

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw201412017

周群英, 陈少雄, 韩斐扬. 华南十种桉树的热值与灰分含量比较 [J]. 广西植物, 2016, 36(7):788-794

ZHOU QY, CHEN SX, HAN FY. Comparison of calorific values and ash contents of ten *Eucalyptus* species in South China [J]. Guihaia, 2016, 36(7):788-794

华南十种桉树的热值与灰分含量比较

周群英^{1*}, 陈少雄¹, 韩斐扬²

(1. 国家林业局 桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2. 广西林业勘测设计院, 南宁 530011)

摘要: 桉树是林业生物质能源的原料之一, 了解桉树的热值和灰分含量能为合理利用桉树能源林提供理论参考。该研究采用热量计和马福炉对华南尾巨桉等 10 种桉树的不同器官进行热值和灰分含量测定。结果表明: 10 种桉树叶、树枝、树根、树干和树皮的干质量热值、去灰分热值分别为 15.10~21.06 kJ·g⁻¹ 和 16.50~22.11 kJ·g⁻¹, 器官的平均干质量热值、去灰分热值以树叶最高 (19.50 和 20.56 kJ·g⁻¹)、树皮的最低 (17.32 和 18.09 kJ·g⁻¹), 说明树叶所含的高能有机物质比其它器官多; 不同器官的干质量热值与去灰分热值在不同品种中的大小排序不完全一致。灰分含量在 0.14%~8.5% 之间, 器官平均的灰分含量以树叶最高 (5.13%)、树干最低 (0.30%), 说明树叶所含的矿质元素较多。不同器官的热值与灰分含量均差异显著 ($P<0.05$)。植株个体的干质量热值与去灰分热值均以尾叶桉最高 (18.99 和 19.18 kJ·g⁻¹), 以托里桉最低 (17.53 和 17.86 kJ·g⁻¹); 灰分含量则以托里桉最高 (1.90%)、巨桉最低 (0.61%)。相关分析结果表明, 灰分含量与干质量热值、去灰分热值存在一定的负相关, 但未达显著水平; 干质量热值与去灰分热值呈极显著的正相关关系 ($P<0.01$)。由于理想的植物燃料应具备热值高与灰分含量低的特点, 结合该研究的结果分析, 托里桉作为燃料资源利用不理想, 以尾叶桉较为适宜。

关键词: 桉树, 热值, 灰分含量, 生物质能源, 华南

中图分类号: S718.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2016)07-0788-07

Comparison of calorific values and ash contents of ten *Eucalyptus* species in South China

ZHOU Qun-Ying^{1*}, CHEN Shao-Xiong¹, HAN Fei-Yang²

(1. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, China; 2. Forestry Inventory and Planning Institute of Guangxi, Nanning 530011, China)

Abstract: *Eucalyptus* is one of the raw materials for forest bio-energy industry. Calorific value and ash content were two important indices for rational use of bio-energy *Eucalyptus* forest. Calorific values and ash contents of leaves, branches, roots, stem-wood and bark of 10 *Eucalyptus* species including *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* in South China were determined by using calorimeter and muffle furnace. The results showed that gross calorific values (GCV) and ash free calorific values (AFCV) of different organs ranged from 15.10 to 21.06 kJ·g⁻¹ and 16.05 to 22.11 kJ·g⁻¹ respectively, leaves had the highest mean GCV and AFCV (19.50 kJ·g⁻¹ and 20.56 kJ·g⁻¹) and bark the lowest (17.32 and 18.09 kJ·g⁻¹), which indicated that leaf had higher organic matters than other organs. The orders of decreasing GCV and AFCV of 5 organs in 10 *Eucalyptus* species were not exactly the same. The ash contents of different organs ranged from

收稿日期: 2014-12-17 修回日期: 2015-12-31

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFINT2008C13) [Supported by the Special Foundamental Research Fund of the Central Research Institutes of Public Benefit (CAFINT2008C13)].

作者简介: 周群英 (1978-), 女, 广东罗定人, 高级工程师, 主要从事桉树能源林培育和科研管理工作, (E-mail) qyzhou999@sina.com。

* 通讯作者

0.14% to 8.5% with leaves having the highest mean value(5.13%) and stem-wood the lowest(0.30%), which indicated that leaf had more mineral elements than other organs. There were significant differences in calorific values and ash contents of 5 organs ($P < 0.05$). As to the whole tree, *E. urophylla* had the highest GCV and AFCV (18.99 and 19.18 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$), while *Corymbia torelliana* had the lowest GCV and AFCV (17.53 and 17.86 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$); *C. torelliana* had the highest ash contents(1.9%) and *Eucalyptus grandis* the lowest(0.61%). The results of correlation analyses showed that ash content had negative correlation with GCV and AFCV, which was not significant; GCV and AFCV had significantly positive correlation ($P < 0.01$). For ideal plant fuel should have the characteristics of high calorific value and low ash content, of 10 species, *Corymbia torelliana* had low calorific values and high ash contents, which indicated that it was not ideal fuel species while *Eucalyptus urophylla* was the optimal species.

