

文章编号: 1001-1498(2010) 01-0018-07

尾细桉等 5 种桉树无性系生物量和能量的比较研究

周群英¹, 陈少雄¹, 韩斐扬¹, 陈文平²,
李天会¹, 吴志华¹, 简明²

(1. 国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2. 中国国营林场开发总公司国营雷州林业局, 广东 遂溪 524348)

摘要: 对广东廉江石岭林场尾细桉等 5 种 7.5 年生桉树无性系的生物量和能量进行了研究。结果表明: 不同无性系各组分生物量的分布规律均以干的最大、叶的最小, 枝、根、皮介于中间; 5 种桉树无性系各分组的生物量排序为: 赤桉、尾细桉、巨尾桉为干 > 根 > 枝 > 皮 > 叶, 雷林 1 号桉为干 > 根 > 皮 > 枝 > 叶, 尾叶桉为干 > 枝 > 根 > 皮 > 叶。人工林生物量现存量的排列顺序为尾细桉 ($161.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 巨尾桉 ($127.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 尾叶桉 ($112.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 赤桉 ($83.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 雷林 1 号桉 ($71.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)。各组分的灰分含量各不相同, 以叶最高 (4.08% ~ 6.88%), 干最低 (0.17% ~ 0.43%)。不同组分的干质量热值介于 $17.94 \sim 21.06 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 间, 去灰分热值介于 $18.57 \sim 22.12 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 间, 均以叶的值最高。植株体的平均干质量热值和去灰分热值分别为 $19.02 \sim 19.32$ 、 $19.49 \sim 19.85 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 平均干质量热值的排序为雷林 1 号桉 > 尾叶桉 > 尾细桉 > 赤桉 > 巨尾桉, 平均去灰分热值的排序为雷林 1 号桉 > 赤桉 > 尾叶桉 > 尾细桉 > 巨尾桉。5 种桉树无性系林的能量现存量在 $1360.73 \sim 3067.47 \text{ GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$, 大小顺序为尾细桉 > 巨尾桉 > 尾叶桉 > 赤桉 > 雷林 1 号桉。综合生物量和能量现存量分析, 尾细桉选作能源树种最为理想, 巨尾桉和尾叶桉次之, 赤桉与雷林 1 号桉最差。

关键词: 桉树无性系; 生物量; 能量

中图分类号: S792.39

文献标识码: A

Comparison Study on Biomass and Energy of Five Eucalypt Clones

ZHOU Qun-ying¹, CHEN Shao-xiong¹, HAN Fei-yang¹, CHEN Wen-ping², LI Tian-hui¹, WU Zhi-hua¹, JIAN Ming²

(1. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 2. Leizhou Forestry Bureau of Chinese General Development Corporation of State-owned Forest Farm, Suixi 524248, Guangdong, China)

Abstract: The biomass and energy of 7.5-year-old trees of *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* and other four eucalypt clones, growing in Shiling Forest Farm of Lianjiang City in Guangdong Province were studied. The results showed that the biomass of various above and below ground components of trees were significantly different with stem-wood having the highest biomass and leaves the lowest; biomasses of branches, roots and bark were intermediate between that of stem-wood and leaves. The order of various components by decreasing biomass for the clones of *E. camaldulensis*, *E. urophylla* × *E. tereticornis* and *E. grandis* × *E. urophylla* was stem-wood > roots > branches > bark > leaves. For the clone *E. Leizhou* No. 1 the order was stem-wood > roots > bark > branches > leaves and for the clone of *E. urophylla* the order was stem-wood > branches > roots > bark > leaves. The clones by decreasing order of total retained biomass of plantation were: *E. urophylla* × *E. tereticornis* ($161.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > *E. grandis* × *E. urophylla* ($127.96 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > *E. urophylla* ($112.60 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > *E. camaldulensis* ($83.81 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > *E. Leizhou* No. 1 ($71.36 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$). Ash contents of leaves of different clones ranged from 4.08% to 6.88%, and were the highest of all components, whilst the ash contents of stem-wood of different clones ranged

收稿日期: 2009-04-07

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) 和国家林业局 948 项目 (2007-4-12) 的部分内容

作者简介: 周群英 (1978—), 女, 工程师, 主要从事桉树培育研究. E-mail: qyzhou999@sina.com

from 0.17% to 0.43% and were the lowest of all components. Gross caloric values (GCV) and ash free caloric values (AFCV) of different components ranged from 17.94 to 21.06 kJ · g⁻¹ and 18.57 to 22.12 kJ · g⁻¹ respectively. Of all the components, leaves had the highest GVCs and AFCVs. The average GVC and AFCV of the five clones ranged from 19.02 to 19.32 kJ · g⁻¹ and 19.49 to 19.85 kJ · g⁻¹ respectively. The order of five clones by decreasing GCV was *E. Leizhou* No. 1 > *E. urophylla* > *E. urophylla* × *E. tereticornis* > *E. camaldulensis* > *E. grandis* × *E. urophylla* and by decreasing AFCV the order was *E. leizhou* No. 1 > *E. camaldulensis* > *E. urophylla* > *E. urophylla* × *E. tereticornis* > *E. grandis* × *E. urophylla*. The average energy values of five clone plantations ranged from 1 360.73 to 3 067.47 GJ · hm⁻² with the decreasing order: *E. urophylla* × *E. tereticornis* > *E. grandis* × *E. urophylla* > *E. urophylla* > *E. camaldulensis* > *E. Leizhou* No. 1. According to biomass and energy, *E. urophylla* × *E. tereticornis* was the best clone for bioenergy, followed by both the *E. grandis* × *E. urophylla* and *E. urophylla* and the poorest were *E. camaldulensis* and *E. Leizhou* No. 1.

