

# 广东樟木头5种桉树的能量特征研究

周群英<sup>1\*</sup>, 陈少雄<sup>1</sup>, 吴志华<sup>1</sup>, 陈宏<sup>2</sup>, 林良柱<sup>2</sup>, 韩斐扬<sup>1</sup>

(1. 国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022; 2. 广东省樟木头林场, 广东 东莞 523616)

**摘要:** 对广东省东莞市樟木头林场5种6 a生巨桉(*Eucalyptus grandis*)、柳桉(*E. saligna*)、大花序桉(*E. cloeziana*)、粗皮桉(*E. pellita*)和托里桉(*E. torelliana*)的能量特征进行研究。结果表明:5种桉树不同组分的灰分含量和热值存在显著差异( $P < 0.01$ )。灰分含量为0.16%~8.37%,其中巨桉、柳桉、粗皮桉和托里桉均是叶>皮>枝>根>干,而大花序桉为皮>叶>枝>根>干;各组分的干重热值为15.12~18.85 kJ g<sup>-1</sup>,均以叶最高、皮最低,巨桉与粗皮桉为叶>枝>干>根>皮;柳桉与托里桉为叶>干>枝>根>皮;大花序桉为叶>枝>根>干>皮;去灰分热值为16.37~19.87 kJ g<sup>-1</sup>,除粗皮桉为叶>枝>皮>干>根外,其它4种各组分的去灰分热值均与干重热值的变化趋势相同。5种桉树的平均干重热值和去灰分热值分别以巨桉、粗皮桉最高,但均以托里桉最低。

**关键词:** 桉树; 灰分; 热值; 樟木头; 广东

中图分类号: S718.554.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2009)06-0549-07

## Energy Characteristics of Five Eucalyptus Species in Zhangmutou Forest Farm, Guangdong Province

ZHOU Qun-ying<sup>1\*</sup>, CHEN Shao-xiong<sup>1</sup>, WU Zhi-hua<sup>1</sup>, CHEN Hong<sup>2</sup>,  
LIN Liang-zhu<sup>2</sup>, HAN Fei-yang<sup>1</sup>

(1. China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, China; 2. Zhangmutou Forest Farm of Guangdong, Dongguan 523616, China)

**Abstract:** Energy characteristics of 6-year-old trees of *Eucalyptus grandis*, *E. saligna*, *E. cloeziana*, *E. pellita* and *E. torelliana* in Zhangmutou Forest Farm in southern Guangdong Province were studied. The results showed that there were significant differences in ash content and caloric value of various above and below ground components ( $P < 0.01$ ). Ash contents ranged from 0.16% to 8.37%, with the components in *E. grandis*, *E. saligna*, *E. pellita* and *E. torelliana* had order as leaves > bark > branches > roots > stem-wood, and that in *E. cloeziana* as bark > leaves > branches > roots > stem-wood. Gross caloric values (GCV) of various components ranged from 15.12 to 18.85 kJ g<sup>-1</sup> with leaves having the highest GCVs and bark the lowest. For *E. grandis* and *E. pellita*, the order of components was leaves > branches > stem-wood > roots > bark, for *E. saligna* and *E. torelliana* was leaves > stem-wood > branches > roots > bark and for *E. cloeziana* leaves > branches > roots > stem-wood > bark. Ash free caloric values (AFCV) of components ranged from 16.37 to 19.87 kJ g<sup>-1</sup> and the order of components by AFCVs were the same as those for GVCs for *E. grandis*, *E. saligna*, *E. cloeziana* and *E. torelliana*, and that for *E. pellita* as leaves > branches > bark > stem-wood > roots. For whole tree, *E. grandis* and *E. pellita* had the highest mean GCV and AFCV values respectively, while *E. torelliana* had the lowest.

