

雷州半岛桉树生物质能源林生长的密度效应研究

韩斐扬, 周群英, 陈少雄*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 以雷州半岛 2 年生桉树无性系 DH201 (*Eucalyptus grandis* × *E. tereticornis*) 能源林为研究对象, 对 6 种不同密度配置下的林分生长量、生物量以及热值等进行了分析, 探讨密度对桉树生物质能源林生长的影响。结果表明, 密度对桉树胸径和树高生长量影响极显著, 在林分不同发育阶段对林分蓄积量的影响不同; 单株生物量随密度增大而减小。1 年生的林分蓄积量和生物量均以密度为 10000 ind. hm⁻² 的最大, 分别为 52.57 m³ hm⁻² 和 32.02 t hm⁻²; 2 年生的林分蓄积量和生物量均以密度为 2500 ind. hm⁻² 的最大, 分别为 75.85 m³ hm⁻² 和 45.66 t hm⁻²; 密度对热值及灰分含量的影响不显著。因此, 1 年生和 2 年生的桉树能源林的最优密度分别为 10000 ind. hm⁻² 和 2500 ind. hm⁻²。

关键词: 桉树; 能源林; 密度; 生长量; 生物量; 热值

中图分类号: S753.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2010)07-0350-07

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2010.04.002

Effects of Density on Growth of Eucalypt Bio-energy Plantations in Leizhou Peninsula

HAN Fei-yang, ZHOU Qun-ying, CHEN Shao-xiong*

(China Eucalypt Research Centre, Forestry Administration, Zhanjiang 524022, China)

Abstract: The growth, biomass and calorific values of 2-year-old *Eucalyptus* hybrid clone DH201 (*Eucalyptus grandis* × *E. tereticornis*) as an energy forest in Leizhou Peninsula were studied under different densities. The results showed that the effects of density on diameter at breast height (DBH) and height (HT) were significant, and which stand volumes were different at different development stages. The individual biomass was decreased with increment of density. The stand volume and biomass in 1-year-old were biggest at density of 10000 ind. hm⁻² for 52.57 m³ hm⁻² and 32.02 t hm⁻², respectively, and which those in 2-year-old were biggest at 2500 ind. hm⁻² for 75.85 m³ hm⁻² and 45.66 t hm⁻², respectively. The effects of densities on wood calorific values and ash contents were not different significantly. It suggested that the optimal densities for bio-energy plantations at 1- and 2-year-old were 10000 and 2500 ind. hm⁻², respectively.

Key words: Eucalypts; Energy forest; Density; Growth; Biomass; Calorific value

桉树(*Eucalyptus*)引种到中国已经有 110 多年的历史, 因其众多优良特性, 已证实可作为生物质能源林树种^[1], 但目前我国对桉树能源林的研究还鲜见报道。国外对桉树能源林的发展和研究, 主要集中于巴西、澳大利亚、法国等国^[2]。从 20 世纪 80 年代开始, 法国把桉树作为能源树种, 可生产 17 ~

21 t FW hm⁻² a⁻¹ (合 12 ~ 15 t DW hm⁻² a⁻¹), 巨桉(*E. grandis*)林分蓄积量达 20 m³ hm⁻² a⁻¹[3]。巴西以几种桉树为主营造的能源林为炼钢提供木炭^[4-5]。澳大利亚的桉树能源林主要为小桉树(mallees)、油性小桉树(oil mallee)等, 既可降低水位, 增加作物产量, 保护羊群, 增加产羊率, 又可减少风水侵蚀, 美化环

收稿日期: 2009-12-04 接受日期: 2010-01-26

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(CAFINT2008C13); 国家林业局 948 项目(2007-4-12)资助

