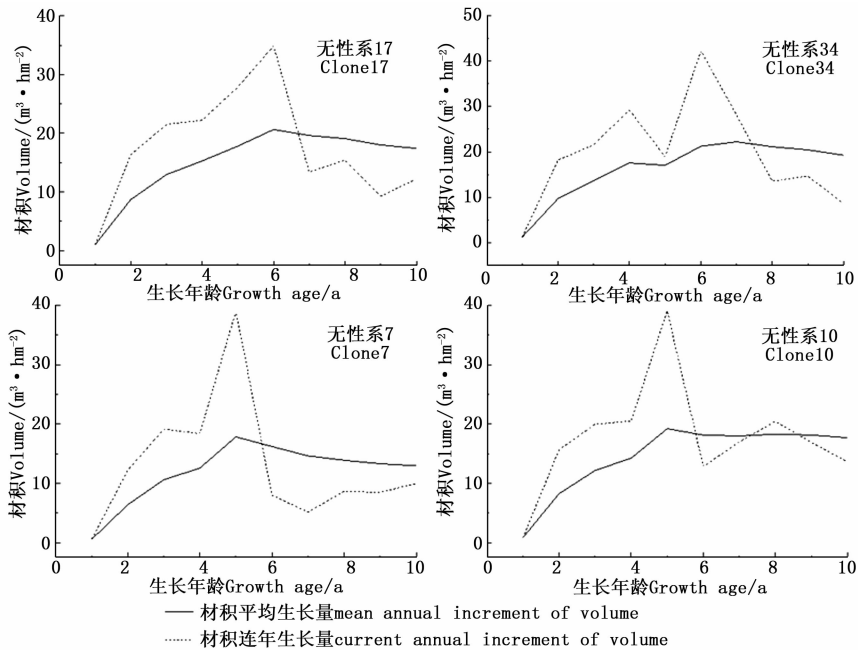


图4 岛东试验点4个无性系的材积平均生长量和连年生长量曲线  
 Fig. 4 Mean annual increment and current annual increment curves of volume of 4 clones in Daodong trial site

图3~5表明:3个试验点木麻黄无性系的数量成熟龄一般介于6~9 a间,如文昌试验点4个无性系的数量成熟龄分别是7、6、6、8 a,岛东试验点4个无性系的数量成熟龄分别是7、7、6、6 a,东方试验点