**Key words:** *Eucalyptus*; Ash content; Caloric value; Zhangmutou; Guangdong

能量是生态学功能研究中的基本概念之一,植 物热值是植物产品能量水平的一种度量,是指单位

收稿日期:2009-02-18 接受日期:2009-06-11

基金项目:中国林业科学研究院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

\* 通讯作者 Corresponding author

重量的干物质在完全燃烧后所释放出的能量,它能反映植物对太阳辐射能的利用状况<sup>[1-3]</sup>。研究植物热值能直观地反映植物不同组织的生理活动变化和生长状况的差异<sup>[4]</sup>,各种环境因子对植物生长的影响可以从热值的变化上反映出来,热值可作为植物生长状况的一个有效指标<sup>[5]</sup>。Long 于 20 世纪 30 年代率先对植物热值开展较系统的研究<sup>[6]</sup>,60 年代是能量生态学作为一门独立学科形成的重要时期,1960 年 Golley 应用氧弹式热量计测定了热带雨林主要植物群落中优势种类的平均热值<sup>[7]</sup>,1969 年对热带雨林植物群落的能量进行了更深入的研究。从此有关生物个体、种群和群落能量的研究普遍展开,氧弹式热量计法成为能量生态学研究的基本手段之一<sup>[8]</sup>。我国对植物热值的研究始于 20 世纪 80 年代<sup>[9]</sup>,涉及农作物,如水稻(*Oryza sativa*)<sup>[4,10]</sup>、苜蓿属(*Medicago*)植物<sup>[11]</sup>、草本植物<sup>[1]</sup>和森林木本植物如人工针叶林<sup>[12]</sup>、桉树(*Eucalyptus*)和大叶相思(*Acacia auriculiformis*)混交林<sup>[13]</sup>、热带天然林<sup>[2,14-16]</sup>及亚热带常绿阔叶林<sup>[17]</sup>。

桉树不仅是我国南方最重要的速生商品林树种,也是林木生物质能源的重要组成部分,其材质坚硬,嫩枝富含挥发性油,树叶富含桉叶油,是一种很好的能源原材料<sup>[18]</sup>,并且桉树具有生长迅速、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<sup>[19]</sup>。在我国,对桉树的研究主要集中在繁育技术、营林措施、病虫害防治等方面,而对桉树能量生态学的研究则较少。

本文研究了广东省东莞市樟木头林场 5 种桉树的不同组分能量特征,探讨它们的生境适应性,以期从能量的角度为选择优良的桉树能源树种及指导能源林栽培提供理论依据。

## 1 试验地概况

广东省东莞市樟木头林场,位于南亚热带粤中区域惠州盆地东莞市内,为东经 113°53'~114°10',北纬 22°48'~22°58'。属南亚热带季风气候,年均温度 21.8℃,最高月均温 28℃(7 月),极端最高温 37.9℃,最低月均温 13.5℃(1 月),极端最低温度 0.43℃;年降雨量 1 790 mm,雨季集中在 4~9 月,占全年降雨量的 81.8%,降水量最大在 6 月,最小在 1 月;年均相对湿度 79%,无霜期 350 d。地形为低山和丘陵地带,海拔 100~400 m。土壤主要为发育于花岗岩母质的赤红壤,土层厚度 60~150 cm,

表土层多为 5~18 cm,质地轻粘至中壤、粒状或块状结构,pH 值小于 6.8,呈酸性,有机质含量中等,自然肥力一般<sup>[20]</sup>。

林地植被较丰富,主要有桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa*)、铁芒萁(*Dicranopteris linearis*)、山乌桕(*Sapium discolor*)、野香茅(*Cymbopogon tortilis*)、银柴(*Aporosa chinensis*)、野牡丹(*Melastoma candidum*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)等。

## 2 材料和方法

### 2.1 样品采集

样品取自广东省东莞市樟木头林场的 6 a 生桉树人工林,有巨桉(*E. grandis*)、柳桉(*E. saligna*)、大花序桉(*E. cloeziana*)、粗皮桉(*E. pellita*)和托里桉(*E. torelliana*)。2008 年 7 月每种随机选取样木 3 株,每株采集胸径处的树干(不含皮)和树皮(根皮和干皮按重量同等比例混合)、树根、树枝、叶片各 500 g,测定热值和灰分,其中树枝和叶片(健康的成熟叶)按冠幅不同层次和方位采集,采集树根时沿侧根方向将不同径级的根系混合。

### 2.2 测定方法

样品在 105℃ 下烘 10 min 后,在 80℃ 下烘至恒重,磨粉并过筛装瓶贮存备用。用热量计法<sup>[6]</sup>测定样品的热值含量,称取 1.0 g 粉末压成片状,采用长沙仪器厂生产的 WGR-1 型电脑热量仪测定。样品热值以干重热值(每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量, Gross caloric value, GCV)和去灰分热值(Ash free caloric value, AFCV)来表示。每样品重复 3 次,误差控制在  $\pm 0.200$  kJ g<sup>-1</sup>,取平均值。每次测定前用苯甲酸标定,测定环境用空调控温在 20℃ 左右。

灰分含量的测定用干灰化法<sup>[21]</sup>,即样品在马福炉 550℃ 下灰化 5 h 后测定其灰分含量(Ash content, AC),灰分含量(%) = 灰分重量/样品重量 × 100%,去灰分热值 = 干重热值/(1-灰分含量)。