作者简介: 韩斐扬(1986 ~), 男, 硕士, 研究方向: 桉树生物量与热值研究, email: hfy03-1@163.com

* 通讯作者 Corresponding author, email: sxchen01@163.com

境^[1]。目前对桉树能源林的树种选育、栽培技术等方面进行了深入系统的研究^[2,6-7]。

林分密度是制约林木群体生长发育的关键因素,确定适宜造林密度是提高人工林生产力的重要途径之一^[8]。适宜的造林密度使林木能更充分利用营养空间,从而获得更高产量。造林密度与收获周期紧密相关^[9]。瑞典采用矮林作业和集约经营,密度为 15000~20000 ind. hm⁻²、轮伐期为 3~5 年的蒿柳(*Salix viminalis*)人工林的产量最高^[9-10]。桉树造林密度主要受栽培时的资金投入、生长习性、收获方式与养分损耗等影响。澳大利亚巨桉能源林的造林密度为 2268 ind. hm⁻²,采伐年龄为 4 年^[7]。巴西桉树能源林在密度为 400~2268 ind. hm⁻²,4 年的年均生长量(mean annual increment, MAI)为 39~62 m³ hm⁻²a⁻¹,其中密度为 1667 ind. hm⁻²的生产力最高,最大的与最小的造林密度收获量相差 50%^[11]。典型的桉树能源林,收获周期为 7 年,密度为 900~1500 ind. hm⁻²,但巨桉能源林的造林密度为 2268 ind. hm⁻²,采伐年龄为 4 年^[7]。我国有关桉树人工林造林密度的研究报道较多,但多集中在造林密度对胸径、材积以及材性的影响方面^[12-15]。丁贵杰^[16]、李志辉等^[17]的研究表明,造林密度能显著影响桉树人工林生物量,单株生物量随密度的增大而明显减小。陈少雄等^[18]对广西东门林场 5 种造林密度下的桉树人工林研究表明,造林密度对蓄积量、出材量和经济效益等有显著影响。但对于定向培育生物质能源林的桉树人工林,其最佳造林密度以及林分密度对生长量、生物量以及能量方面的研究国内还鲜见报道。本研究以雷州半岛 2 年生巨桉(*E. grandis* × *E. tereticornis*)DH201 无性系为材料,按随机区组设计密度栽植试验,比较其生长规律、生物量和热值等的差异,探讨桉树能源林高产的最优栽植密度,为桉树能源林的发展提供理论

依据和技术指导。

1 研究区概况

试验地在广东湛江南方国家级林木种苗示范基地。地理位置为东经 111°38′,北纬 21°30′,属北热带湿润大区雷琼区北缘,为海洋性季风气候,年均温 23.1℃,极端最低温为 1.4℃,极端最高气温 38.1℃,年降雨量 1567 mm,5~9 月降雨量占全年的 85.5%,相对湿度 80.4%^[19]。土壤为第四纪红土母质,砖红壤,贫瘠偏酸。

2 研究方法

2.1 样地设置

实验林分为 2007 年 8 月营造的巨桉 DH201 无性系林,按照随机区组设计布置 6 个密度主区(表 1),每个密度处理分布为 5 行,每个密度主区内设 2 个试验小区,2 个小区间距 4 m,小区面积为 0.01~0.04 hm²,共 12 个试验小区。林地采取机械全垦整地,整地后 2 m 开沟,然后按设计好的密度人工挖穴,1 m 行距的在两沟之间挖穴,穴规格为 30 cm × 30 cm × 30 cm。每穴施 200 g 复合肥作为基肥(N:P:K=15:7:8)。2008 年 4 月抚育时追施复合肥 1 次,每株 150 g。

2.2 生长量及生物量的测定

生物量测定采用平均标准木法^[17]。在 6 种密度林分的中间部分分别测量 30 株(3 行 × 10 株)并做标记,调查胸径、树高。每个试验小区内选 3 株平均木测定生物量,平均木伐倒后树干解析,采用“分层切割法”分层测叶、枝、根、干、皮各器官的鲜重。根系采用挖掘法^[17]。各器官分别在 80℃ 下烘干,测定含水率。于 2008 年 8 月和 2009 年 8 月各测量 1 次。

表 1 密度与株行距设置

Table 1 The density designed

编号 No.	株行距 Spacing (m × m)	造林密度 Density (ind. hm ⁻²)	保存率 Survival (%)	现存数 Existing number (ind. hm ⁻²)
1	4 × 2	1250	81.67	1021
2	3 × 2	1667	83.33	1389
3	2 × 2	2500	76.67	1917
4	2 × 1	5000	68.33	3417
5	1 × 1.5	6667	53.33	3556
6	1 × 1	10000	50.00	5000

2.3 热值及灰分含量的测定

2009 年 8 月测定生物量时取树干木材样品测定热值,木材(不含皮)取胸径处圆盘,先在 105℃ 烘 10 min,之后在 80℃ 下烘至恒重,经磨粉过筛后装瓶贮存备用。用长沙奔特仪器有限公司生产的 WZR-1TC II 型电脑自动热量计测定干重热值(Gross caloric values, GCV),测定前用苯甲酸校正仪器,环境温度 20℃ 左右。每个样品至少重复测定 3 次,误差控制在 $\pm 0.200 \text{ kJ g}^{-1}$ [20]。