4个无性系的数量成熟龄分别是7、7、8、10 a。

### 2.4 木麻黄无性系材积生长过程模型拟合

利用 ForStat 软件,采用3种生长模型对海南3个试验点中4个无性系的每年材积观测多点均值进

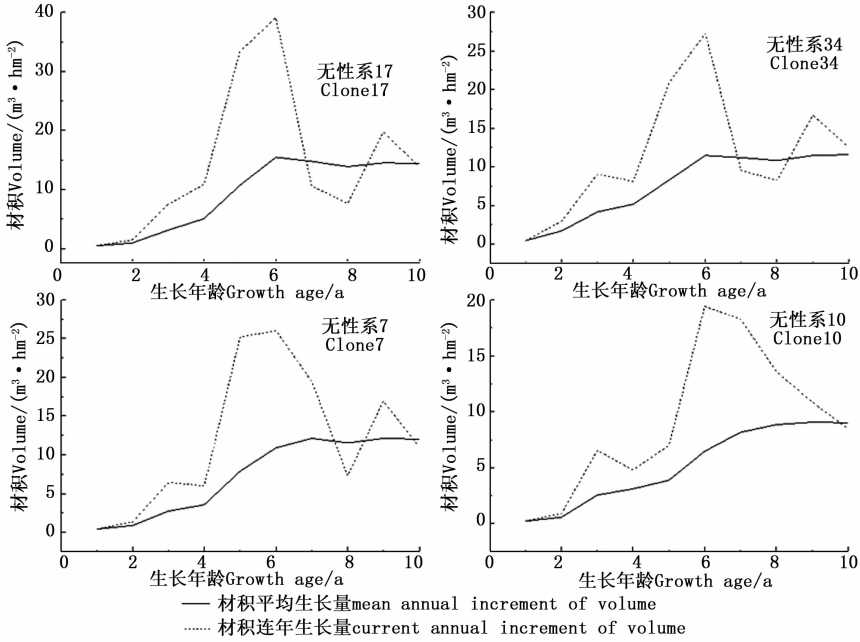


图5 东方试验点4个无性系的材积平均生长量和连年生长量曲线

Fig. 5 Mean annual increment and current annual increment curves of volume of 4 clones in Dongfang trial site

行生长曲线拟合,拟合结果(表2)表明:Richards模型的线性回归相关系数是0.998 ( $F < 0.001$ ),达极显著相关,且其理论最大值  $K$  值为  $156.16 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其余2个模型拟合效果较差,其中,Gompertz模型还呈负相关。因此,选择Richards模型作为木麻黄无性系材积的生长模型,由此建立的木麻黄无性系材积生长曲线Richards模型为:

$$y = 156.16 \times (1 - 5.25e^{-0.41t})^{1.59}$$

表2 3种生长曲线模型对木麻黄无性系材积生长的拟合结果

Table 2 Fitted results of 3 growth models on casuarina clone volume growth

生长模型 Growth model	相关系数 Correlation coefficient	$K / (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$a$	$b$	$m$
Logistic	0.477	91.34	422.56	1.99	
Richards	0.998	156.16	5.25	0.41	0.372
Gompertz	-0.946	133.79	10.49	0.57	

表3 3个试验点及多点平均的无性系材积生长Richards模型参数和相应的特征值

Table 3 Richards model parameters of 3 sites and their characteristic value of volume growth

试验点 Trial site	相关系数 Correlation coefficient	模型参数 Model parameters				材积生长特征值 characteristic value of volume growth			
		$K / (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$a$	$b$	$m$	$t_1/a$	$t_2/a$	$V_m / (\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	$t_m/a$
文昌试验点 Wenchang	0.996	151.84	9.09	0.61	0.42	4.88	8.34	25.05	6.78
岛东试验点 Daodong	0.997	160.29	5.25	0.48	0.34	4.95	8.41	26.45	6.65
东方试验点 Dongfang	0.993	157.70	4.19	0.25	0.47	5.67	9.66	22.87	8.73
多点均值 Overall	0.998	156.16	5.25	0.41	0.37	4.91	8.37	25.77	6.91

利用公式2,进一步对木麻黄3个试验点的材积生长曲线分别进行拟合,得到3个试验点和多点均值的材积模型参数(表3),然后利用各试验点的Richards模型参数求1阶、2阶和3阶导数,得到各试验点和多点均值的材积生长特征值(表3),包括材积快速增长期起始时间( $t_1$ )、材积快速增长期终止时间( $t_2$ )、材积最大相对生长速率( $V_m$ )及其出现时间( $t_m$ )。

根据表3获得的各试验点和多点均值的材积生

长特征值可看出:3个试验点中,文昌和岛东试验点的木麻黄无性系材积快速增长的起始期、终止期、最大相对生长速率期和最大材积增长速率都很接近,而东方试验点的材积快速增长的起始期、终止期、最大相对生长速率期都比前2个试验点慢,且最大材积增长速率显著小于前2个试验点。利用3个试验点的均值数据拟合的材积生长Richards总模型获得的材积生长特征值与前2个试验点很接近,但和东方试验点差异较大。

### 3 讨论

在海南的3个试验点中,4个木麻黄无性系每年测得的树高和胸径虽然有差异,但连年生长曲线表明其生长趋势基本一致,造林后的树高和胸径生长均呈先快后慢的生长规律,造林后1~3 a是其树高和胸径的高速生长期,6 a后开始进入缓慢生长期;而材积生长则呈“慢-快-慢”的S型增长规律。这和其他速生树种如桉树、杨树等的生长规律一致<sup>[16-17]</sup>。根据木麻黄无性系的生长规律,在造林后1~3 a内对木麻黄无性系进行施肥和抚育措施将有利于提高肥料利用率。