### 2.3 数据分析

用 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析,用邓肯氏检验法进行多重比较。

## 3 结果和分析

### 3.1 不同组分的灰分含量比较

灰分是指植物体矿物元素氧化物的总和,灰分

含量的高低与植物吸收的元素量有关,可指示植物富集元素的能力<sup>[22-23]</sup>。

5种桉树不同组分的灰分含量差异极显著( $P < 0.01$ ),其中巨桉、柳桉、粗皮桉和托里桉均表现叶>皮>枝>根>干,而大花序桉则不同,为皮>叶>枝>根>干。从表1可见,叶的灰分含量最高(3.81%~8.37%),柳桉最低(3.81%),托里桉最高(8.37%),托里桉的灰分含量分别是巨桉(3.90%)、柳桉(3.81%)、大花序桉(4.80%)、粗皮桉(7.08%)的2.15、2.20、1.74和1.18倍。皮的灰分含量与叶接近(3.36%~7.62%)。叶和皮的灰分含量为托里桉>粗皮桉>大花序桉>巨桉>柳桉。根的灰分含量为0.56%~1.20%,托里桉>巨桉>大花序桉>粗皮桉>柳桉,枝的为0.76%~1.74%,托里桉>大花序桉>粗皮桉>巨桉>柳桉。干的灰分含量最低(0.16%~0.87%),托里桉>柳桉>粗皮桉>大花序桉>巨桉。阮志平等<sup>[5]</sup>报道油棕(*Elaeis guineensis*)等3种棕榈植物叶、叶柄、根、茎等的灰分含量为2.78%~9.11%;林益明等<sup>[22,24-25]</sup>报道海南东寨港红树植物的木材(干)灰分含量为2.43%~5.17%、福建东山7种木麻黄(*Casuarina equisetifolia*)枝干的灰分含量为3.06%~5.98%,福建华安竹园竹类植物叶的灰分含量为8.05%~28.14%;林鹏等<sup>[26]</sup>报道海南东寨港7种红树植物叶的灰分含量为7.11%~9.80%。可见,5种桉树的总体灰分含量(1.75%~3.96%)均较低,符合理想燃料对灰分低的要求。

在5种桉树中,托里桉所有组分的灰分含量均最高,表明托里桉富集元素的能力较强。5种桉树的叶和树皮的灰分含量均较高而干材、树枝和树根的较低。这是由于叶和树皮在生长过程中不断更新、生理活动较为活跃而积累较多矿质元素的缘故,而干材、树枝和树根是植物体的支持器官,其生理活性几乎消失,组成以纤维素为主,在高度木质化的组织中N、P、K、Na、Mg等元素含量较低因而灰分含量较少<sup>[22,27]</sup>。某些植物如红树科白骨壤(*Avicennia marina*)的叶因其灰分含量高(12.27%)而常被用作绿肥<sup>[28]</sup>。植物对土壤元素的富集能力本质上与植物对元素的需求量和土壤中元素的含量及存在形态等有关,而元素的存在形态受不同因素影响,因此同一种桉树的灰分含量与其所处生境有关,不是固定不变的。

### 3.2 不同组分的热值特征

#### 3.2.1 干重热值比较

各组分的干重热值为15.12~18.85 kJ g<sup>-1</sup>(表1),在各组分的分配因品种而异,其中巨桉与粗皮桉为叶>枝>干>根>皮;柳桉与托里桉为叶>干>枝>根>皮;大花序桉的为叶>枝>根>干>皮。叶的干重热值最高,这与许多研究的结果一致<sup>[27,29-30]</sup>。植物解剖学和植物生理学的研究表明<sup>[31]</sup>,叶片是有机物合成的最主要场所,含有较多的高能化合物如蛋白质、脂肪等,因而其热值高于其他组分或器官。树皮亦属于生理活性较为活跃的器官,但本研究皮的干重热值在各种中均最低,与植物生理学结论不符,这与桉树树皮含有某些特异性物质有关还是桉树本身的能量分配特性所决定的,有待进一步深入探讨。

桉树的根、枝、叶的干重热值变化一致,为巨桉>柳桉>大花序桉>粗皮桉>托里桉,分别为17.41~18.19 kJ g<sup>-1</sup>、17.54~18.48 kJ g<sup>-1</sup>和18.10~18.85 kJ g<sup>-1</sup>。干的干重热值为17.67~18.75 kJ g<sup>-1</sup>,柳桉>巨桉>粗皮桉>托里桉>大花序桉。皮的干重热值最小,为15.12~17.21 kJ g<sup>-1</sup>,粗皮桉>巨桉>柳桉>大花序桉>托里桉。总体来看,巨桉、柳桉各组分的干重热值均较高。