用于灰分化法测定灰分含量(Ash content, AC)^[21]。采用干重热值与灰分含量计算样品的去灰分热值:去灰分热值(Ash free caloric values, AFCV) = 干重热值/(1 - 灰分含量)。

2.4 统计分析

数据采用 SPSS13.0 软件进行方差分析和相关

分析,用邓肯检验法进行多重比较。

3 结果和分析

3.1 造林密度对胸径和树高的影响

从表 2 可知,不同造林密度间的 1 年生、2 年生桉树的胸径、树高及其增长量差异极显著。1 年生、2 年生的胸径及胸径增长量和林分密度呈极显著负相关(相关系数 r 分别为 -0.921、-0.934 和 -0.896, $P < 0.01$),1 年生、2 年生的树高及树高增长量和林分密度也呈极显著负相关(r 分别为 -0.773、-0.952 和 -0.937, $P < 0.01$),说明林分密度越大,桉树胸径和树高越小。表 3 也可看出,1 年生、2 年生的胸径及胸径增长量随林分密度的增加而减小,其中以密度为 1250 ind. hm^{-2} 的最大,10000 ind. hm^{-2} 的最小。

表 2 密度对胸径和树高生长量方差分析

Table 2 The variance analysis of DBH and HT of 6 different densities

变异来源 Variance source	胸径 DBH			树高 Height		
	自由度 df	均方 Mean square	F	自由度 df	均方 Mean square	F
1 a 密度间 Between densities	5	37.52	83.18**	5	4.17	10.08**
密度内 Among densities	347	0.45		193	0.41	
2 a 密度间 Between densities	5	110.03	73.16**	5	44.66	48.57**
密度内 Among densities	221	1.5		193	0.92	
增长量 密度间 Between densities	5	43.65	35.61**	5	32.13	23.89**
Increment 密度内 Among densities	193	1.23		193	1.34	

** 表示差异极显著($P < 0.01$)。** presents significant difference at 0.01 level. 表 5 同。The same as Table 5.

表 3 6 种密度下的胸径和树高生长量

Table 3 Effects of of densities on DBH and height

编号 No.	胸径 DBH (cm)			树高 Height (m)		
	1 a	2 a	增长量 Increment	1 a	2 a	增长量 Increment
1	5.27 \pm 0.70aA	9.47 \pm 1.33aA	4.36 \pm 1.04aA	6.16 \pm 0.47aA	10.11 \pm 0.87bA	4.00 \pm 0.88aAB
2	5.26 \pm 0.75aA	9.09 \pm 1.29aAB	4.05 \pm 1.15abA	6.33 \pm 0.66aA	10.30 \pm 0.81bA	3.84 \pm 1.02aAB
3	5.05 \pm 0.55aA	8.43 \pm 1.31bB	3.56 \pm 1.39bA	6.26 \pm 0.55aA	10.79 \pm 1.21aA	4.34 \pm 1.48aA
4	4.20 \pm 0.71bB	6.25 \pm 0.92cC	1.99 \pm 0.93cB	5.81 \pm 0.66bB	9.22 \pm 0.81cB	3.32 \pm 1.08bB
5	3.60 \pm 0.78cC	5.73 \pm 1.26cdCD	2.05 \pm 1.03cB	5.78 \pm 0.80bB	8.14 \pm 1.01dC	2.16 \pm 1.45cC
6	3.59 \pm 0.99cC	5.23 \pm 1.05dD	1.62 \pm 0.93cB	5.71 \pm 0.66bB	7.10 \pm 1.14eD	1.14 \pm 1.05dC

同列数据后不同小写字母和大写字母分别表示差异显著($P < 0.05$)和极显著($P < 0.01$)。Data followed different small letters and capital letters within column present significant difference at 0.05 and 0.01 level, respectively. 表 6 同。

The same as Table 6.