Key words: eucalypt clone; biomass; energy

植物热值是植物产品能量水平的一种度量,能反映植物对太阳辐射能的利用状况,研究植物热值的重要意义在于它能反映组织各种生理活动的变化和植物生长状况的差异^[1]。各种环境因子对植物生长的影响,可从热值变化上反映出来,因此热值能有效地评价植物的生长状况^[2]。早在 20 世纪 30 年代 Long^[3] 率先对植物热值开展较系统的研究,此后生态学家对其给予极大关注,中外学者借助热值指标研究生态系统物质循环和能量转化规律日趋广泛。研究者认为,热值已成为评价森林生态系统能量流及其对太阳能固定和累积效率的重要参数^[4]。我国对植物热值的研究起步较晚,最早开始的是杨福国等^[5]于 1978 年对高寒草甸地区常见植物热值的测定,之后相继开展的相关研究有水稻 (*Oryza sativa* L.)^[1,6]、苜蓿属 (*Medicago* L.) 植物^[7]和人工针叶林^[8]、热带及亚热带天然林和常绿阔叶林等^[9-13]。有关桉树 (*Eucalyptus* spp.) 热值的研究亦有部分报道,如黄世能等^[14]研究了海南琼海桉树与相思 (*Acacia* spp.) 混交林林分能量的分配,测定了雷林 1 号桉 (*E. leizhou* NO 1) 和窿缘桉 (*E. exserta* F. Muell.) 不同器官即叶、枝、干、根的热值,为桉树与其他树种合理混交造林提出了指导性意见;杨成源等^[15]对滇中高原及干热河谷包括巨桉 (*E. grandis* W. Hill ex Maiden)、蓝桉 (*E. globulus* Labill.)、赤桉 (*E. camaldulensis* Dehnh.) 等 9 种桉树在内的薪材树种开展热值测定和研究,比较不同品种及其不同器官的热值差异并确定了巨桉、直干桉 (*E. maidenii* F. V. Muell.) 和赤桉为优质薪材树种;周群英等^[16]研究了广东樟木头巨桉等 5 种桉树的热值,通过比较分析,得出巨桉选作能源树种栽培最为理想的结论。

生物量是指生态系统中积累的植物有机物总量,

可作为研究森林生态系统结构和功能的重要依据,对深入研究森林生态系统生物地球化学循环、碳汇功能、评价人工林生态系统生产力与环境因子之间的关系具有重要的科学价值^[17-18]。生物量最早的研究于 1876 年开始,并从 20 世纪 50 年代初期起世界日益重视森林生物量研究,相关学者对地球上主要森林植被类型的生物量和生产力及其区域地理分布规律、植被生产力与气候因子和植物群落分布之间的关系进行了调查和资料收集^[19]。在国际生物学计划期间,全球森林生物量的研究工作得到很大的发展^[20]。我国对生物量的研究始于 20 世纪 70 年代末,先后建立了主要森林树种的生物量测定相对生长方程^[21-22]。结合生物量与能量能更好地衡量不同生态系统或不同植物类型的结构与功能基础,可为林分的物质循环和能量流动及对林分的开发和利用提供基础数据,相关的研究主要有沿海防护林^[23-25]、针叶林^[26-29]、毛竹 (*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)^[30-32]等,桉树亦有少量研究^[14,16]。

桉树在我国南方工业原料林建设中占有重要地位,不仅是速生商品林的当家树种,还是很好的林木生物质能源原材料^[33];其材质坚硬,嫩枝富含挥发性油,树叶富含桉叶油,并且具有生长迅速、总生物量大、轮伐期短等优点,作为生物质能源利用具有显著优势,可直接作为薪材使用,用于生物质发电及生产生物柴油等^[34]。本文从生物量与能量的角度对广东廉江石岭林场尾细桉 (*E. urophylla* S. T. Blake × *E. tereticornis* Smith) 等 5 种桉树无性系的生物量现存量、不同组分的热值及能量现存量进行研究,比较不同无性系生物量与能量的差异,以期为发展桉树生物质能源提供理论依据。

1 试验地及林分概况

试验地位于广东省廉江市的国营雷州林业局石岭林场(109°45' ~ 110°30' E, 21°25' ~ 21°55' N), 属亚热带海洋性季风气候, 7 月平均气温 28℃, 1 月平均气温 14℃, 年平均气温 22.9℃, 年平均日照 1 884 h; 4—9 月为雨季, 年平均降水量 1 600 ~ 1 900 mm; 地势平坦, 成土母质为浅海沉积物, 土层较深, 在 75 cm 以上, 但土壤肥力低下, 严重缺 P 和 K, 土壤呈强酸反应, pH 值为 4.9。