#### 3.2.2 去灰分热值

各组分的去灰分热值为16.37~19.87 kJ g<sup>-1</sup>,且差异极显著( $P < 0.01$ )。巨桉、柳桉、大花序桉和托里桉各组分的去灰分热值分布规律与干重热值一致,但粗皮桉却不同,为叶>枝>皮>干>根。在所有组分中,仍以叶的去灰分热值最高,这与干重热值相同。

叶的去灰分热值为19.41~19.87 kJ g<sup>-1</sup>,粗皮桉>托里桉>巨桉>柳桉>大花序桉;根17.62~18.32 kJ g<sup>-1</sup>,巨桉>柳桉>大花序桉>粗皮桉>托里桉;皮16.37~18.39 kJ g<sup>-1</sup>,粗皮桉>巨桉>大花序桉>柳桉>托里桉;干17.71~18.82 kJ g<sup>-1</sup>,柳桉>巨桉>粗皮桉>托里桉>大花序桉;枝17.85~18.66 kJ g<sup>-1</sup>,大花序桉>巨桉>柳桉>粗皮桉>托里桉。与干重热值比较,除根、干的排列顺序未发生变化外,皮、枝和叶的分布格局均发生了变化。由于灰分含量的差异是引起干重热值变化的重要原因<sup>[28]</sup>,在能量生态学研究时,干重热值在将植物生

表 1 不同组分的平均灰分含量及热值比较

Table 1 Comparison of average ash content and caloric value of different components

植物 Species	组分 Components	灰分含量 AC (%)	干重热值 GCV (kJ g <sup>-1</sup> )	去灰分热值 AFCV (kJ g <sup>-1</sup> )
巨桉 <i>E. grandis</i>	根 Root	0.69 ± 0.31 b	18.19 ± 0.16 b	18.32 ± 0.18 b
	皮 Bark	3.65 ± 0.74 a	16.93 ± 0.06 c	17.57 ± 0.15 c
	干 Stem-wood	0.16 ± 0.37 c	18.31 ± 0.38 b	18.34 ± 0.38 b
	枝 Branch	0.85 ± 0.22 b	18.48 ± 0.26 b	18.64 ± 0.27 b
	叶 Leaf	3.90 ± 0.43 a	18.85 ± 0.31 a	19.62 ± 0.37 a
	平均 Average	1.85 ± 1.66	18.15 ± 0.71	18.50 ± 0.73
柳桉 <i>E. saligna</i>	根 Root	0.56 ± 0.26 b	18.18 ± 0.36 b	18.28 ± 0.41 c
	皮 Bark	3.36 ± 0.52 a	16.49 ± 0.43 c	17.06 ± 0.39 d
	干 Stem-wood	0.28 ± 0.09 b	18.75 ± 0.16 a	18.80 ± 0.16 b
	枝 Branch	0.76 ± 0.33 b	18.47 ± 0.52 ab	18.61 ± 0.53 bc
	叶 Leaf	3.81 ± 0.58 a	18.78 ± 0.24 a	19.52 ± 0.33 a
	平均 Average	1.75 ± 1.58	18.13 ± 0.93	18.46 ± 0.89
大花序桉 <i>E. cloeziana</i>	根 Root	0.60 ± 0.51 b	18.11 ± 0.33 ab	18.22 ± 0.35 bc
	皮 Bark	5.54 ± 3.09 a	16.34 ± 0.67 c	17.30 ± 0.30 d
	干 Stem-wood	0.20 ± 0.05 b	17.67 ± 0.79 b	17.71 ± 0.79 cd
	枝 Branch	1.02 ± 0.44 b	18.46 ± 0.35 a	18.66 ± 0.39 b
	叶 Leaf	4.80 ± 0.95 a	18.48 ± 0.20 a	19.41 ± 0.19 a
	平均 Average	2.43 ± 2.68	17.81 ± 0.94	18.26 ± 0.86
粗皮桉 <i>E. pellita</i>	根 Root	0.58 ± 0.24 cd	17.85 ± 0.25 b	17.95 ± 0.24 d
	皮 Bark	6.40 ± 0.85 b	17.21 ± 0.30 c	18.39 ± 0.25 bc
	干 Stem-wood	0.21 ± 0.07 d	18.18 ± 0.32 ab	18.22 ± 0.31 cd
	枝 Branch	1.00 ± 0.49 c	18.33 ± 0.28 a	18.52 ± 0.26 b
	叶 Leaf	7.08 ± 0.63 a	18.46 ± 0.24 a	19.87 ± 0.26 a
	平均 Average	3.05 ± 3.12	18.01 ± 0.53	18.59 ± 0.67
托里桉 <i>E. torelliana</i>	根 Root	1.20 ± 0.12 b	17.41 ± 0.31 b	17.62 ± 0.32 b
	皮 Bark	7.62 ± 1.75 a	15.12 ± 0.44 c	16.37 ± 0.35 c
	干 Stem-wood	0.87 ± 0.28 b	17.77 ± 0.06 ab	17.92 ± 0.04 b
	枝 Branch	1.74 ± 0.11 b	17.54 ± 0.44 b	17.85 ± 0.44 b
	叶 Leaf	8.37 ± 2.23 a	18.10 ± 0.28 a	19.76 ± 0.46 a
	平均 Average	3.96 ± 3.57	17.19 ± 1.12	17.90 ± 1.15

数据后不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。Data followed different letters present significant difference at 0.05 level.

