

# 短周期尾巨桉能源林生物量与能量特征研究

周群英<sup>1\*</sup>, 陈少雄<sup>1</sup>, 韩斐扬<sup>2</sup>, Roger ARNOLD<sup>1</sup>

(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:** 为开发和利用尾巨桉能源林, 通过测量 1~4 年生植株的叶片、树枝、树根、树干和树皮的热值和生物量, 对短周期尾巨桉能源林的生物量和能量特征进行了研究。结果表明, 尾巨桉叶片、树枝、树干、树根、树皮和林分生物量均随林龄增加而增加, 叶片、树枝、树皮生物量占单株总生物量的比例逐年减小, 而树干则呈逐年升高趋势。1~4 年生尾巨桉单株和林分的生物量分别为 4.32~66.29 kg 和 10.68~153.33 t hm<sup>-2</sup>。生物量的结构特征表明, 尾巨桉林分在第 4 年开始郁闭, 生长以增加树干的生物量为主。尾巨桉各组分平均干质量热值为 17.23~20.56 kJ g<sup>-1</sup>, 且差异极显著 ( $P < 0.01$ ), 以叶片的值最高、树皮的最低; 同一组分不同林龄的热值差异不显著 ( $P > 0.05$ )。1~4 年生尾巨桉的单株和林分能量现存量为 81.61~1255.22 MJ 和 201.83~2903.32 GJ hm<sup>-2</sup>, 其变化趋势及大小排列顺序与生物量相同。因此, 对尾巨桉能源林可以 4 年短周期进行经营。

**关键词:** 尾巨桉; 组分; 生物量; 干质量热值; 能量

doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2013.01.006

## Studies on Biomass and Energy Characteristics of Short Rotation Energy Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

ZHOU Qun-ying<sup>1\*</sup>, CHEN Shao-xiong<sup>1</sup>, HAN Fei-yang<sup>2</sup>, Roger ARNOLD<sup>1</sup>

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

**Abstract:** In order to development and utilization of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation, biomass and calorific values of 1- to 4-year-old *E. urophylla* × *E. grandis* were determined to reveal biomass and energy characteristics of *Eucalyptus* at different ages. The results showed that the biomass of leaves, branches, stem, roots, bark and total biomass increased with increasing age. The ratio of leaf, branch and bark biomass to total biomass decreased with age, while the ratio of stem biomass to total biomass increased. Biomass of 1- to 4-year-old individual and stands ranged from 4.32 to 66.29 kg, and 10.68 to 153.33 t hm<sup>-2</sup>, respectively. Biomass structure characteristics revealed that *Eucalyptus* plantation began to closure at the 4<sup>th</sup> year, and stem growth was dominant. Gross calorific values had significant difference ( $P < 0.01$ ) among five components, such as leaf, branch, root, stem and bark, with ranged from 17.23 kJ g<sup>-1</sup> for bark to 20.56 kJ g<sup>-1</sup> for leaf, those of the same component had no significant differences among different ages ( $P > 0.05$ ). The retained energy of 1- to 4-year-old individual and stands ranged from 81.61 to 1255.22 MJ and 201.83 to 2903.32 GJ hm<sup>-2</sup>, respectively, the change trend and orders of components were the same as biomass. Therefore, it suggested that *E. urophylla* × *E. grandis* energy plantation could manage with short rotation for 4 years.

**Key words:** *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; Component; Biomass; Gross calorific value; Energy

收稿日期: 2012-04-09 接受日期: 2012-07-06

基金项目: 林业公益性行业科研专项(201104003)资助

作者简介: 周群英(1978~), 女, 高级工程师, 主要从事桉树培育和科研管理工作

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qyzhou999@sina.com

生物质能一直是人类赖以生存的重要能源,仅次于煤炭、石油和天然气而居于世界能源消费总量第四位,在整个能源系统中占有重要地位。生物质能源的发展方向早在1981年联合国新能源和可再生能源会议上就已得到肯定;2004年在波恩召开的可再生能源国际会议上强调,生物质能源是未来最有希望的能源之一<sup>[1]</sup>。作为生物质能源的一部分,林业生物质能源对有效补充我国能源、改善能源结构和保护生态环境将发挥重要的作用。