Key words: *Eucalyptus*, calorific value, ash content, bio-energy, South China

能源短缺已经成为当前面临的重大问题之一, 能源树种作为林业生物质能利用的主要方式, 其发展对解决我国能源危机、发展可再生的清洁能源、促进森林的开发利用等方面有着十分重要的意义。桉树(*Eucalyptus*)是我国重要的工业原料林树种之一, 其用途广泛, 主要用于制浆造纸、人造板材、建筑、家具等行业。近年来, 桉树作为林业生物质能利用受到关注, 如 2010 年 3 月正式开工建设、亚洲最大的生物质电厂—广东粤电湛江生物质发电项目其主要的燃料资源之一即为桉树的树皮、枝叶、树根等(杨佩旋, 2011)。

植物热值是指植物干物质完全燃烧后释放出来的能量值, 其数值的高低直接反映了绿色植物在光合作用过程中将日光能转化为化学能的能力(官丽莉等, 2005; 鲍雅静等, 2006), 了解植物热值能为合理利用燃料资源提供依据。有关桉树热值研究已有相关报道, 如黄世能等(1991)测定了窿缘桉(*E. exserta*)和雷林 1 号桉(*E. leizhou* No. 1)树叶等器官的热值, 得出器官热值大小顺序为“树叶>树枝>树干>树根”的规律; 杨成源等(1996)对巨桉(*E. grandis*)、赤桉(*E. camaldulensis*)、直干桉(*E. maidenii*)等 9 种桉树在内的薪材树种开展热值测定, 明确了赤桉与直干桉为该地区的优质薪材树种; 周群英等(2009, 2010, 2013)研究了广东省樟木头林场巨桉等 5 种桉树的能量特征、广东雷州半岛尾细桉(*E. urophylla* × *E. tereticornis*)与尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)林分的能量分配, 认为林分能量产出与林龄显著相关; 韩斐扬等(2010)研究了云南牟定史密斯桉(*E. smithii*)树叶等 5 个器官的热值, 从生物量和能量的角度考虑, 得出史密斯桉能源林的收获周期为 6 a。

在华南地区相关桉树热值研究中, 涉及多个桉

树品种, 但未进行系统比较。为综合比较桉树常种品种的热值性能, 该文以华南地区尾巨桉等 10 种桉树为研究对象, 测定了树叶、树枝、树干、树皮、树根 5 个不同器官的热值和灰分含量, 分析不同器官及不同桉树品种的热值和灰分含量差异, 以期为合理利用桉树生物质能源提供参考。

1 试验地概况

样品于 2008 年 8 月分别采自国营雷州林业局北坡林场与广东省樟木头林场, 试验地的自然条件概况见表 1。

2 材料与方法

2.1 样品采集

供试品种共 10 个, 分别为国营雷州林业局北坡林场的尾巨桉、尾叶桉(*E. urophylla*)、尾细桉、雷林 1 号桉、赤桉和广东省樟木头林场的巨桉、粗皮桉(*E. pellita*)、柳桉(*E. saligna*)、大花序桉(*E. cloeziana*)、托里桉(*Corymbia torelliana*), 其林分生长概况见表 2。

采集方法参见文献(周群英等, 2011)。

2.2 测定方法

干质量热值(Gross Calorific Value, GCV)与灰分含量(Ash Content, AC)的测定方法见文献(周群英等, 2011)。由于各器官的灰分含量不同, 应采用去灰分热值(Ash Free Calorific Value, AFCV)以消除灰分含量不同而造成的影响(陈波等, 2006)。去灰分热值计算方法为去灰分热值=干重热值/(1-灰分含量)。

2.3 数据处理

用 EXCEL 整理原始数据并作图, 用 SPSS 20.0

表 1 试验地自然条件概况

Table 1 Natural conditions of experimental sites

地点 Site	纬度 Latitude	经度 Longitude	年均温度 Mean annual temperature ($^{\circ}\text{C}$)	年均降雨量 Mean annual rainfall (mm)	年相对湿度 Annual relative humidity (%)	土壤类型 Soil type
国营雷州林业局北坡林场 Beipo Forest Farm of State-owned Leizhou Forestry Bureau	21°15' N	109°59' E	23.5	1 750	80.4	砖红壤 Latosol
广东省樟木头林场 Zhangmutou Forest Farm of Guangdong	22°48' N	113°53' E	21.8	1 790	81.8	赤红壤 Latosolic red soil