物量转换成相应的能量时是有实用价值的,但在对不同植物种类或不同植物组分的热值进行比较时,为准确测得单位物质所含的能量应采用去灰分热值以消除灰分含量不同而造成的影响<sup>[32]</sup>。

### 3.3.5 种桉树的热值比较

为比较不同种植物的整体能量差异,本研究测定了 5 种桉树的热值。从表 1 来看,5 种桉树的平均干重热值为 17.19 ~ 18.15 kJ g<sup>-1</sup>,巨桉最高(18.15 kJ g<sup>-1</sup>),托里桉最低(17.19 kJ g<sup>-1</sup>),其次为柳桉 18.13 kJ g<sup>-1</sup>、大花序桉 17.81 kJ g<sup>-1</sup>、粗皮桉

18.01 kJ g<sup>-1</sup>。托里桉的干重热值比巨桉、柳桉、大花序桉、粗皮桉分别减少 0.96、0.94、0.62 和 0.82 kJ g<sup>-1</sup>。平均去灰分热值为 17.90 ~ 18.59 kJ g<sup>-1</sup>,其中巨桉 18.50 kJ g<sup>-1</sup>、柳桉 18.46 kJ g<sup>-1</sup>、大花序桉 18.26 kJ g<sup>-1</sup>、粗皮桉 18.59 kJ g<sup>-1</sup>和托里桉 17.90 kJ g<sup>-1</sup>,数值最低的托里桉比巨桉、柳桉、大花序桉、粗皮桉分别少了 0.60、0.56、0.36 和 0.69 kJ g<sup>-1</sup>,与干重热值相比,其差别分别减少了 0.36、0.38、0.26 和 0.13 kJ g<sup>-1</sup>,说明干重热值受灰分含量的影响变化加大。两种热值的比较见图 1。

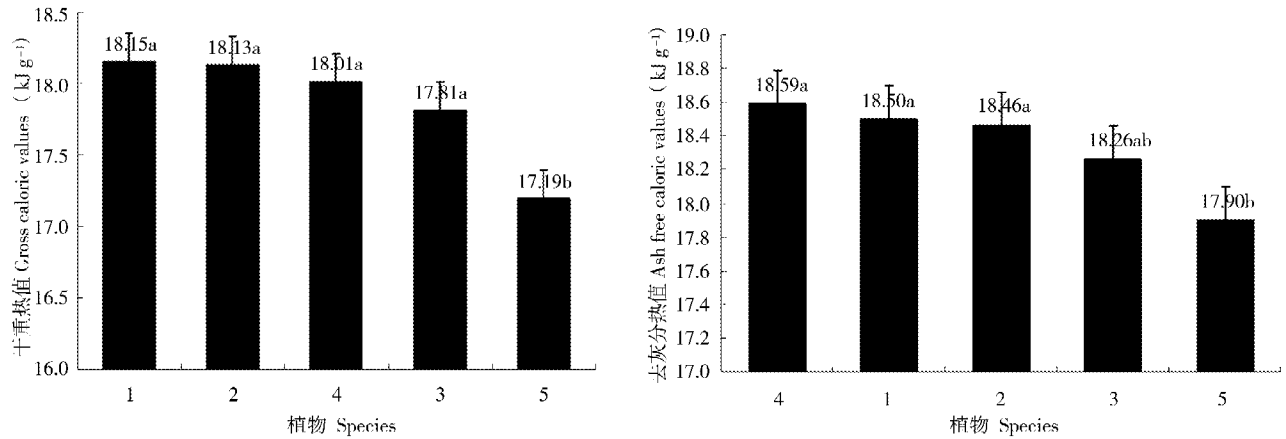


图1 5种桉树的干重热值和去灰分热值

Fig. 1 Gross calorific values and ash free calorific values of five eucalypt species

1. 巨桉 *E. grandis*; 2. 柳桉 *E. saligna*; 3. 大花序桉 *E. cloeziana*; 4. 粗皮桉 *E. pellita*; 5. 托里桉 *E. torelliana*。数据后不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。Data followed different letters present significant difference at 0.05 level.