试验林于 2001 年 4 月采用 5 种不同桉树无性系即赤桉、雷林 1 号桉、尾叶桉(*E. urophylla* S. T. Blake)、尾细桉和巨尾桉(*E. grandis* W. Hill ex. Maiden × *E. urophylla* S. T. Blake) 营造, 株行距 2 m × 2 m (2 500 株 · hm⁻²), 行向东西。穴规格为 50 cm × 50 cm × 40 cm, 造林前施复合肥 0.5 kg · 穴⁻¹, 定植后 3 个月追施复合肥 0.5 kg · 株⁻¹, 此后第 2、3 年的 4 月份各追肥 1 次, 肥料为复合肥 0.3 kg · 株⁻¹ + 尿素 0.2 kg · 株⁻¹, 不同桉树无性系的抚育管理措施完全一致。林下灌木、草本稀少, 主要物种有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hassk.)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis* (Burm.) Underw.)、银柴(*Aporosa dioica* (Roxb.) Muell. Arg.)、野牡丹(*Melastoma candidum* D. Don)、五节芒(*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb.) 等。各林分状况见表 1。

表 1 5 种桉树无性系的林分状况

桉树无性系	平均树高/m	平均胸径/m	造林密度/(株 · hm ⁻²)	林木保存率/%	现实密度/(株 · hm ⁻²)
赤桉	17.4	9.5	2 500	89	2 225
雷林 1 号桉	15.7	8.8	2 500	90	2 250
尾细桉	20.2	12.2	2 500	92	2 300
巨尾桉	19.8	11.0	2 500	86	2 150
尾叶桉	17.1	11.5	2 500	78	1 950

2 研究方法

2.1 生物量的测定

2008 年 10 月在各试验林随机设立 3 块 20 m × 20 m 的样地, 各样地间距 30 ~ 50 m, 对样地内每木进行检尺, 在各径级(2 cm 为一径级)选取平均木 3 株。平均木砍伐后, 地上部分采用分层切割法^[35]测定干、皮、枝、叶的鲜质量, 其中树干以 2 m 为一区段进行解析。地下部分根系采用挖掘法, 在根系的主要分布层内(0 ~ 20、21 ~ 40、41 ~ 60 cm) 将根挖出, 测定根桩、大根(> 15 mm)、中根(10 ~ 15

mm)、小根(5 ~ 10 mm)、细根(< 5 mm)的鲜质量。采集伐倒的径级平均木不同组分鲜质量样品 500 g 带回实验室, 在 80℃ 的条件下烘干至恒质量, 计算样品的含水率和绝干质量生物量, 求得径级平均木的单株生物量后乘以该径级的林木株数得到各径级的林分生物量, 再将 5 个桉树无性系各径级的林分生物量累加得出各无性系的林分总生物量。

2.2 热值的测定

对伐倒的平均木进行热值样品(树干、树皮、树枝、叶片及树根各 1 份)采集, 每株平均木共取样品 5 份, 每份 500 g, 其中树干(不含皮)和树皮取自胸径处, 树枝和叶片按冠幅不同层次和方位混合取样, 树根采集时将不同径级的根系按同等比例混合。样品先用 105℃ 烘 10 min, 之后在 80℃ 的条件下烘干至恒质量, 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 型电脑自动热量计测定样品的干质量热值, 测定前用苯甲酸校正仪器, 测定环境控制在 20℃ 左右。每个样品至少重复测定 3 次, 误差控制在 ±0.200 kJ · g⁻¹ 范围以内。

用干灰分化法测定灰分含量, 方法见文献[16]。采用干质量热值与灰分含量计算样品的去灰分热值。

$$\text{去灰分热值} = \text{干质量热值} / (1 - \text{灰分含量})$$

2.3 数据分析

用 one-way ANOVA 进行单因素方差分析, 用邓肯检验法对相关指标进行多重比较, 数据处理和分析软件为 SPSS 13.0。

3 结果与分析

3.1 生物量现存量及其分配

生物量是衡量人工林经营效果的重要指标, 其大小反映了林分有机物质生产与积累的水平^[36]。由表 2 可知: 5 种桉树无性系各组分占林分总生物量的比例分别为: 叶 3.13% ~ 4.69%, 枝 6.16% ~ 8.98%, 根 7.92% ~ 10.15%, 干 69.83% ~ 77.71%, 皮 4.97% ~ 7.96%。5 种桉树无性系各组分生物量的大小顺序有所不同, 其中赤桉、尾细桉、巨尾桉均为干 > 根 > 枝 > 皮 > 叶, 雷林 1 号桉为干 > 根 > 皮 > 枝 > 叶, 尾叶桉为干 > 枝 > 根 > 皮 > 叶, 但均以干的生物量最大, 叶的最小。5 个无性系中, 尾细桉生长最好, 其现存总生物量最好, 为 161.60 t · hm⁻², 分别是巨尾桉、尾叶桉、赤桉、雷林 1 号桉的