3.2 密度对蓄积量的影响

从图 1 可见,不同造林密度的林分蓄积量有很大差异,1 年生桉树蓄积量随着林分密度增加而增加,而 1 年的增长量却是密度 2500 ind. hm^{-2} 的最

大,其 2 年生的蓄积总量也最大。相关分析结果表明 1 年生的林分蓄积和林分密度呈极显著正相关($r = 0.989$, $P < 0.01$),而 2 年生的林分蓄积和密度不显著相关($r = 0.185$)。最大密度(10000 ind. hm^{-2})下

1 年生桉树的林分蓄积量(52.57 m³ hm⁻²)为最小密度(1250 ind. hm⁻²)下的林分蓄积量(10.92 m³ hm⁻²)的 4.81 倍,而密度为 2500 ind. hm⁻²的 2 年生林分蓄积量(75.85 m³ hm⁻²)是密度为 1250 ind. hm⁻²的林分蓄积量(39.03 m³ hm⁻²)的 1.94 倍。可见,林分密度对林分蓄积量有显著影响。

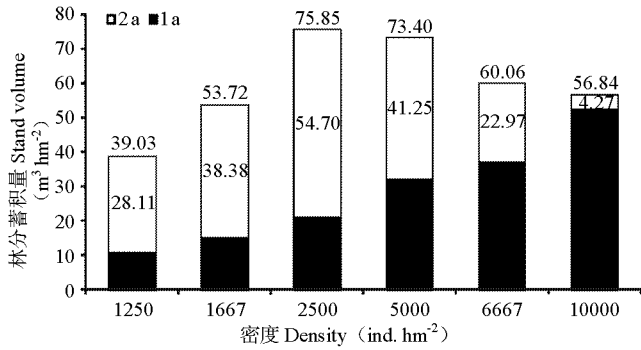


图 1 6 种密度下的林分蓄积量

Fig. 1 The stand volume under 6 different densities

3.3 对生物量的影响

从表 4 可以看出,叶、枝、根、干和皮以及单株生物量都随密度的增加而减小。6 种林分密度下

各组分占总生物量的比例分别为:叶 5.27%~7.85%,枝 18.56%~20.97%,根 11.09%~13.05%,干 47.72%~52.27%,皮 9.58%~11.99%,不同密度间各组分生物量所占比例变化不大,均为干>枝>根或皮>叶。密度为 1250 ind. hm⁻²下的 2 年生林分单株生物量最大为 36.00 kg,是林分密度为 10000 ind. hm⁻²下单株生物量(8.33 kg)的 4.32 倍。

方差分析和多重比较(表 5,6)可见,6 种林分密度之间 1 年生、2 年生时单株生物量及其增长量差异极显著,1 年生、2 年生时单株生物量及其增长量都随着密度的增大而减小,都以林分密度为 1250 ind. hm⁻²的最大,以林分密度为 10000 ind. hm⁻²的最小。1 年生、2 年生时林分生物量及其增长量也差异极显著,1 年生林分生物量随密度的增加而增大,以林分密度 10000 ind. hm⁻²的最大为 32.02 t hm⁻²,250 ind. hm⁻²的最小为 13.00 t hm⁻²;2 年生林分生物量变化不规律,以林分密度为 200 ind. hm⁻²的最大为 45.66 t hm⁻²;而增长量随密度变化的规律基本是密度越大,增长量越小,以林分密度 1250 ind. hm⁻²的最大为 23.75 t hm⁻²。

表 4 6 种密度下 2 年生单株生物量

Table 4 The biomass at 2-year-old under different densities

编号 No.	平均胸径 Average DBH (cm)	平均树高 Average height (m)	生物量 Biomass (kg)					合计 Total
			叶 Leaf	枝 Branch	根 Root	干 Stem	皮 Bark	
1	9.51	10.32	2.29(6.37%)	7.55(20.97%)	3.99(11.09%)	18.72(52.00%)	3.45(9.58%)	36.00(100%)
2	9.00	10.29	1.74(7.11%)	5.08(20.72%)	3.18(12.98%)	11.92(48.65%)	2.58(10.53%)	24.51(100%)
3	8.36	10.76	1.26(5.27%)	4.42(18.56%)	2.83(11.90%)	12.45(52.27%)	2.86(11.99%)	23.82(100%)
4	6.34	9.43	0.82(6.52%)	2.83(22.43%)	1.45(11.49%)	6.02(47.72%)	1.49(11.83%)	12.62(100%)
5	5.81	8.21	0.68(7.85%)	1.65(19.13%)	1.03(11.88%)	4.38(50.69%)	0.90(10.45%)	8.64(100%)
6	5.27	7.08	0.46(5.54%)	1.74(20.88%)	1.09(13.05%)	4.20(50.37%)	0.85(10.17%)	8.33(100%)

括号内数字为各组分所占比例。Data in brackets indicated percentage of each component.