与其他乔木植物的热值相比(表2),本研究的5种桉树平均干重热值和去灰分热值均不高,但桉树生长迅速、适应性强、轮伐期短(5~8 a),杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)等轮伐期较长( $\geq 15$  a),而一些常绿阔叶树如木荷(*Schima superba*)、米槠(*Castanopsis carlesii*)、厚桂壳(*Cryptocarya chinensis*)等生长缓慢、培育周期则更长,因此桉树作为能源树种利用具有显著优势。并且,植物热值的差异不仅与营养物质组成、形态结构等自身因素有关,还受光照、日照长短、土壤理化性质、植物年龄及采样时间等外界因素影响<sup>[1-2]</sup>。因此,不同植物品种的热值高低虽有一定规律,但不是恒定的。

有研究表明干重热值与植物的耐寒性有一定关系,耐寒品种比喜热品种具有更高的干重热值<sup>[22,25-26]</sup>,这对合理栽种能源桉树有实际指导意义。5种桉树以巨桉和柳桉的干重热值较为理想,反映出它们具有较强的抗低温适应性,这与许多桉树耐寒性研究的结论一致<sup>[34-37]</sup>。

## 4 讨论

热值是样品有机化合物组成及其含量的综合反映,能有效评价植物化学能累积效率的高低,灰分是植物体矿质元素氧化后的总和,不同植物以及植物不同组分或器官的热值和灰分含量均有所不同。

表2 不同植物种类的平均热值比较

Table 2 Comparison of average calorific values of different plants

植物 Species	取样地点 Site	平均干重热值 Average GCV (kJ g <sup>-1</sup> )	平均去灰分热值 Average AFCV (kJ g <sup>-1</sup> )	资料来源 Reference
米槠( <i>Castanopsis carlesii</i> )、木荷( <i>Schima superba</i> )、栲树( <i>Castanopsis fargesii</i> )	浙江天童 Tiantong, Zhejiang	18.76 ~ 19.47	19.19 ~ 19.85	[32]
福建柏( <i>Fokienia hodginsii</i> )、杉木( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	福建三明 Sanming, Fujian	20.76 ~ 20.88	20.91 ~ 21.04	[33]
锥栗( <i>Castanopsis chinensis</i> )、厚桂壳( <i>Cryptocarya chinensis</i> )、黄杞( <i>Engelhardtia roxburghiana</i> )、乌榄( <i>Canarium pimela</i> )、木荷( <i>S. superba</i> )	广东鼎湖山 Dinghushan Mountain, Guangdong	17.74 ~ 19.66	18.76 ~ 19.94	[30]
巨桉( <i>E. grandis</i> )、柳桉( <i>E. saligna</i> )、大花序桉( <i>E. cloeziana</i> )、粗皮桉( <i>E. pellita</i> )、托里桉( <i>E. torelliana</i> )	广东樟木头 Zhangmutou, Guangdong	17.19 ~ 18.15	17.90 ~ 18.59	本文 This paper

本研究 5 种桉树不同组分的灰分含量差异极显著( $P < 0.01$ ),大花序桉各组分的灰分含量与其它 4 种的不一致,表现了种的特异性。植株体平均灰分含量托里桉(3.96%) > 粗皮桉(3.05%) > 大花序桉(2.43%) > 巨桉(1.85%) > 柳桉(1.75%)。阮志平等<sup>[5]</sup>的研究表明,同一科属植物中,灰分含量低的种具有较强的耐寒能力,本研究巨桉、柳桉的灰分含量较低,与它们的耐寒性研究结果相符<sup>[34-37]</sup>。

5 种桉树不同组分的干重热值均以叶最高、皮最低,根、干、枝的大小排列顺序因种而异,这与植物本身的生物学特性有关。黄世能等<sup>[13]</sup>报道海南琼海雷林 1 号桉(*E. leizhou* No. 1)的干、枝、叶、根分别为  $19.88 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $19.51 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $23.30 \text{ kJ g}^{-1}$  与  $19.77 \text{ kJ g}^{-1}$ ,窿缘桉(*E. exserta*)的为  $19.97 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $20.08 \text{ kJ g}^{-1}$ 、 $21.99 \text{ kJ g}^{-1}$  与  $19.43 \text{ kJ g}^{-1}$ ,可见这两种桉树的干重热值也以叶最高,与本研究的结果相同。