在正常生长的林分中,开始时,材积连年生长量随年龄的增加而增大,达到最高峰后逐渐减少,材积的年平均生长量也如此,但其到达高峰的年龄比连年生长量稍晚(图3~5)。从表1可知,西部(东方试验点)的降水量比东部(文昌试验点)和北部(岛东试验点)的低很多,而其他条件相近。从图1、2可看出,在1~6 a的树高和胸径连年生长量中,西部试验点的生长高峰期明显比东部和北部试验点的晚;从图3~5可知,1~4 a期间,东部和北部试验点的材积年平均生长量和连年生长量快速增长,而西部试验点仍处于较缓慢的增长阶段,4 a后才开始快速增长。这说明年降水量对木麻黄无性系的成熟龄有明显影响,表现出年降水量大则成熟龄提早的特点。

根据海南4个木麻黄无性系在3个试验点的10年生材积测定结果,木麻黄无性系的数量成熟龄在海南东部和北部2个试验点的数量成熟龄均较早(6~8 a),而西部试验点的数量成熟龄较迟(7~10 a),这都比在福建的实生苗木麻黄人工林25 a的数量成熟龄早很多<sup>[7]</sup>,说明木麻黄无性系的生长周期比实生苗短很多,虽然早期生长快,但衰老也更快,这不利于木麻黄沿海防护林防护效益的持续发挥。研究表明,林木的数量成熟龄受林分的种植密度、立地条件、经营管理水平等影响,如桉树的初植密度越大,其数量成熟和轮伐期的年龄越小<sup>[3]</sup>;杉木在不同立地条件下的轮伐期可相差10多年<sup>[4]</sup>。在海南的3个试验点均采用当地林业生产部门常用的造林密度和经营管理水平,因此,估算出的数量成熟龄跟实际生产中的数量成熟龄接近。通常确定1个树种的轮伐期除考虑数量成熟龄外,还要考虑工艺成熟龄、经济成熟龄等。林木的工艺成熟龄指林木通过皆

伐,目的材种材积平均生长量出现最大值时的年龄<sup>[17]</sup>。海南木麻黄无性系人工林产出的木材主要用于生产胶合板、造纸和建筑等用途<sup>[2]</sup>。本观测结果表明,3个试验点4个木麻黄无性系的木材工艺成熟龄均比数量成熟龄早(图3~5),且海南木麻黄无性系到达数量成熟龄时的平均胸径已达11.4 cm,完全达到了生产胶合板和建筑用材(主要是建筑时用于做顶木或脚手架等)的径阶要求,而制浆造纸对木材大小没有严格的要求,因此,可以用数量成熟龄作为确定木麻黄无性系轮伐期的主要依据。据此,海南木麻黄无性系的轮伐期建议为造林后的6~9 a。

可以描述林木材积生长“S”型曲线的模型很多,如Logistic模型、Richards模型、Gompertz模型、Chanter模型等。本研究分别拟合了海南木麻黄无性系材积生长的Logistic、Richards和Gompertz模型,发现Richards模型拟合材积生长曲线的拟合结果最好,相关系数最高,这和叶功富等<sup>[7]</sup>对福建实生苗木麻黄防护林生长发育规律的研究结果一致。根据表3可知,在海南地区,木麻黄无性系造林后0.0~4.9 a为材积慢速增长期,4.9~8.4 a为材积快速增长期,8.4 a后进入材积缓速增长期。这与笔者在3个试验点的实测值很接近,说明拟合得到的曲线模型公式可靠。