表 5 6 种密度下的生物量方差分析

Table 5 The variance analysis of biomass under different densities

变异来源 Variance source	单株生物量 Individual biomass			林分生物量 Stand biomass		
	自由度 df	均方 Mean square	F	自由度 df	均方 Mean square	F
1 a 密度间 Between densities	5	19.42	53.69**	5	101.12	35.38**
	30	0.36		6	2.86	
2 a 密度间 Between densities	5	241.81	375.10**	5	66.41	52.64**
	30	0.645		6	1.26	
增长量 Increment 密度间 Between densities	5	127.46	139.71**	5	83.09	21.85**
	30	0.91		6	3.8	

表 6 6 种密度下的生物量

Table 6 The biomass under different densities

编号 No.	单株生物量 Individual biomass (kg)			林分生物量 Stand biomass (t hm ⁻²)		
	1 a	2 a	增长量 Increment	1 a	2 a	增长量 Increment
1	10.40 ± 0.36aA	36.00 ± 1.72aA	25.60 ± 2.09aA	13.00 ± 0.45cC	36.75 ± 1.77cB	23.75 ± 2.21aA
2	8.36 ± 1.30bA	24.51 ± 0.78bB	16.15 ± 0.52bB	13.93 ± 2.17cC	34.04 ± 1.09cBC	20.11 ± 1.08abA
3	8.91 ± 0.29bA	23.82 ± 0.30bB	14.91 ± 0.58bB	22.28 ± 0.72bB	45.66 ± 0.57aA	23.38 ± 1.28aA
4	5.00 ± 0.06cB	12.62 ± 0.35cC	7.62 ± 0.42cC	25.02 ± 0.31bB	43.12 ± 1.21abA	18.10 ± 1.52bA
5	3.19 ± 0.49dB	8.64 ± 0.06dD	5.45 ± 0.56cdC	21.27 ± 3.32bB	30.70 ± 0.23dD	9.43 ± 3.55cB
6	3.20 ± 0.07dB	8.33 ± 0.24dD	5.13 ± 0.16dC	32.02 ± 0.76aA	41.65 ± 1.20bA	9.63 ± 0.44cB

3.4 灰分含量与热值

植物热值反映植物组织生命活动的变化和植物生长状况的差异,环境因子对植物生长的影响,在一定程度上可以从热值变化上反映出来^[22]。从表 7 可看出,不同密度下桉树木材的灰分含量为 0.87%~1.63%,干重热值为 18.04~18.42 kJ g⁻¹,木材去灰分热值为 18.28~18.65 kJ g⁻¹。方差分析结果显示,不同密度下的灰分含量、干重热值和去灰分热值差异不显著(P 分别为 0.123、0.309、0.395)。干重热值与灰分含量的相关系数为 -0.186 ($P = 0.564$),说明干重热值与灰分含量相关性不显著。灰分含量、干重热值及去灰分热值和林分密度的相关性不显著(r 分别为 0.085、0.276、0.354, P 分别为 0.493、0.385、0.259),可见造林密度对灰分含量和热值的影响较小。

表 7 6 种密度下桉树的热值及灰分含量

Table 7 The gross caloric value (GCV), ash free caloric value (AFCV) and ash content (AC) under different densities

密度 Density (ind. hm ⁻²)	灰分含量 AC (%)	干重热值 GCV (kJ g ⁻¹)	去灰分热值 AFCV (kJ g ⁻¹)
1250	1.29 ± 0.26	18.04 ± 0.14	18.28 ± 0.10
1667	1.25 ± 0.23	18.42 ± 0.17	18.65 ± 0.13
2500	1.08 ± 0.08	18.29 ± 0.18	18.49 ± 0.21
5000	1.38 ± 0.12	18.19 ± 0.13	18.44 ± 0.13
6667	0.87 ± 0.08	18.38 ± 0.23	18.54 ± 0.25
10000	1.63 ± 0.13	18.28 ± 0.18	18.58 ± 0.21

4 结论和讨论

能源林是以获得能量为最终目的而营造的森林,其生长和产量受多方面因素影响,造林密度是一个重要因子。有研究表明,林分密度与株行距配置对林分生长有很大影响,胸径随林分密度的增加而减小^[8,23-26]。张英武等^[26]报道在林分幼龄阶段,适当增加林分密度有利于林分的高生长,但密度过