灰分含量的差异可以引起干重热值的变化,本研究结果也证实了这一点。5 种桉树的干重热值巨桉 > 柳桉 > 粗皮桉 > 大花序桉 > 托里桉,而去灰分热值则为粗皮桉 > 巨桉 > 柳桉 > 大花序桉 > 托里桉,并且受灰分含量的影响,不同种相同组分的干重热值与去灰分热值的分布不完全一致。Golley<sup>[8]</sup>指出,去灰分热值能排除灰分对植物热值的影响,比干重热值能更好地反映植物的能量属性。

5 种桉树平均干重热值和去灰分热值分别以巨桉和粗皮桉最高,托里桉最低。Bhatt 等<sup>[38]</sup>认为,理想的植物燃料应具备热值高与灰分含量低的特点。从单位干物质的研究结果来看,巨桉、柳桉的干重热值较高且灰分含量较低,符合理想植物燃料的要求,选作能源树种较理想,托里桉最差。但在培育桉树能源林时,仅考虑品种的能量属性和灰分含量是不够的,还必须结合品种的速生性、适应性(如耐寒)等作综合比较,以选择合适的能源品种。

桉树作生物质能源利用时可全树利用,但由于各组分在树体的分配比例不一,如叶片的热值虽高但其占树体的比例却很小,因此在具体利用时须根据需求有所侧重。

## 参考文献

- [1] Zu Y G(祖元刚). Introduction to Energy Ecology [M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1990: 1-17. (in Chinese)
- [2] Ren H(任海), Peng S L(彭少麟), Liu H X(刘鸿先), et al. The caloric values of main plant species at Dinghushan, Guangdong, China [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1999, 23(2): 148-154. (in Chinese)
- [3] Jordan D F. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage [J]. J Ecology, 1971, 59: 127-142.
- [4] Sun G F(孙国夫), Zheng Z M(郑志明), Wang Z Q(王兆睿). Dynamics of caloric values of rice [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1993, 12(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] Ruan Z P(阮志平), Li Y Y(李元跃), Yang Z W(杨志伟), et al. Comparison of caloric values and ash contents in three palm species [J]. Guihaia(广西植物), 2007, 27(6): 929-931. (in Chinese)
- [6] Long F L. Application of calorimetric methods to ecological research [J]. Plant Physiol, 1934, 9(2): 323-327.
- [7] Golley F B. Energy values of ecological materials [J]. Ecology, 1960, 42(3): 581-584.
- [8] Golley F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation [J]. Ecology, 1969, 50(3): 517-519.
- [9] Wen D Z(闻大中). Study of energetics of agroecosystems in Northeastern China, II: Energy utilization in major crop system in northeastern plain of China [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1986, 5(5): 6-12. (in Chinese)
- [10] Wang F T(王方桃). Primary study on the energy coefficient of energy flow accounting in the agroecosystems of plain area [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1984, 3(6): 44-46. (in Chinese)
- [11] Bi Y F(毕玉芬), Che W G(车伟光). Studies on the caloric value of *Medicago* populations [J]. Acta Agrest Sin(草地学报), 2002, 10(4): 265-269. (in Chinese)
- [12] Liu S R(刘世荣), Cai T J(蔡体久), Chai Y X(柴一新), et al. Energy accumulation, distribution, fixation and transformation in man-made larch forest communities [J]. Chin J Ecol(生态学杂志), 1990, 9(6): 7-10. (in Chinese)
- [13] Huang S N(黄世能), Zheng H S(郑海水), He K J(何克军). Studies on the mixed fuelwood of *Eucalyptus* II: The allocation of biomass and energy in the stands [J]. For Res(林业科学研究), 1991, 4(5): 545-549. (in Chinese)
- [14] Lin C C(林承超). Caloric values and nutrient composition of the leaves of monsoon evergreen broad-leaved forest and some forest-edge plants on Gushan Mountain in Fuzhou [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 1999, 19(6): 832-836. (in Chinese)
- [15] Lin P(林鹏), Shao C(邵成), Zheng W J(郑文教). Study on the caloric values of dominating plants in a subtropical rain forest in Hexi of Fuzhou [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1996, 20(4): 303-309. (in Chinese)
- [16] 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 a tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan island [J]. Acta Phytoecol Sin(植物生态学报), 1996, 20(1): 1-10. (in Chinese)
- [17] Lin Y M(林益明), Lin P(林鹏), Li Z J(李振基). Study on energy of *Castanopsis eyrie* community in Wuyi Mountains of Fujian Province [J]. Acta Bot Sin(植物学报), 1996, 38(12): 989-994. (in Chinese)