1.26、1.44、1.93、2.26 倍。林木保存率直接影响林分的总生物量,本研究的 5 个无性系中,尾叶桉保存

率最低(仅 78%),低保存率使该林分原本具有较高的总生物量显著降低。

表 2 5 种桉树无性系的现存生物量及其分配

$t \cdot \text{hm}^{-2}$

桉树无性系	叶	枝	根	干	皮	合计
赤桉	2.62(3.13%)	5.16(6.16%)	6.64(7.92%)	65.13(77.71%)	4.26(5.08%)	83.81(100%)
雷林 1 号桉	2.81(3.94%)	5.19(7.27%)	7.24(10.15%)	50.44(70.68%)	5.68(7.96%)	71.36(100%)
尾细桉	5.63(3.48%)	11.78(7.29%)	15.82(9.79%)	120.34(74.47%)	8.03(4.97%)	161.60(100%)
巨尾桉	4.92(3.85%)	10.67(8.34%)	11.65(9.10%)	91.48(71.49%)	9.24(7.22%)	127.96(100%)
尾叶桉	5.28(4.69%)	10.11(8.98%)	10.03(8.91%)	78.63(69.83%)	8.55(7.59%)	112.60(100%)

注:生物量为绝干质量,括号内数据为各组分所占比例。

3.2 不同组分的热值

3.2.1 灰分含量 由表 3 可知:各无性系不同组分的灰分含量各不相同,叶 4.08% ~ 6.88%,枝 1.26% ~ 2.99%,根 1.21% ~ 2.89%,干 0.17% ~ 0.43%,皮 2.55% ~ 4.06%。灰分含量的高低与植物吸收的元素量有关,其含量的高低可指示植物或器官富集元素的能力^[37]。在各组分中叶的灰分含量最高,而干的最低,说明叶片吸收元素的能力较强。这是由于叶作为植物进行光合作用、生理活动最活跃的主要器官,N、P、K、Na、Mg、Cl 等营养元素从土壤进入根系木质部导管后随蒸腾液流到达叶片,随后累积在叶中密切参与植物的生命过程,因此叶的灰分含量最高;而在高度木质化的干中,其输导系统吸收积累元素较少,因而灰分含量较低^[38]。各组分灰分含量在不同无性系间的大小顺序因种而异,赤桉、雷林 1 号桉与尾叶桉为叶 > 皮 > 根 > 枝 > 干,而尾细桉与巨尾桉则为叶 > 皮 > 枝 > 根 > 干。

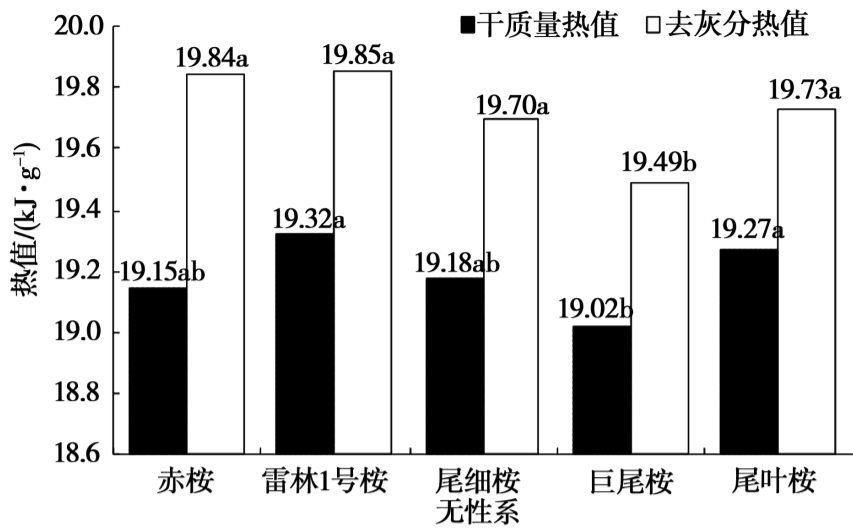
3.2.2 干质量热值 单位干物质在完全燃烧时所释放的总热量称为干质量热值。由表 3 可见:各组分的干质量热值为 17.94 ~ 21.06 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,其中,叶的干质量热值最高(20.07 ~ 21.06 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$),皮的最低(17.94 ~ 18.59 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$),枝、根、干的干质量热值分别为 19.13 ~ 19.60、18.71 ~ 19.40、18.54 ~ 18.85 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。5 种桉树无性系不同组分的干质量热值差异显著性的检验结果为:赤桉、雷林 1 号桉与巨尾桉一致,而尾细桉与尾叶桉则有所不同。各无性系不同组分的干质量热值大小顺序为:赤桉、雷林 1 号桉、尾叶桉均为叶 > 枝 > 根 > 干 > 皮;尾细桉为叶 > 枝 > 干 > 根 > 皮;巨尾桉为叶 > 根 > 枝 > 干 > 皮。叶具有较高的热值,这与许多研究的结论一致^[39-43],这是因为叶的组成物质含有较多能量有机物,如蛋白质、脂肪等,并且在光合作用中叶片还能合成一些高能有机物质,故其热值较高^[44]。