大又会增加个体间的竞争,从而抑制树高生长。林分蓄积量在幼龄时期随林分密度增大而增大,随着林分趋于成熟,这种相关性不再显著^[23,25-26]。周元满等^[8]报道在林分不同发育阶段因林木生长速度及密度不同,林分蓄积量也不同,合理的经营密度才能获得较高的单位面积蓄积量,以达到最佳的经营效果。生物量是衡量人工林经营效果的重要指标^[27],林分密度对林分生物量的影响很大^[16-17],而林分生物量是选择能源林树种的重要参考指标,也是衡量能源林产量的主要指标之一,所以在营造能源林时,应选择合适的造林密度^[21]。

本研究中桉树胸径随林分密度的增加而减小,以密度为 1250 ind. hm⁻² 的最大,10000 ind. hm⁻² 最小,这与前人的研究结果相似^[23-26]。而树高生长均以密度为 2500 ind. hm⁻² 的最大。1 年生的林分蓄积量和林分密度显著相关,但 2 年生的相关性不显著,这与前人的研究也相似^[23,25-26]。这可能是密度对 1 年生桉树林分的生长影响未完全表现出来,而 2 年生时林分已经郁闭,不同密度会造成林木对光、肥等养分空间竞争的不同,从而影响林木的胸径、树高、材积生长,进而对林分的蓄积量产生影响^[8]。密度为 2500 ind. hm⁻² 的林分蓄积增长量最大,达 37.93 m³ hm⁻² a⁻¹,低于巴西 4 年生巨桉的年均生长量(39~62 m³ hm⁻² a⁻¹)^[11]。如果把林分生物量换算成年平均净生产力,林分密度为 2500 ind. hm⁻² 的桉树年均净生产力为 22.83 t hm⁻² a⁻¹,高于印度南部 10 年生蓝桉 (*E. globulus*) 林的年均净生产力 (7.688 t hm⁻² a⁻¹)^[28],高于永安市 4 年和 7 年生尾巨桉 (*E. urophylla* × *E. grandis*) 林分年均净生产力 (分别为 17.70 和 16.11 t hm⁻² a⁻¹)、3 年和 4 年生巨尾桉 (*E. grandis* × *E. urophylla*) 人工林林分年均净生产力 (分别为 13.60 和 13.83 t hm⁻² a⁻¹)、3 年和 6 年生巨桉人工林林分年均净生产力 (分别为 12.16 和 10.36 t hm⁻² a⁻¹)^[29];但低于湘南低山丘陵区 6 年生

巨尾桉丰产示范林(密度分别为 900、1125 和 1500 ind. hm^{-2} , 年均净生产力分别为 22.57、24.85 和 25.37 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)^[30], 比澳大利亚的 9.25 年生巨桉林分年均净生产力(29.62 $\text{t hm}^{-2} \text{a}^{-1}$)^[28]低, 说明雷州的桉树生产力较大, 还有很大的经营潜力。

在评价能源林的产量时, 不仅要考虑到其速生性的量化指标和最终干物质的获得量, 也要考虑到单位干物质的能量属性。灰分含量和热值是理想燃料的主要指标之一, 也是桉树作为能源树种的重要依据。Bhatt 等^[31]认为, 理想的植物燃料应具备热值高与灰分含量低的特点。本研究表明, 6 种密度下桉树木材的灰分含量为 0.87%~1.63%, 低于福建东山 7 种木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)小枝的(3.06%~5.98%)^[32]。干重热值为 18.04~18.42 kJ g^{-1} , 高于广东樟木头拖里桉(*E. torelliana*) (17.77 kJ g^{-1}) 和大花序桉(*E. cloeziana*) (17.67 kJ g^{-1})^[20], 与广东樟木头巨桉(18.31 kJ g^{-1})与粗皮桉(18.18 kJ g^{-1})相当^[20], 低于海南尖峰岭窿缘桉(*E. exserta*)(19.43~21.99 kJ g^{-1})^[33]。可见, DH201 具有较高的热值和较低的灰分, 符合能源树种的能量属性特征要求。

能源林的经营就是获得更多的能量, 造林密度过大或过小都不利于林分的生长, 最终也影响能源林的产量。造林密度的确定是能源林培育技术中的关键环节, 本文对不同密度下桉树能源林林分的生长量、生物量进行了研究, 结果表明造林密度为 2500 ind. hm^{-2} , 2 年生的林分蓄积量、生物量最大, 因此, 我们认为 2500 ind. hm^{-2} 是该能源林的最适宜密度, 这与澳大利亚和巴西的桉树能源林适宜造林密度(2268 ind. hm^{-2})^[7,11]接近, 这对发展和完善桉树能源林培育技术有着十分重要的意义。