表 2 10 种桉树林分生长概况

Table 2 Growth survey of ten *Eucalyptus* plantations

地点 Site	林龄 Stand age (a)	林分密度 Stand density (株· hm^{-2})	品种 Species	平均树高 Average height (m)	平均胸径 Average DBH (cm)
国营雷州林业局北坡林场 Beipo Forest Farm of State-owned Leizhou Forestry Bureau	7	2 500	尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	19.8	11.0
			尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	17.1	11.5
			尾细桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. tereticornis</i>	20.2	12.2
			雷林 1 号桉 <i>E. leizhou</i> No. 1	15.7	8.8
			赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	17.4	9.5
广东省樟木头林场 Zhangmutou Forest Farm of Guangdong	6	1 667	巨桉 <i>E. grandis</i>	20.2	19.0
			粗皮桉 <i>E. pellita</i>	15.0	13.0
			柳桉 <i>E. saligna</i>	10.7	12.3
			大花序桉 <i>E. cloeziana</i>	12.9	12.3
			托里桉 <i>Corymbia torelliana</i>	12.5	10.6

软件对数据进行统计分析,其中单个树种不同器官及树种植株体加权的热值与灰分含量采用单因素方差分析(one-way ANOVA),采用多重比较(邓肯检验法)对单因素方差分析所涉指标进行两两比较,并对研究指标进行 Pearson 相关分析。

3 结果与分析

3.1 10 种桉树不同器官的热值

10 种桉树器官的干质量热值、去灰分热值介于 15.10~21.06 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 16.50~22.11 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 之间(表 3)。干质量热值除粗皮桉树叶的值略低于树枝值外,其余 9 个品种均以树叶的值最高,10 种桉树均以树皮的热值最低。排除灰分含量的影响,所得的去灰分热值仍以树叶的最高,最低值在部分品种器

官间的排序发生了变化,如尾叶桉、尾细桉与雷林 1 号桉器官的最低值为树干,粗皮桉的为树根。不同品种其不同器官的干质量热值与去灰分热值的高低排序不完全一致。同一品种其不同器官的热值差异显著($P<0.05$),但差异程度有所不同。

从表 3 可知,各器官的干质量热值与去灰分热值如下:树叶为 18.08~21.06 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 19.39~22.11 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 19.50 和 20.56 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$;树枝为 17.74~19.60 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 18.04~20.16 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 18.89 和 19.23 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$;树根为 17.57~19.40 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 17.79~19.84 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 18.60 和 18.87 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$;树干为 17.80~18.85 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 17.93~18.90 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 18.49 和 18.54 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$;树皮为 15.10~18.59 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 16.50~19.14 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均值为 17.32 和 18.09 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