桉树(*Eucalyptus* sp.)不仅是工业原料林生产的重要树种,也是林业生物质能利用的良好原材料,可直接作为薪材使用,并可用于生物质发电及生产生物柴油等。生物质能源林经营的最大目的是寻求能量的最大产出,而林分总能量的输出取决于树木各组分的热值及其生物量。研究表明,热值可反映植物对太阳辐射能的利用状况,能有效地评价植物的生长状况<sup>[2-3]</sup>;生物量是指一个有机体或群落一定时间内积累的有机质总量,可作为研究森林生态系统结构和功能的重要依据<sup>[4-5]</sup>,是评价能源林产量的重要指标。本文以尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)为研究对象,从能量生态学角度出发,通过研究其各组分的热值和生物量,了解在短周期内(1~4年)林分的能量结构特征,为合理开发和利用尾巨桉生物质能源林提供基础数据。

## 1 试验地及林分概况

试验地位于广东省遂溪县国营雷州林业局北坡林场(21°15' N, 109°59' E),属南亚热带海洋性季风气候。最冷月平均气温14℃(1月),最热月平均气温28℃(7月),年均气温23.5℃。年降雨量为1600~1900 mm,4~9月为雨季,占全年降雨量的85.5%,年相对湿度80.4%。林地地势平坦,土层厚度在80 cm以上,为浅海沉积沙质砖红壤,肥力低

下、酸度大(pH为5.3)<sup>[6]</sup>。

试验林为尾巨桉无性系纯林,株行距为2 m × 2 m (2500 ind. hm<sup>-2</sup>),种植穴的规格为50 cm × 50 cm × 40 cm。造林前每穴施0.5 kg复合肥作基肥,定植后3个月追施复合肥(0.5 kg ind.<sup>-1</sup>)。1~4年生尾巨桉林分生长概况见表1。

## 2 材料和方法

### 2.1 生物量的测定

在1~4年生试验林内各随机设立3块20 m × 20 m的样地,对样地内进行每木检尺,根据树高和胸径选取各林龄、不同径级(2 cm为一径级)的平均木3株并砍伐。地上部分采用分层切割法分别测定树干、树皮、树枝、叶片的鲜质量,地下部分按根系的主要分布层内(0~20、21~40、41~60 cm)将根挖出,测量各层根的鲜质量。采集各平均木不同组分的鲜质量样品500 g,在80℃下烘至恒重,计算样品的含水率和干质量生物量。用径级平均木的单株生物量乘以该径级的林木株数得到该径级的林分生物量。各径级的林分生物量的总和即为林分总生物量。

### 2.2 热值的测定

收集所有伐倒样木的叶片、树枝、树根、树干和树皮共5个组分用于热值测定。样品先在105℃下烘10 min,然后在80℃下烘至恒质量,磨粉后过筛装瓶贮存备用。用WZR-1TC II型电脑自动热量计测定样品的干质量热值。

### 2.3 生物量结构特征

生物量结构特征是指林分各组分质量之间或各组分质量与总生物量的比值<sup>[7]</sup>。主要指标有:

$$\text{枝叶比}(BNR) = W_{\text{树枝}} / W_{\text{叶片}};$$

表1 尾巨桉林分生长概况

Table 1 Growth state of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation

林龄	平均树高	平均胸径	造林密度	林分保存率	现实密度
Age (a)	Average height (m)	Average DBH (cm)	Planting density (ind. hm <sup>-2</sup> )	Survival (%)	Current density (ind. hm <sup>-2</sup> )
1	5.4	4.4	2500	98.9	2473
2	14.0	10.0	2500	96.3	2408
3	16.0	11.3	2500	95.7	2393
4	17.5	12.2	2500	92.5	2313

枝叶指数(BNI) =  $(W_{\text{树枝}} + W_{\text{叶片}}) / W_{\text{总}}$ ;

光合器官与非光合器官比值(FC) =  $W_{\text{叶片}} / W_{\text{总}}$ ;

干材与地上部分生物量比值(STR) =  $W_{\text{树干}} / (W_{\text{总}} - W_{\text{树根}})$ 。

### 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 结果和分析

### 3.1 生物量

#### 3.1.1 现存生物量

不同林龄尾巨桉单株各组分的生物量及其分配见表 2。随着林龄增加,单株各组分的生物量均增加,但分配比例发生变化。叶片、树枝、树皮生物量所占比例逐渐下降,4年生比1年生的生物量所占比例分别下降了 7.04%、10.7% 和 7.43%;树干生物量所占比例逐年上升,4年生所占比例已高达 75% 以上;树根生物量所占比例的变化无显著