参考文献

- [1] Chen S X(陈少雄), Liu J F(刘杰锋), Sun Z J(孙正军), et al. Superiority, situation and potential of *Eucalyptus* for bioenergy [J]. *Biol Chem Eng(生物质化学工程)*, 2006, 40(Supp. 1): 119-128.(in Chinese)
- [2] Kang S Z(康树珍), Jia L M(贾黎明), Peng Z D(彭祚登), et al. Progress on the species choice and silvicultural practices of fuel energy forest [J]. *World For Res(世界林业研究)*, 2007, 20(3): 27-33.(in Chinese)
- [3] Chinese Academy of Forestry Science and Technology Information Institute(中国林业科学研究院科技情报所). *Forestry Energy* [R]. Beijing: Chinese Academy of Forestry Science and Technology Information Institute, 1982: 24-28.(in Chinese)
- [4] Debell S D, Clendenen G W, Harrington C A. Tree growth and stand development in short-rotation *Populus* plantings: 7-year results for two clones at three spacings [J]. *Biomass Bioenergy*, 1996(11): 253-269.
- [5] Christian A, Larson E D. Bioenergy and land-use competition in Northeast Brazil [J]. *Energy Sustain Dev*, 2000, 4(3): 64-66.
- [6] Sims R E H, Maiava T G, Bullock B T. Short rotation coppice tree species selection for woody biomass production in New Zealand [J]. *Biomass Bioenergy*, 2001, 20: 329-335.
- [7] Mead D J. Opportunities for improving plantation productivity, How much? How quickly? How realistic? [J] *Biomass Bioenergy*, 2005, 28: 249-266.
- [8] Zhou Y M(周元满), Xie Z S(谢正生), Liu X T(刘新田). Density effects of *Eucalyptus urophylla* U6 clone plantations [J]. *Guangdong For Sci Techn(广东林业科技)*, 2004, 20(4): 39-42.(in Chinese)
- [9] Christersson L, Sennerhy-Forsse L. Willow and poplar research and plantations in Swedn today [J]. *Swed Univ Agri Sci*, 1995, 28(2): 62-67.
- [10] Granhall U. Biological fertilization [J]. *Biomass Bioenergy*, 1994, 6(1/2): 81-91.
- [11] Brik E M, Turner J. Response of flooded gum (*E grandis*) to intensive cultural treatment biomass and nutrient content of eucalypt plantations and native forests [J]. *For Ecol Manag*, 1992, 47: 1-28.
- [12] Wang H Y(王辉杨). Analysis of the effect different ground clearance and planting density on the growth of *Eucalyptus grandis* [J]. *Jiangsu For Sci Techn(江苏林业科技)*, 2007, 34(3): 9-12.(in Chinese)
- [13] Zhang S H(张顺恒), Jiang J D(蒋家淡), Cai M A(蔡明安), et al. Studies on the suitable planting density of *Eucalyptus* short-cycle industrial raw material forests [J]. *Fujian For Sci Techn(福建林业科技)*, 2000, 27(2): 26-29.(in Chinese)
- [14] Huang B L(黄宝灵), Li C Q(吕成群), Meng Y C(蒙钰钗), et al. Effects of different planting densities on the growth, output and wood properties of *Eucalyptus urophylla* [J]. *Sci Silv Sin(林业科学)*, 2000, 36(1): 81-90.(in Chinese)
- [15] Qiu W J(邱文金). The experiment on the different afforestation density of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* in western Fujian Mountains [J]. *J Fujian For Sci Techn(福建林业科技)*, 2006, 33(2): 123-125.(in Chinese)
- [16] Ding G J(丁贵杰). Study on biomass and productivity of masson pine planting stand I. Biomass and density effect of different planting density [J]. *J Fujian Coll For(福建林学院学报)*, 2003, 23(1): 34-38.(in Chinese)
- [17] Li Z H(李志辉), Chen S X(陈少雄), Xie Y J(谢耀坚), et al. Effects of stand density upon the biomass and productivities on *Eucalyptus urograndis* [J]. *J CS Univ For Techn(中南林业科技大学学报)*, 2008, 28(4): 49-55.(in Chinese)
- [18] Chen S X(陈少雄), Li Z H(李志辉), Li T H(李天会), et al. Economic analysis of eucalypt plantation with different initial spacing [J]. *For Res(林业科学研究)*, 2008, 21(1): 1-6.(in Chinese)
- [19] Zhou Q Y(周群英), Xie Y J(谢耀坚), He G D(何国达), et al. Application "root sun" on raising rooting rate of *Eucalyptus* spp.