表 3 10 种桉树的热值与灰分含量

Table 3 Calorific values and ash contents of ten *Eucalyptus* species

品种 Species	器官 Organ	灰分含量 AC (%)	干质量热值 GCV (kJ · g ⁻¹)	去灰分热值 AFCV (kJ · g ⁻¹)
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	树叶 Leaf	4.08 ± 0.36a	20.23 ± 0.07a	21.09 ± 0.02a
	树枝 Branch	2.99 ± 0.52b	19.13 ± 0.02b	19.72 ± 0.11b
	树根 Root	1.21 ± 0.66c	19.25 ± 0.25b	19.48 ± 0.24b
	树干 Stem-wood	0.29 ± 0.19d	18.54 ± 0.12c	18.59 ± 0.09c
	树皮 Bark	3.38 ± 0.07b	17.94 ± 0.23d	18.57 ± 0.22c
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	树叶 Leaf	4.32 ± 0.08a	20.07 ± 0.05a	20.98 ± 0.07a
	树枝 Branch	2.00 ± 1.16b	19.46 ± 0.32b	19.86 ± 0.09b
	树根 Root	2.24 ± 0.94b	19.40 ± 0.09b	19.84 ± 0.20b
	树干 Stem-wood	0.28 ± 0.06c	18.85 ± 0.36c	18.90 ± 0.36c
	树皮 Bark	2.55 ± 0.35b	18.59 ± 0.21c	19.07 ± 0.15c
尾细桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. tereticornis</i>	树叶 Leaf	4.87 ± 0.24a	20.44 ± 0.18a	21.48 ± 0.18a
	树枝 Branch	2.88 ± 1.69b	19.56 ± 0.05b	20.14 ± 0.32b
	树根 Root	1.48 ± 0.12c	18.71 ± 0.14c	18.99 ± 0.12cd
	树干 Stem-wood	0.17 ± 0.02d	18.72 ± 0.30c	18.75 ± 0.30d
	树皮 Bark	3.44 ± 0.88b	18.48 ± 0.09c	19.14 ± 0.26c
雷林 1 号桉 <i>E. leizhou</i> No. 1	树叶 Leaf	4.75 ± 0.17a	21.06 ± 0.15a	22.11 ± 0.12a
	树枝 Branch	1.21 ± 0.27cd	19.43 ± 0.26b	19.67 ± 0.32b
	树根 Root	2.54 ± 2.37bc	19.12 ± 0.36b	19.62 ± 0.16b
	树干 Stem-wood	0.30 ± 0.05d	18.66 ± 0.23c	18.72 ± 0.24c
	树皮 Bark	4.06 ± 0.25ab	18.07 ± 0.13d	18.83 ± 0.19c
赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	树叶 Leaf	6.88 ± 0.63a	20.31 ± 0.19a	21.81 ± 0.35a
	树枝 Branch	2.76 ± 1.20b	19.60 ± 0.67b	20.16 ± 0.94b
	树根 Root	2.89 ± 2.53b	19.24 ± 0.14b	19.82 ± 0.44c
	树干 Stem-wood	0.43 ± 0.09c	18.66 ± 0.10c	18.74 ± 0.10bc
	树皮 Bark	3.78 ± 0.53b	17.97 ± 0.27d	18.67 ± 0.19d
巨桉 <i>E. grandis</i>	树叶 Leaf	3.97 ± 0.52a	19.03 ± 0.17a	19.82 ± 0.27a
	树枝 Branch	0.85 ± 0.28b	18.54 ± 0.27b	18.70 ± 0.28b
	树根 Root	0.52 ± 0.20bc	18.19 ± 0.19c	18.29 ± 0.21c
	树干 Stem-wood	0.14 ± 0.30c	18.52 ± 0.22b	18.55 ± 0.22bc
	树皮 Bark	3.96 ± 0.72a	16.94 ± 0.06d	17.64 ± 0.12d
粗皮桉 <i>E. pellita</i>	树叶 Leaf	6.83 ± 0.63a	18.47 ± 0.16a	19.82 ± 0.27a
	树枝 Branch	1.19 ± 0.51b	18.52 ± 0.31a	18.74 ± 0.25b
	树根 Root	0.65 ± 0.28bc	17.87 ± 0.30b	17.99 ± 0.27c
	树干 Stem-wood	0.17 ± 0.04c	18.30 ± 0.31a	18.33 ± 0.30c
	树皮 Bark	6.40 ± 1.09a	17.06 ± 0.25c	18.23 ± 0.05c
柳桉 <i>E. saligna</i>	树叶 Leaf	4.00 ± 0.12a	18.81 ± 0.20a	19.59 ± 0.18a
	树枝 Branch	0.86 ± 0.18c	18.54 ± 0.24a	18.70 ± 0.22b
	树根 Root	0.67 ± 0.25cd	18.37 ± 0.27a	18.49 ± 0.31b
	树干 Stem-wood	0.22 ± 0.04d	18.77 ± 0.21a	18.81 ± 0.21b
	树皮 Bark	3.34 ± 0.66b	16.31 ± 0.40b	16.87 ± 0.31c
大花序桉 <i>E. cloeziana</i>	树叶 Leaf	4.22 ± 0.39a	18.57 ± 0.18a	19.39 ± 0.23a
	树枝 Branch	0.74 ± 0.08c	18.40 ± 0.43a	18.54 ± 0.44b
	树根 Root	0.75 ± 0.59c	18.29 ± 0.15a	18.43 ± 0.05b
	树干 Stem-wood	0.23 ± 0.03c	18.09 ± 0.57a	18.13 ± 0.57b
	树皮 Bark	3.57 ± 0.50b	16.75 ± 0.26b	17.37 ± 0.35c
托里桉 <i>Corymbia torelliana</i>	树叶 Leaf	7.43 ± 2.11a	18.08 ± 0.36a	19.53 ± 0.34a
	树枝 Branch	1.69 ± 0.08b	17.74 ± 0.39a	18.04 ± 0.41b
	树根 Root	1.26 ± 0.10b	17.57 ± 0.21a	17.79 ± 0.21b
	树干 Stem-wood	0.75 ± 0.26b	17.80 ± 0.04a	17.93 ± 0.01b
	树皮 Bark	8.50 ± 1.40a	15.10 ± 0.56b	16.50 ± 0.36c