由图 1 可知:5 个桉树无性系植株体的平均干质量热值为 19.02 ~ 19.32 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,雷林 1 号桉的干质量热值最高,依次为尾叶桉、尾细桉、赤桉和巨尾桉;巨尾桉与其它 4 个无性系差异显著,赤桉与尾细桉、雷林 1 号桉与尾叶桉虽有差别,但均未达显著水平($P > 0.05$)。

表 3 5 种桉树无性系各组分的灰分含量及热值

桉树无性系	组分	灰分含量/%	干质量热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)	去灰分热值 / ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)
赤桉	叶	6.88 ± 0.63 a	20.31 ± 0.19 a	21.81 ± 0.35 a
	枝	2.76 ± 1.20 b	19.60 ± 0.67 b	20.16 ± 0.94 b
	根	2.89 ± 2.54 b	19.24 ± 0.14 b	19.82 ± 0.44 b
	干	0.43 ± 0.09 c	18.66 ± 0.10 c	18.74 ± 0.10 c
	皮	3.78 ± 0.53 b	17.97 ± 0.27 d	18.67 ± 0.19 c
	平均	3.35 ± 2.43	19.15 ± 0.87	19.84 ± 1.26
雷林 1 号桉	叶	4.80 ± 0.17 a	21.06 ± 0.15 a	22.12 ± 0.12 a
	枝	1.26 ± 0.27 cd	19.46 ± 0.26 b	19.71 ± 0.32 b
	根	2.58 ± 2.37 bc	19.32 ± 0.36 b	19.83 ± 0.16 b
	干	0.30 ± 0.05 d	18.69 ± 0.23 c	18.75 ± 0.24 c
	皮	4.06 ± 0.25 ab	18.07 ± 0.13 d	18.83 ± 0.19 c
	平均	2.60 ± 1.96	19.32 ± 1.06	19.85 ± 1.27
尾细桉	叶	4.87 ± 0.24 a	20.44 ± 0.18 a	21.48 ± 0.18 a
	枝	2.88 ± 1.69 b	19.56 ± 0.05 b	20.14 ± 0.32 b
	根	1.48 ± 0.12 c	18.71 ± 0.14 c	18.99 ± 0.12 cd
	干	0.17 ± 0.02 d	18.72 ± 0.30 c	18.75 ± 0.30 d
	皮	3.44 ± 0.88 b	18.48 ± 0.09 c	19.14 ± 0.26 c
	平均	2.57 ± 1.83	19.18 ± 0.76	19.70 ± 1.06
巨尾桉	叶	4.08 ± 0.36 a	20.23 ± 0.07 a	21.09 ± 0.02 a
	枝	2.99 ± 0.52 b	19.13 ± 0.02 b	19.72 ± 0.11 b
	根	1.21 ± 0.66 c	19.25 ± 0.25 b	19.48 ± 0.24 b
	干	0.29 ± 0.19 d	18.54 ± 0.12 c	18.59 ± 0.09 c
	皮	3.38 ± 0.07 b	17.94 ± 0.23 d	18.57 ± 0.22 c
	平均	2.39 ± 1.49	19.02 ± 0.80	19.49 ± 0.96
尾叶桉	叶	4.32 ± 0.08 a	20.07 ± 0.05 a	20.98 ± 0.07 a
	枝	2.00 ± 1.16 b	19.46 ± 0.32 b	19.86 ± 0.09 b
	根	2.24 ± 0.94 b	19.40 ± 0.09 b	19.84 ± 0.20 b
	干	0.28 ± 0.06 c	18.85 ± 0.36 c	18.90 ± 0.36 c
	皮	2.55 ± 0.35 b	18.59 ± 0.21 c	19.07 ± 0.15 c
	平均	2.28 ± 1.46	19.27 ± 0.57	19.73 ± 0.78

注:数据后不同小写字母表示组分间差异达 0.05 显著水平。



数据后不同小写字母表示无性系间差异达 0.05 显著水平 ($P < 0.05$)

图1 5种桉树无性系的热值差异比较

3.2.3 去灰分热值 本研究为了消除灰分含量差异对热值的影响,同时还计算了去灰分热值。由表3可知:所有组分的去灰分热值在 18.57 ~ 22.12 kJ·g⁻¹间,不同组分的去灰分热值分别为叶 20.98 ~ 22.12 kJ·g⁻¹、枝 19.71 ~ 20.16 kJ·g⁻¹、根 18.99 ~ 19.84 kJ·g⁻¹、干 18.59 ~ 18.90 kJ·g⁻¹、皮 18.57 ~ 19.14 kJ·g⁻¹,以叶的最高。各组分的去灰分热值除尾细桉外,其余4个无性系的差异显著性检验结果一致。