规律。不同林龄各组分生物量的大小顺序为:1年生“树干>树枝>树皮>树根>叶片”,2年生“树干>树枝>树根>树皮>叶片”,3~4年生同为“树干>树根>树枝>树皮>叶片”。由此可见,在任一林龄阶段树干生物量在所有组分中均是最高的,表明在尾巨桉生长过程中光合作用的主要产物基本用于增加树干的生物量。至4年生时,单株现存生物量达 66.29 kg,分别是 1~3年生的 15.34、2.47 和 1.74 倍。

随林龄增加,林分的现存生物量显著增加(图 1)。4年生林分的现存生物量达  $153.33 \text{ t hm}^{-2}$ ,是 1~3年生林分的 14.36、2.38 和 1.68 倍。就增长量而言,4年生林分生物量的增幅最大,为  $62.23 \text{ t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ,2年生的次之( $53.88 \text{ t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ ),3年生的最少( $26.54 \text{ t hm}^{-2}\text{a}^{-1}$ )。由于林分保存率随林龄增加而有所下降(表 1),因此林分最终现存生物量会低于实际造林密度所拥有的数值。

#### 3.1.2 生物量结构特征

表 3 是不同林龄尾巨桉生物量的结构特征。BNR 在 1~3年生时逐年上升,至第4年时下降,表明此时林分已开始郁闭,枝叶的生长空间受到

表 2 不同林龄尾巨桉单株现存生物量及其分配

Table 2 Retained biomass and allocation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* individuals at different ages

林龄 Age (a)	现存生物量 Retained biomass (kg)					合计 Total
	叶片 Leaf	树枝 Branch	树根 Root	树干 Stem	树皮 Bark	
1	0.42(9.72%)	0.78(18.05%)	0.46(10.65%)	2.06(47.69%)	0.60(13.89%)	4.32(100%)
2	1.06(3.95%)	2.98(11.12%)	2.12(7.91%)	18.56(69.22%)	2.09(7.80%)	26.81(100%)
3	1.21(3.18%)	3.56(9.35%)	3.85(10.11%)	26.71(70.16%)	2.74(7.20%)	38.07(100%)
4	1.78(2.68%)	4.87(7.35%)	5.56(8.39%)	49.80(75.12%)	4.29(6.46%)	66.29(100%)

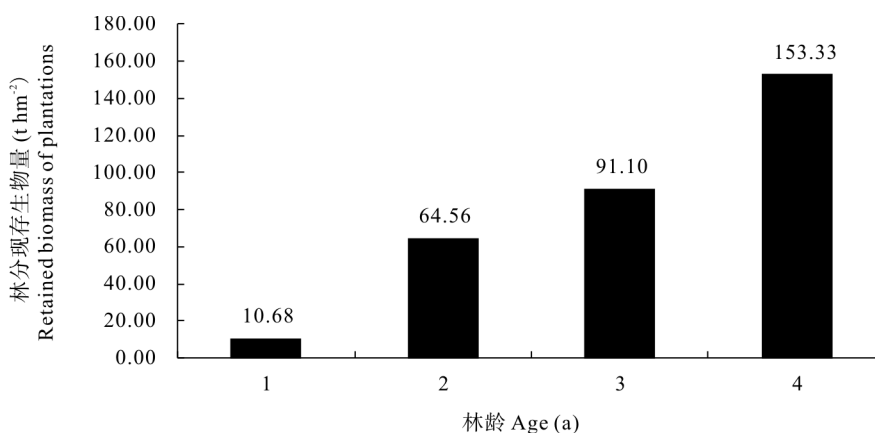


图 1 不同林龄尾巨桉林分生物量现存量

Fig. 1 Retained biomass of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different ages

表 3 不同林龄尾巨桉生物量的结构特征

Table 3 Biomass structure of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* at different ages

林龄 Age (a)	指标 Index			
	BNR	BNI	FC	STR
1	1.695	0.287	0.107	0.528
2	2.815	0.151	0.040	0.752
3	2.940	0.125	0.032	0.781
4	2.743	0.100	0.027	0.820