表 4 10 种桉树不同器官所占生物量比例

Table 4 Biomass allocation of different organs of ten *Eucalyptus* species

品种 Species	树叶 Leaf	树枝 Branch	树根 Root	树干 Stem-wood	树皮 Bark	合计 Total
尾巨桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>	3.85	8.34	9.10	71.49	7.22	100
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	4.69	8.98	8.91	69.83	7.59	100
尾细桉 <i>E. urophylla</i> × <i>E. tereticornis</i>	3.48	7.29	9.79	74.47	4.97	100
雷林 1 号桉 <i>E. leizhou</i> No. 1	3.94	7.27	10.15	70.68	7.96	100
赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	3.13	6.16	7.92	77.71	5.08	100
巨桉 <i>E. grandis</i>	3.58	5.49	8.76	75.32	6.85	100
粗皮桉 <i>E. pellita</i>	3.10	5.48	9.57	74.30	7.55	100
柳桉 <i>E. saligna</i>	2.71	4.94	10.04	74.75	7.56	100
大花序桉 <i>E. cloeziana</i>	3.42	6.25	10.58	6.95	72.80	100
托里桉 <i>Corymbia torelliana</i>	4.33	9.51	11.79	65.13	9.24	100

3.2 10 种桉树不同器官的灰分含量

由表 3 数据可知,10 种桉树不同器官的灰分含量在 0.14%~8.5% 之间,最大值是最小值的 60 倍。总体以树叶的灰分含量最高(托里桉除外),均以树干最低。各器官的平均灰分含量为树叶 5.13%,树枝 1.72%,树根 1.42%,树干 0.30%与树皮 4.30%。不同器官的平均灰分含量亦存在显著差异 ($P<0.05$)。

3.3 10 种桉树植株个体的加权平均热值和灰分含量

10 种桉树植株个体的加权平均热值和灰分含量由其不同器官所占生物量比例(周群英等,2009,2010)计算而得(表 4)。由图 1-3 可知,10 种桉树植株个体加权的平均干质量热值、去灰分热值及灰分含量差异显著 ($P<0.05$),其值分别为 17.53~18.99 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 、17.86~19.18 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 0.61%~1.90%,它们的大小顺序分别为尾叶桉>尾细桉>雷林 1 号桉>赤桉>尾巨桉>柳桉>巨桉>粗皮桉>大花序桉>托里桉、尾叶桉>雷林 1 号桉>赤桉>尾细桉>尾巨桉>柳桉>巨桉>粗皮桉>大花序桉>托里桉及托

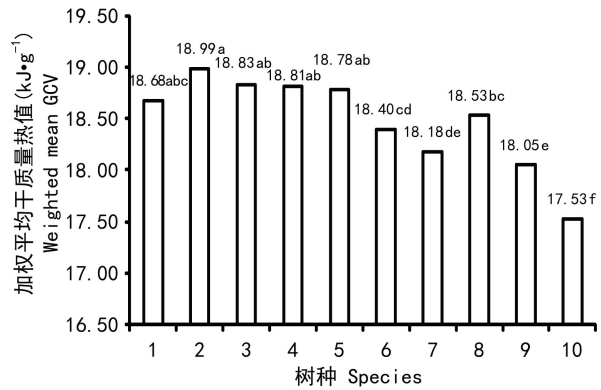


图 1 10 种桉树植株个体的加权平均干质量热值
1. 尾巨桉; 2. 尾叶桉; 3. 尾细桉; 4. 雷林 1 号桉; 5. 赤桉;
6. 巨桉; 7. 粗皮桉; 8. 柳桉; 9. 大花序桉; 10. 托里桉。下同。
Fig. 1 Weighted mean GCV of ten *Eucalyptus* whole tree
1. *E. urophylla* × *E. grandis*; 2. *E. urophylla*; 3. *E. tereticornis*;
4. *E. leizhou* No. 1; 5. *E. camaldulensis*; 6. *E. grandis*;
7. *E. pellita*; 8. *E. saligna*; 9. *E. cloeziana*;
10. *Corymbia torelliana*. The same below.