- [J]. Chin For Sci Techn(林业科技开发), 2004, 18(4): 50-53.(in Chinese)
- [20] Zhou Q Y(周群英), Chen S X(陈少雄), Wu Z H(吴志华), et al. Energy characteristics five *Eucalyptus* species in Zhangmutou forest farm, Guangdong Province [J]. J Trop Subtrop Bot(热带亚热带植物学报), 2009, 17(6): 549-555.(in Chinese)
- [21] Zhou Q Y(周群英), Chen S X(陈少雄), Wu Z H(吴志华), et al. Ash contents and caloric values of five Eucalypt species [J]. Chin J Trop Crops(热带作物学报), 2009, 30(2): 1-6.(in Chinese)
- [22] Sun G F(孙国夫), Zheng Z M(郑志明), Wang Z Q(王兆骞). Dynamics of caloric values of rice [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1993, 12(1): 1-4.(in Chinese)
- [23] Huang X Z(黄锡泽), Zhou G F(周国福), Li H W(李宏伟), et al. Research on planting spacing of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation [J]. Guangxi For Sci(广西林业科学), 2005, 34(1): 5-12.(in Chinese)
- [24] Chen J B(陈健波), Zhang L P(张丽萍), Yang C Q(杨春琴), et al. Different densities and configuration with different plant and line spacing for *Eucalyptus urophylla* and its effects [J]. Guangxi For Sci(广西林业科学), 2005, 34(1): 5-12.(in Chinese)
- [25] Chen X(陈孝), Ou S(欧生), Liang X M(梁学明), et al. Growth comparison of 5 DH hybrid *Eucalyptus* clones [J]. Guangdong For Sci Techn(广东林业科技), 2001, 17(2): 11-14.(in Chinese)
- [26] Zhang Y W(张英武), Wei R P(魏润鹏), Mu H T(沐海涛). Role of planting density and material in the early performance of short-rotation eucalypt plantation [J]. Guangdong For Sci Techn(广东林业科技), 2006, 22(3): 8-12.(in Chinese)
- [27] Ye S M(叶绍明), Zheng X X(郑小贤), Yang M(杨梅), et al. Biomass and productivity of stratified mixed stands of *Eucalyptus urophylla* and *Acacia mangium* [J]. J Beijing For Univ(北京林业大学学报), 2008, 30(3): 37-43.(in Chinese)
- [28] Chen B G(陈北光), Fu G X(傅冠旭), Chen X(陈孝). The aboveground biomass and productivity of two kinds of *Eucalyptus* plantation [C]// Zeng T S(曾天勋). The Unit Step Function Model for Crown Diameter of Short Rotation *Eucalyptus*. Beijing: Chinese Forestry Press, 1995: 58-65.(in Chinese)
- [29] Zhang Q(张琼), Hong W(洪伟), Wu C Z(吴承祯), et al. Comparative analyses on biomass and productivity of different *Eucalyptus* plantations [J]. J Fujian Coll For(福建林学院学报), 2006, 26(3): 218-223.(in Chinese)
- [30] Yao D H(姚东和), Yang M S(杨民胜), Li Z H(李志辉). The stand density affected biomass and productivity of *Eucalyptus grandis* × *urophgla* [J]. J CS For Univ(中南林学院学报), 2000, 20(3): 20-23.(in Chinese)
- [31] Bhatt B P, Todaria N P. Fuel wood characteristics of some mountain trees and shrubs [J]. Biomass, 1990(2): 233-238.
- [32] Lin Y M(林益明), Guo Q R(郭启荣), Ye G F(叶功富), et al. Characteristics of matter and energy of some Casuarinaceae species in Dongshan county, Fujian Province [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2007, 24(10): 2217-2224.(in Chinese)
- [33] Li Y D(李意德), Wu Z M(吴仲民), Zeng Q B(曾庆波), et al. Caloric values of main species in tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan Province [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1996, 21(1): 1-10.(in Chinese)