各无性系不同组分的去灰分热值大小顺序为:赤桉与巨尾桉为叶 > 枝 > 根 > 干 > 皮,雷林1号桉为叶 > 根 > 枝 > 皮 > 干,尾细桉为叶 > 枝 > 皮 > 根 > 干,尾叶桉为叶 > 枝 > 根 > 皮 > 干。去除灰分后,除赤桉外,其余4个无性系各组分热值分布规律与

干质量热值有所不同,可见,灰分含量是引起干质量热值变化的重要原因。

植株体的平均去灰分热值的高低顺序为(图1):雷林1号桉(19.85 kJ·g⁻¹) > 赤桉(19.84 kJ·g⁻¹) > 尾叶桉(19.73 kJ·g⁻¹) > 尾细桉(19.70 kJ·g⁻¹) > 巨尾桉(19.49 kJ·g⁻¹)。差异显著性检验结果表明:巨尾桉的去灰分热值与其余4个无性系差异显著($P < 0.05$),但赤桉、雷林1号桉、尾细桉、尾叶桉4个无性系间无显著差异($P > 0.05$)。

3.3 能量现存量及其分配

能量现存量实际为植物或林分所固定的太阳能总量,由各组分的平均热值与各组分的现存生物量相乘累加而得^[14,44],它比生物量能更好地体现植物或群落在现有生态条件下所固定的太阳能总量。由表4可知:各组分占林分总能量的比例为:叶 3.59% ~ 5.13%,枝 6.53% ~ 9.30%,根 8.26% ~ 10.55%,干 68.81% ~ 76.63%和皮 4.99% ~ 7.86%,其中,叶、枝、皮的总能量较小,均低于10%。5种桉树无性系不同组分能量的大小顺序与不同组分生物量的排列顺序一致。尾细桉林的能量现存量最高,为 3 067.47 GJ·hm⁻²;雷林1号桉最低,仅 1 360.73 GJ·hm⁻²,赤桉、巨尾桉、尾叶桉介于二者之间。由于5种桉树无性系组分的平均热值差距不大,因此林分生物量的大小直接决定了林分能量现存量的优势。

表4 5种桉树无性系的能量现存量及其分配

GJ·hm⁻²

桉树无性系	叶	枝	根	干	皮	合计
赤桉	57.14 (3.59%)	104.03 (6.53%)	131.60 (8.26%)	1 220.54 (76.63%)	79.53 (4.99%)	1 592.84 (100%)
雷林1号桉	62.16 (4.57%)	102.29 (7.52%)	143.57 (10.55%)	945.75 (69.50%)	106.95 (7.86%)	1 360.73 (100%)
尾细桉	120.93 (3.94%)	237.25 (7.73%)	300.42 (9.79%)	2 255.17 (73.52%)	153.69 (5.01%)	3 067.47 (100%)
巨尾桉	103.76 (4.30%)	210.41 (8.72%)	226.94 (9.40%)	1 700.61 (70.47%)	171.59 (7.11%)	2 413.32 (100%)
尾叶桉	110.77 (5.13%)	200.78 (9.30%)	199.00 (9.21%)	1 486.11 (68.81%)	163.05 (7.55%)	2 159.71 (100%)

注:括号内为各组分占林分总能量的比例,1GJ(吉焦) = 106 kJ

4 结论与讨论

(1) 5种桉树无性系各组分的生物量均以干最大、叶最小,树干生物量占整个树体生物量的69.83%以上,说明光合作用的主要产物基本用于增加树干的生物量,而树干生物量的有效增加直接提高了林分的木材蓄积量。有研究表明,在桉树生长旺盛期(第1~3年),叶片占整体生物量的比例较高,因为此时需要大量的叶片才能满足桉树营养生长对光合产物的需求,随着树龄增加(第3年后)叶片及其它部分的生物量及总生物量亦会不断增加,

但此时生物量的累积主要以树干为主,其它部位的生物量增幅缓慢,因此,桉树在不同年龄阶段,其生物量分配也不同^[45]。5种桉树无性系人工林现存总生物量的大小顺序为:尾细桉(161.60 t·hm⁻²) > 巨尾桉(127.96 t·hm⁻²) > 尾叶桉(112.60 t·hm⁻²) > 赤桉(83.81 t·hm⁻²) > 雷林1号桉(71.36 t·hm⁻²)。本研究在土壤贫瘠的立地条件下,尾细桉林较其它4个无性系具有较高的现存生物量且林木保存率最高(92%),表明尾细桉具有较好的适应性和生长性能。林分生物量与造林密度密切相关,丁贵杰^[46]研究发现,单株生物量呈现随密

度增加而减小的趋势。本研究在试验林造林密度改变时,各无性系林分的现存生物量亦发生相应改变,因此营造桉树能源林应合理配置林分密度,以实现能量产出达最大化。

(2) 5 种桉树无性系各组分的灰分含量各不相同,叶的最高 4.08% ~ 6.88%,干的最低 0.17% ~ 0.43%;植株体的平均灰分含量排序为赤桉(3.35%) > 雷林 1 号桉(2.60%) > 尾细桉(2.57%) > 巨尾桉(2.39%) > 尾叶桉(2.28%),赤桉的灰分含量最高,表明赤桉富集元素的能力较强。理想的植物燃料须符合灰分含量低的要求,因此,在选择优良的桉树能源树种时,应结合灰分含量指标进行。