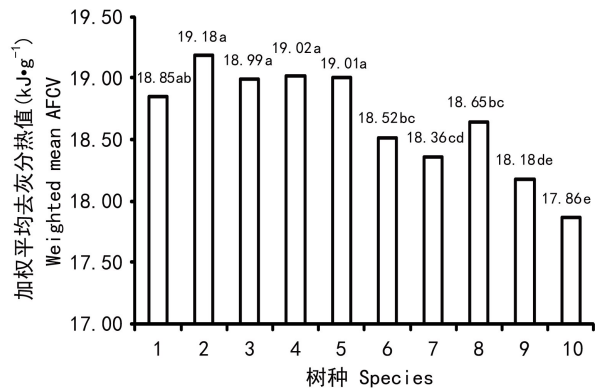


图 2 10 种桉树植株个体的加权平均去灰分热值
Fig. 2 Weighted mean AFCV of ten *Eucalyptus* whole tree

里桉>赤桉>雷林 1 号桉>尾叶桉>粗皮桉>尾巨桉>尾细桉>大花序桉>柳桉>巨桉。由排序可知,尾叶桉植株个体热值最高、托里桉的最低,灰分含量以托里桉最高、巨桉最低。由图 1-3 还可知,去除灰分后,树种间的热值差异程度有所减小。

3.4 灰分含量、干质量热值与去灰分热值的相关关系

将 10 种桉树植株个体的热值和灰分含量进行 Pearson 相关分析(表 5),结果表明灰分含量与干质量热值、去灰分热值存在一定的负相关,但未达显著水平;干质量热值与去灰分热值呈极显著的正相关关系 ($P<0.01$)。

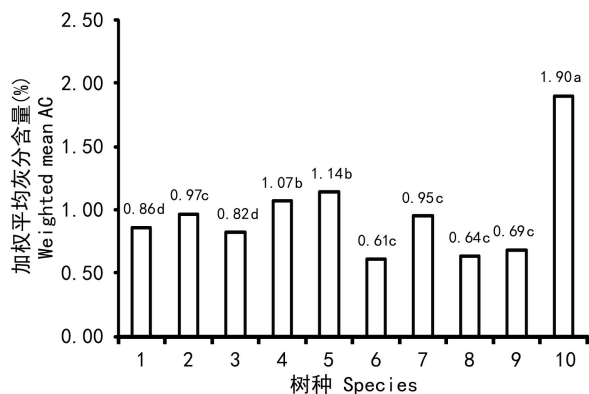


图 3 10 种桉树植株个体的加权平均灰分含量

Fig. 3 Weighted mean AFCV of ten *Eucalyptus* whole tree表 5 10 种桉树灰分含量、干质量热值
和去灰分热值的相关系数Table 5 Correlation coefficients among AC, GCV
and AFCV of ten *Eucalyptus* species

	灰分含量 AC	干质量热值 GCV	去灰分热值 AFCV
灰分含量 AC	1.000		
干质量热值 GCV	-0.488	1.000	
去灰分热值 AFCV	-0.365	0.991 **	1.000

** $P < 0.01$.

4 讨论与结论

10 种桉树不同器官的热值差异显著,基本以树叶的值最高,该结果与多数研究结论一致(周群英等,2009,2010,2013;韩斐扬等,2010,2013)。植物不同器官热值的差异与其自身的组成、结构和功能密切相关,较高的热值预示该器官含有高能物质。由于树叶是光合作用的器官和有机物合成的最主要场所,含有较多的蛋白质、脂肪等高能有机物质,因此其热值较高。树枝、树根、树干为植物的支持器官,其内树脂等高能化合物含量较少,但木素、纤维素含量较高,热值相对于树皮而言则较高。由于树皮的主要功能是保护木质部并与外界进行水分交换等,其有机物含量较少并在水分交换时存在一定的能量损失,因此其热值最低(王娜等,2011)。

灰分是植物体矿质元素氧化后的总和。10 种桉树不同器官的平均灰分含量以树叶最高、树干最低,这是由于树叶生理活动较为活跃、积累了较多的

矿质元素缘故所致,而树干高度木质化,其主要由纤维素组成,矿质含量很低,因此灰分含量少(林益明等,2000)。

在生物质能源树种相关研究中,江丽媛等(2011)测定了 5 个不同林龄(17~57 a)栓皮栎(*Quercus variabilis*)的干质量热值(18.34~18.75 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)与去灰分热值(19.54~19.71 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$),通过比较得出 27 a 为栓皮栎能源林的理想经营年龄;王玉魁等(2006)比较了西北沙区 4 种能源树种的干质量热值,分别为梭梭(*Haloxylon ammodendron*) 18.68 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 、沙棘(*Hippophae rhamnoides*) 18.94 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*) 18.87 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和沙拐枣(*Calligonum mongolicum*) 17.74 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,得出梭梭单位面积生物量和热能产出指标最优的结论;李洪和胡建军(2010)研究了 11 个能源林杨柳无性系热值季节变化,得出 5 个 1 年生柳树(*Salix*)无性系夏冬两季全株干质量热值为 17.92~18.49 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 19.36~20.02 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,6 个 1 年生杨树(*Populus*)无性系夏冬两季干质量热值为 18.24~18.49 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 19.28~19.45 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本研究 10 种桉树植株个体加权的平均干质量热值与去灰分热值分别为 17.53~18.99 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 与 17.86~19.18 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,与上述相关研究相比,其热值较居中,但桉树具有速生、培育周期短、生物量大等优点,作为生物质能源利用优势显著(陈少雄等,2006)。同类研究表明,从产量和热值角度考虑,桉树可作为能源树种利用(杨成源等,1996;潘艳艳,2010)。