- [18] Lin X Z(林小殊), Lin C H(林成辉). Consideration of developing eucalypts as bioenergy resource [J]. *Energ Environ(能源与环境)*, 2006, 4: 106-107.(in Chinese)
- [19] 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(1): 119-128.(in Chinese)
- [20] Zhong M R(钟慕尧), Huang S C(黄树才), Yang M S(杨民胜), et al. Study on differences in spatial structure of forest between different forest age of *Eucalyptus* plantations [J]. *For Sci Techn Guangdong(广东林业科技)*, 2005, 21 (4): 1-4.(in Chinese)
- [21] Paine R T. The measurement and application of the caloric to ecological problems [J]. *Ann Rev Ecol System*, 1971, 2: 145-146.
- [22] Lin Y M(林益明), Lin P(林鹏), Wang T(王通). Caloric values and ash contents of some mangrove woods [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2000, 11(2): 181-184.(in Chinese)
- [23] Hao C Y(郝朝运), Liu P(刘鹏). The caloric value of the dominant plant species of a *Heptacodium miconioides* forest at Bei Mountain, Zhejiang Province, China [J]. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 2006, 26 (6): 1609-1717.(in Chinese)
- [24] 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)*, 2004, 24(10): 2217-2224.(in Chinese)
- [25] Lin Y M(林益明), Li Z B(黎中宝), Chen Y Y(陈奕源), et al. Caloric values in leaves of some bamboo species in the bamboo garden of Hua'an County, Fujian [J]. *Chin Bull Bot(植物学通报)*, 2001, 18(3): 356-362.(in Chinese)
- [26] Lin P(林鹏), Lin G H(林光辉). Study on the caloric value and ash content of some mangrove species in China [J]. *Acta Phytoecol Geobot Sin(植物生态学与地植物学学报)*, 1991, 15(2): 114-120.(in Chinese)
- [27] Hou Y(侯庸), Wang B S(王伯荪), Zhang H D(张宏达), et al. 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(生态学报)*, 1998, 18(3): 263-268.(in Chinese)
- [28] Lin P(林鹏). *Mangrove Vegetation* [M]. Beijing: Ocean Press, 1984: 38-48.(in Chinese)
- [29] Chen M L(陈美玲), Shangguan Z P(上官周平). Characteristics of caloric value and nutrient content of four garden tree species [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 2008, 19 (4): 747-751.(in Chinese)
- [30] Kuang Y W(旷远文), Wen D Z(温达志), Zhou G Y(周国逸), et al. Caloric values of dominant species in the different layers of lower subtropical monsoon evergreen broad-leaved forest at Dinghushan Mountain [J]. *J Beijing For Univ(北京林业大学学报)*, 2005, 27(2): 6-12.(in Chinese)
- [31] Bidwell R G S. Translated by Liu F L(刘富林, 译). *Plant Physiology Vol. II* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1982: 173-181.(in Chinese)
- [32] Chen B(陈波), Yang Y C(杨永川), Zhou Y(周莹). Caloric values of seven dominant species in Tiantong National Forest Park, Zhejiang Province, China [J]. *J E China Norm Univ (Nat Sci)(华东师范大学学报:自然科学版)*, 2006(2): 105-111.(in Chinese)
- [33] He Z M(何宗明), Chen G S(陈光水), Wang Q Z(王巧珍), et al. Energy of a 33-year-old *Fokienia hodginsii* plantation community [J]. *Chin J Appl Environ Biol(应用与环境生物学报)*, 2003, 9(6): 569-573.(in Chinese)
- [34] Huang D L(黄德龙), Huang X M(黄秀美), Wu Z Z(吴载璋), et al. Introduction trial of cold-tolerant *Eucalyptus* and its provenance [J]. *China For Sci Techn(林业科技开发)*, 2003, 17(6): 18-21.(in Chinese)
- [35] Shi Y F(石燕飞), Bo J S(柏劲松), Zhu J H(朱金惠), et al. The introduction and the planting technology of the cold-resistance *Eucalyptus* in Yongzhou City [J]. *Hunan For Sci Techn(湖南林业科技)*, 2004, 31(5): 31-34.(in Chinese)
- [36] Qian G C(钱国财), Yang R B(杨仁标), Huang R G(黄日奎), et al. A preliminary report on the cold-resistance experiment of 10 species 26 species lot numbers of *E. nitens*, etc [J]. *J Fujian For Sci Techn(福建林业科技)*, 2001, 28(Suppl): 19-24.(in Chinese)
- [37] Lin M J(林睦就), Li B H(李柏海). Study on introduction of cold-tolerant *Eucalyptus* in Hunan [J]. *Hunan For Sci Techn(湖南林业科技)*, 2003, 30(3): 27-33.(in Chinese)
- [38] Bhatt B P, Todaria N P. Fuel wood characteristics of some mountain trees and shrubs [J]. *Biomass*, 1990, 21: 233-238.