(3) 5 种桉树无性系各组分的干质量热值为 17.94 ~ 21.06 kJ · g⁻¹,去灰分热值为 18.57 ~ 22.12 kJ · g⁻¹,均以叶的热值最高。植株体的平均干质量热值为 19.02 ~ 19.32 kJ · g⁻¹,去灰分热值为 19.49 ~ 19.85 kJ · g⁻¹。干质量热值受灰分含量的影响会有所变化,本研究的结果与之相符。如 5 种桉树无性系不同组分干质量热值与去灰分热值的大小排序,除赤桉外,其余 4 个无性系均发生改变,植株体的平均干质量热值也是如此,其排序为雷林 1 号桉 > 尾叶桉 > 尾细桉 > 赤桉 > 巨尾桉,而平均去灰分热值的排序则变为雷林 1 号桉 > 赤桉 > 尾叶桉 > 尾细桉 > 巨尾桉。干质量热值在能量生态学研究时将植物生物量转化成相应的能量具有实用价值,但去灰分热值能消除灰分含量对热值造成的影响,能更好地反映植物的能量属性^[47];所以,在比较不同类型的植物或不同立地条件类型同种植物的热值时应采用去灰分热值。由于植物热值是多因素共同作用的结果,不仅与植物自身营养物质组成密切相关,还受光强、土壤理化性质、日照长短等外界因素影响^[12, 48 - 49],所以不同植物其热值高低虽有一定规律,但不是恒定的。

(4) 5 种桉树无性系林的能量现存量为 1 360.73 ~ 3 067.47 GJ · hm⁻²,大小顺序为尾细桉 > 巨尾桉 > 尾叶桉 > 赤桉 > 雷林 1 号桉。

综合分析,5 种桉树无性系中尾细桉林的生物量和能量现存量均较好,在雷州半岛浅海沉积岩贫瘠土壤有较好的生长表现,具有较高的太阳能转化率和生产力,适宜选作能源树种,巨尾桉和尾叶桉次之。赤桉与雷林 1 号桉植株热值虽较高,但由于生长缓慢,总生物量小,林分能量现存量低且灰分含

量较高,作为能源树种不理想。

参考文献:

- [1] 孙国夫,郑志明,王兆骞. 水稻热值的动态变化研究[J]. 生态学杂志, 1993, 12(1): 1 - 4
- [2] 阮志平,李元跃,杨志伟,等. 三种棕榈植物的热值及灰分含量比较研究[J]. 广西植物, 2007, 27(6): 929 - 931
- [3] Long F L. Application of calorimetric methods to ecological research [J]. Plant Physiology, 1934, 9(2): 323 - 327
- [4] Golley F B. Energy values of ecological materials [J]. Ecology, 1960, 42(3): 581 - 584
- [5] 杨福国,何海菊. 高寒草甸地区常见植物热值的初步研究[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1983, 7(4): 280 - 287
- [6] 王方桃. 平原稻区农业生态系统能流计量的折能系数初步研究[J]. 生态学杂志, 1984, 3(6): 44 - 46
- [7] 毕玉芬,车伟光. 几种苜蓿属植物植株热值研究[J]. 草地学报, 2002, 10(4): 265 - 269
- [8] 刘世荣,蔡体久,柴一新,等. 落叶松人工林群落能量积累、分配、固定和转化的研究[J]. 生态学杂志, 1990, 9(6): 7 - 10
- [9] 林承超. 福州鼓山季风常绿阔叶林及其林缘几种植物叶热值和营养成分[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 832 - 836
- [10] 林 鹏,邵 成,郑文教. 福建和溪亚热带雨林优势植物叶的热值研究[J]. 植物生态学报, 1996, 20(4): 303 - 309
- [11] 李意德,吴仲民,曾庆波,等. 尖峰岭热带同地雨林主要种类能量背景值测定分析[J]. 植物生态学报, 1996, 21(1): 1 - 10
- [12] 任 海,彭少麟,刘鸿先,等. 鼎湖山植物群落及其主要植物的热值研究[J]. 植物生态学报, 1999, 23(2): 148 - 154
- [13] 林益明,林 鹏,李振基,等. 福建武夷山甜槠群落能量的研究[J]. 植物学报, 1996, 38(12): 989 - 994
- [14] 黄世能,郑海水,何克军. 桉树薪炭林混交试验 . 林分生物量和能量的分配研究[J]. 林业科学研究, 1991, 4(5): 545 - 549
- [15] 杨成源,张加研,李文政,等. 滇中高原及干热河谷种薪材树种热值研究[J]. 西南林学院学报, 1996, 16(4): 294 - 302
- [16] 周群英,陈少雄,吴志华,等. 巨桉等 5 种桉树的热值和灰分含量[J]. 热带作物学报, 2009, 30(2): 161 - 166
- [17] Somogyi Z, Cienciala E, Makipaa R, et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation[J]. European Journal of Forest Research, 2007, 126(2): 197 - 207
- [18] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high altitude maple forest of the west central Himalayas[J]. Ecological Research, 2008, 23(1): 41 - 49
- [19] 项文化,田大伦,闫文德. 森林生物量与生产力研究综述[J]. 中南林业调查规划, 2003, 22(3): 57 - 60
- [20] Cannell M G R. World Forest Biomass and Primary Production Data [M]. London: Academic Press, 1982
- [21] 潘维俦,李利村,高正衡. 杉木人工林生态系统中的生物产量及其生产力研究[J]. 中南林业科技, 1978(2): 2 - 14
- [22] 冯宗炜,汪效科,吴 刚. 中国森林生态系统的生物量和生产力 [M]. 北京: 科学出版社, 1999
- [23] 张清海,叶功富,林益明,等. 福建东山县赤山滨海沙地厚荚相思林与湿地松林生物量和能量的研究[J]. 厦门大学学报: 自然