10 种桉树植株个体加权的灰分含量为 0.61%~1.90%,低于 5 个不同林龄(17~57 a)栓皮栎的平均灰分含量 4.55%~6.05%(江丽媛等,2011)。Bhatt & Todaria(1990)认为,理想的植物燃料应具备热值高与灰分含量低的特点。结合热值和灰分含量两项指标进行评价,本研究 10 种桉树植株个体的灰分含量以托里桉最高,且其热值最低,作为燃料资源利用不理想,以尾叶桉较为适宜。

参考文献:

- BAO YJ, LI ZH, HAN XG, et al, 2006. Plant caloric value and its bio-ecological attributes [J]. *Chin J Ecol*, 25(9): 1 095-1 103. [鲍雅静,李政海,韩兴国,等,2006. 植物热值及其生物生态学属性] [J]. *生态学杂志*, 25(9): 1 095-1 103.]
- BHATT BP, TODARIA NP, 1990. Fuel wood characteristics of some mountain trees and shrubs [J]. *Biomass*, 21(3): 233-238.
- CHEN B, YANG YC, ZHOU Y, 2006. Caloric values of seven domi-

- nant species in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China [J]. J E China Norm Univ: Nat Sci Ed, 2: 105-111. [陈波, 杨永川, 周莹, 2006. 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, 2: 105-111.]
- CHEN SX, LIU JF, SUN ZJ, et al, 2006. Superiority, situation and potential of *Eucalyptus* for bioenergy [J]. Biol Chem Eng, 40 (Suppl. 1): 119-128. [陈少雄, 刘杰锋, 孙正军, 等, 2006. 桉树生物质能源的优势、现状和潜力 [J]. 生物质化学工程, 40 (Suppl. 1): 119-128.]
- GUAN LL, ZHOU XY, LUO Y, 2005. A review on the study of plant caloric value in China [J]. Chin Chin J Ecol, 24(4): 452-457. [官丽莉, 周小勇, 罗艳, 2005. 我国植物热值研究综述 [J]. 生态学杂志, 24(4): 452-457.]
- HAN FY, ZHOU QY, CHEN SX, et al, 2010. Standing crop and energy of *Eucalyptus smithii* energy plantation at different ages [J]. Chin J Trop Crops, 31(2): 298-303. [韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 等, 2010. 不同林龄史密斯桉树能源林现存量与能量研究 [J]. 热带作物学报, 31(2): 298-303.]
- HAN FY, ZHOU QY, CHEN SX, 2013. Species selection and evaluation of *Eucalyptus* energy forest in Leizhou Peninsula [J]. J NW For Univ, 28(1): 77-81. [韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 2013. 雷州半岛桉树能源林品种选择与评价 [J]. 西北林学院学报, 28(1): 77-81.]
- HOU Y, WANG BS, ZHANG HD, et al, 1998. Study on the caloric values of five dominants for the tree layer in the south subtropical evergreen broad-leaved forest in Heishiding Nature Reserve, Guangdong Province [J]. Acta Ecol Sin, 18(3): 263-268. [侯庸, 王伯荪, 张宏达, 等, 1998. 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, 18(3): 263-268.]
- HUANG SN, ZHENG HS, HE KJ, 1991. Studies on the mixed fuelwood of *Eucalyptus* II. the allocation of biomass and energy in the stands [J]. For Res, 4(5): 545-549. [黄世能, 郑海水, 何克军, 1991. 桉树薪炭林混交试验II. 林分生物量和能量分配的研究 [J]. 林业科学研究, 4(5): 545-549.]
- JIANG LY, PENG ZD, HE BH, et al, 2011. Caloric values and ash contents of *Quercus variabilis* at five different ages [J]. J Nanjing For Univ: Nat Sci Ed, 35(5): 40-44. [江丽媛, 彭祥登, 何宝华, 等, 2011. 5个年龄栓皮栎热值与灰分含量的分析 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 35(5): 40-44.]
- LI H, HU JJ, 2010. Seasonal and annual dynamics of the gross caloric value of eleven poplar and willow clones [J]. For Res, 23(3): 425-429. [李洪, 胡建军, 2010. 11个能源林杨柳无性系热值季节及年度变化 [J]. 林业科学研究, 23(3): 425-429.]
- LIN YM, LIN P, WANG T, 2000. Caloric values and ash contents of some mangrove woods [J]. Chin J Appl Ecol, 11(2): 181-184. [林益明, 林鹏, 王通, 2000. 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, 11(2): 181-184.]