### 4 结论

(1)海南木麻黄无性系的树高和胸径生长均呈“先快后慢”的生长规律,造林后1~6 a为快速生长期,6年后进入缓慢生长期。

(2)海南木麻黄无性系的材积生长呈“慢-快-慢”的S型增长规律,造林后1~3 a为材积缓慢增长期,4~7 a为快速增长期,8年后进入了材积增长平台期,其数量成熟龄介于6~9 a间。降水量对木麻黄的数量成熟龄有较大影响,表现出降水量大则成熟龄提早的特点。

(3)比较了Logistic、Richards和Gompertz模型对木麻黄无性系的拟合效果,发现Richards模型拟合的材积生长曲线拟合结果最好,相关系数最高,并估算出海南木麻黄无性系造林后0.0~4.9 a为材积慢速增长期,4.9~8.4 a为材积快速增长期,8.4 a后进入材积缓速增长期。这和试验观测的实际值较接近,说明拟合得到的曲线模型公式是可靠的。

## 参考文献:

- [1] 张勇, 仲崇禄, 陈羽, 等. 海南5年生木麻黄优良无性系的选择与评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2011, 35(5): 25-30.
- [2] Li R F, Huang J C. Important roles of Casuarina in coastal shelter-belt construction in Hainan province [M]// Zhong C L, Pinyou-pusarek K, Kalinganire A, *et al.* Improving smallholder livelihoods through improved casuarina productivity-Proceedings of the 4<sup>th</sup> international casuarinas workshop. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011: 220-224.
- [3] 陈少雄, 周国福, 林义辉. 尾叶桉纸浆材人工林轮伐期研究[J]. 林业科学研究, 2002, 15(4): 394-398.
- [4] Zhou H, Meng S W, Liu Q J. Diameter growth, biological rotation age and biomass of Chinese fir in burning and clearing site preparations in subtropical China [J]. Forests, 2016, 7(8): 177-191.
- [5] 代顺民, 唐巍, 唐大云, 等. 杨树短轮伐期用材林合理采伐年龄研究[J]. 四川林勘设计, 2009(4): 32-35.
- [6] 江波, 袁位高, 戚连忠, 等. 杨树人工林合理轮伐期的研究[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(1): 26-31.
- [7] 叶功富, 张水松, 苏全兴, 等. 木麻黄主要类型防护林生长发育规律的研究[J]. 防护林科技, 2000(增刊): 6-14.
- [8] 盛炜彤, 惠刚盈, 罗云伍. 大岗山杉木人工林主伐年龄的研究[J]. 林业科学研究, 1991, 4(2): 113-121.
- [9] 马妮, 仲崇禄, 张勇, 等. 7年生短枝木麻黄优良无性系选择的研究[J]. 林业科学研究, 2014, 27(5): 662-666.
- [10] 仲崇禄. 木麻黄遗传变异规律的研究[D]. 北京: 中国林业科学院, 2000.
- [11] Han Y Z, Li Z F, Tao J C, *et al.* Pattern formation for a volume-filling chemotaxis model with logistic growth [J]. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmaa.2016.11.040>.
- [12] Nishizono T. Effects of thinning level and site productivity on age-related changes in stand volume growth can be explained by a single rescaled growth curve [J]. Forest Ecology and Management, 2010, 259: 2276-2291.
- [13] 魏晓慧, 孙玉军, 马炜. 基于Richards方程的杉木树高生长模型[J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(5): 661-666.
- [14] Mina M, Martin-Benito D, Bugmann H, *et al.* Forward modeling of tree-ring width improves simulation of forest growth responses to drought [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2016, 221: 13-33.
- [15] 李海奎, 唐守正, 李永慈, 等. 统计分析软件FORSTAT的设计与应用[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(4): 104-106.
- [16] 李光友, 徐建民, 陆钊华, 等. 尾叶桉短轮伐期经营林分生长研究[J]. 广东林业科技, 2004, 20(1): 12-15.
- [17] 赵高鑫, 付晓燕, 黄磊. 关于木材工艺成熟探讨[J]. 河北林业科技, 2014(3): 60-61.

(责任编辑:徐玉秀)