科学版, 2005, 44(1): 123 - 127

- [24] 叶功富, 吴锡麟, 张清海. 沿海防护林生态系统不同群落生物量和能量的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(增1): 8 - 14
- [25] 张清海, 叶功富, 林益明. 海岸退化沙地木麻黄人工林能量的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(6): 1 - 7
- [26] 沈海龙, 丛健, 郑桂芬, 等. 樟子松人工林热值与能量结构分析()——凋落物的热值与能量动态和群落的能量净生产量与转化率[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(10): 1 - 10
- [27] 何宗明, 陈光水, 王巧珍, 等. 33 a 生福建柏人工林群落能量的研究[J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(6): 569 - 573
- [28] 肖文发, 聂道平, 张家诚. 我国杉木林生物量与能量利用率的研究[J]. 林业科学研究, 1999, 12(3): 237 - 243
- [29] 曹洪麟, 任海, 彭少麟. 鹤山湿地松人工林的群落结构与能量特征[J]. 广西植物, 1998, 18(1): 24 - 28
- [30] 何东进, 洪伟, 吴承祯, 等. 武夷山毛竹天然林生物量与能量分配规律及其与人工林的比较研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(2): 291 - 296
- [31] 李振基, 林鹏. 毛竹群落能量动态的研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 1993, 32(2): 236 - 240
- [32] 彭在清, 林益明, 刘建斌, 等. 福建永春毛竹种群生物量和能量研究[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2002, 41(5): 579 - 583
- [33] 林小珠, 林成辉. 开发桉树作为生物质能源的思考[J]. 能源与环境, 2006(4): 106 - 107
- [34] 陈少雄, 刘杰锋, 孙正军, 等. 桉树生物质能源的优势、现状和潜力[J]. 生物质化学工程, 2006, 40(增1): 119 - 128
- [35] 余雪标, 徐大平, 龙腾, 等. 连栽桉树人工林生物量及生产力结构的研究[J]. 华南农业大学学报, 1999, 5(2): 10 - 17
- [36] 叶绍明, 郑小贤, 杨梅, 等. 尾叶桉与马占相思人工复层林生物量及生产力研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(3): 37 - 43
- [37] 林益明, 郭启荣, 叶功富, 等. 福建东山几种木麻黄的物质与能量特征[J]. 生态学报, 2007, 24(10): 2217 - 2224
- [38] 林益明, 林鹏, 王通. 几种红树植物木材热值和灰分含量的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(2): 181 - 184
- [39] 陈波, 杨永川, 周莹. 浙江天童常绿阔叶林内七种优势植物的热值研究[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006(2): 105 - 111
- [40] 陈美玲, 上官周平. 四种园林植物的热值与养分特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 747 - 751
- [41] 咎启杰, 王伯荪, 王勇军. 深圳福田无瓣海桑 - 海桑林能量的研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(2): 170 - 174
- [42] 王文卿, 叶庆华, 王笑梅, 等. 盐胁迫对木榄幼苗各器官热值、能量积累及分配的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 8 - 12
- [43] 候庸, 王伯荪, 张宏达, 等. 广东黑石顶自然保护区南亚热带常绿阔叶林 5 种优势植物的热值研究[J]. 生态学报, 1998, 18(3): 263 - 268
- [44] 张清海, 叶功富, 林益明. 海岸退化沙地木麻黄人工林能量的研究[J]. 林业科学, 2006, 42(8): 1 - 7
- [45] 薛鹏. 雷州林业局 6 年生尾叶桉人工林生长量及生物量研究[J]. 桉树科技, 2009, 26(1): 18 - 21
- [46] 丁贵杰. 马尾松人工林生物量和生产力研究. 不同造林密度生物量及密度效应[J]. 福建林学院学报, 2003, 23(1): 34 - 38
- [47] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. Ecology, 1969, 50(3): 517 - 519
- [48] 王仁忠. 羊草种群能量生殖分配的研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 591 - 594
- [49] 彭培好, 王金锡, 胡振宇, 等. 人工桉柏混交林生态系统的能量特征[J]. 应用生态学报, 1998, 9(2): 113 - 118