- PAN YY, 2010. Research on fuel forests of Fujian Province [J]. Jiangxi For Sci Technol, 4: 7-10, 12. [潘艳艳, 2010. 福建省薪炭林研究 [J]. 江西林业科技, 4: 7-10, 12.]
- WANG N, SUN ML, WANG LH, 2011. Comparative analysis on calorific value of *Eucalyptus*, *Acacia mangium* and *Acacia crassi-*
carpa [J]. For Eng, 27(4): 1-2. [王娜, 孙墨珑, 王立海, 2011. 桉树、厚荚相思和马占相思树种热值比较分析 [J]. 森林工程, 27(4): 1-2.]
- WANG YK, YAN YX, LI GT, 2006. An evaluation study on four energy tree species in northwest sandy areas [J]. Biol Chem Eng, 40 (Suppl. 1): 157-160. [王玉魁, 阎艳霞, 李钢铁, 2006. 西北沙区4种能源树种评价研究 [J]. 生物质化学工程, 40 (Suppl. 1): 157-160.]
- YANG CY, ZHANG JY, LI WZ, et al, 1996. A study on calorific value of fuelwood species in the xerothermic valley and in the central Yunnan plateau [J]. J SW Coll, 16(4): 294-302. [杨成源, 张加研, 李文政, 等, 1996. 滇中高原及干热河谷薪材树种热值研究 [J]. 西南林学院学报, 16(4): 294-302.]
- YANG PX, 2011. Analysis on problems of biomass direct-fired power generation in Zhanjiang [J]. Guangdong Elec Pow, 24(7): 90-93. [杨佩旋, 2011. 湛江地区生物质直燃发电相关问题分析 [J]. 广东电力, 24(7): 90-93.]
- ZENG XP, CAI XA, ZHAO P, et al, 2009. Caloric value and ash content of dominant plants in plantation communities in Heshan of Guangdong, Chin [J]. Chin J Appl Ecol, 20(3): 485-492. [曾小平, 蔡锡安, 赵平, 等, 2009. 广东鹤山人工林群落主要优势植物的热值和灰分含量 [J]. 应用生态学报, 20(3): 485-492.]
- ZHOU QY, CHEN SX, WU ZH, et al, 2009. Energy characteristics of five *Eucalyptus* species in Zhangmutou Forest Farm, Guangdong Province [J]. J Trop Subtrop Bot, 17(6): 549-555. [周群英, 陈少雄, 吴志华, 等, 2009. 广东樟木头5种桉树的能量特征研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 17(6): 549-555.]
- ZHOU QY, CHEN SX, WU ZH, et al, 2009. Ash contents and caloric values of five *Eucalypt* species [J]. Chin J Trop Crops, 30(2): 161-166. [周群英, 陈少雄, 吴志华, 等, 2009. 巨桉等5种桉树的热值和灰分含量研究 [J]. 热带作物学报, 30(2): 161-166.]
- ZHOU QY, CHEN SX, HAN FY, et al, 2010. Comparison study on biomass and energy of five *Eucalypt* clones [J]. For Res, 23(1): 18-24. [周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等, 2010. 尾细桉等5种桉树无性系生物量和能量的比较研究 [J]. 林业科学研究, 23(1): 18-24.]
- ZHOU QY, CHEN SX, HAN FY, et al, 2010. Biomass and energy allocation in *Eucalyptus urophylla* × *E. tereticornis* plantations at different stand ages [J]. Chin J Appl Ecol, 21(1): 16-22. [周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等, 2010. 不同林龄尾细桉人工林的生物量和能量分配 [J]. 应用生态学报, 21(1): 16-22.]
- ZHOU QY, CHEN SX, HAN FY, et al, 2011. Ash contents and caloric values of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* in different stand ages [J]. Guihaia, 30(1): 75-80. [周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等, 2011. 不同林龄巨尾桉的灰分含量和热值 [J]. 广西植物, 30(1): 75-80.]
- ZHOU QY, CHEN SX, HAN FY, et al, 2013. Studies on biomass and energy characteristics of short rotation energy plantation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* [J]. J Trop Subtrop Bot, 21(1): 45-51. [周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等, 2013. 短周期尾巨桉能源林生物量与能量特征研究 [J]. 热带亚热带植物学报, 21(1): 45-51.]