一定限制。随着林龄增加, BNI 和 FC 逐年下降, STR 则上升, 表明尾巨桉的生长过程是以增加树干生物量为主。

### 3.2 干质量热值

在能量生态研究时, 干质量热值在将植物生物量转换成相应能量时具有实用价值<sup>[8]</sup>。表 4 的方差分析表明, 尾巨桉各组分的干质量热值差异极显著( $P < 0.01$ ), 同一组分不同林龄的差异不显著( $P > 0.05$ ), 表明随林龄增加, 尾巨桉干质量热值并未出现显著的上升或下降的趋势。从表 5 可知, 尾巨桉

叶片的干热量热值最高, 均在  $20 \text{ kJ g}^{-1}$  以上, 平均值高达  $20.56 \text{ kJ g}^{-1}$ ; 其次是树枝, 均在  $19 \text{ kJ g}^{-1}$  以上; 树根与树干的值较为接近, 均在  $18.66 \text{ kJ g}^{-1}$  以上; 树皮的最低, 均低于  $17.50 \text{ kJ g}^{-1}$ , 4 年生的更是低于  $17 \text{ kJ g}^{-1}$ 。4 个林龄阶段不同组分的干质量热值的大小顺序为: 1 年生和 4 年生为叶片 > 树枝 > 树干 > 树根 > 树皮; 2 年生为叶片 > 树枝 > 树根 > 树干 > 树皮; 3 年生为叶片 > 树干 > 树枝 > 树根 > 树皮。相同林龄不同组分的平均值为  $18.91 \sim 19.07 \text{ kJ g}^{-1}$ , 林龄间的差异较小。

### 3.3 能量结构

能量现存量由各组分的平均干质量热值与各组分的现存生物量相乘累加而得<sup>[9]</sup>, 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。从表 6 可见, 随林龄增加, 各组分及单株的能量现存量均增加。虽然不同组分热值大小存在差异, 但生物量的大小直接决定了其能量现存量的优势。4 年生单株的能量现存量达  $1255.22 \text{ MJ}$ , 分别是 1~3 年生单株的 15.38、2.49 和 1.72 倍。不同组分能量现存量与现存生

表 4 尾巨桉干质量热值方差分析

Table 4 Variance analyses of gross calorific values of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*

	变异源 Variation source	平方和 Sum of square	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
林龄 Age	组间 Between groups	0.471	3	0.157	0.126	0.945
	组内 Within groups	145.051	116	1.250		
	总计 Total	145.522	119			
组分 Component	组间 Between groups	135.266	4	33.816	379.173	0.000
	组内 Within groups	10.256	115	0.089		
	总计 Total	145.522	119			

表 5 不同林龄尾巨桉的干质量热值

Table 5 Gross calorific value of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* at different ages

林龄 Age (a)	干质量热值 Gross calorific value ( $\text{kJ g}^{-1}$ )					平均 Average
	叶片 Leaf	枝 Branch	根 Root	树干 Stem	树皮 Bark	
1	20.40±0.19A	19.20±0.37B	18.66±0.56C	18.98±0.12BC	17.31±0.11D	18.91
2	20.85±0.23A	19.33±0.07B	19.02±0.11C	18.78±0.12D	17.37±0.11E	19.07
3	20.22±0.45A	19.16±0.14ABC	18.98±0.18C	19.33±0.16AB	17.44±0.23D	19.03
4	20.75±0.09A	19.26±0.16B	18.94±0.25C	19.02±0.23C	16.78±0.12D	18.95
平均 Average	20.56	19.24	18.90	19.03	17.23	

同行数字后不同大写字母表示差异极显著( $P < 0.01$ )。

Data followed different capital letters within line indicate significant difference at 0.01 level.

表 6 不同林龄尾巨桉单林的能量现存量及其分配

Table 6 Retained energy and allocation of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation at different ages

林龄 Age (a)	能量现存量 Retained energy (MJ ind. <sup>-1</sup> )					合计 Total
	叶片 Leaf	枝 Branch	根 Root	树干 Stem	树皮 Bark	
1	8.57(10.50%)	14.98(18.35%)	8.58(10.52%)	39.10(47.91%)	10.39(12.73%)	81.61(100%)
2	22.10(4.38%)	57.60(11.41%)	40.32(7.99%)	348.56(69.04%)	36.30(7.19%)	504.89(100%)
3	24.47(3.35%)	68.21(9.35%)	73.07(10.01%)	516.30(70.74%)	47.79(6.55%)	729.84(100%)
4	36.94(2.94%)	93.80(7.47%)	105.31(8.39%)	947.20(75.46%)	71.99(5.73%)	1255.22(100%)

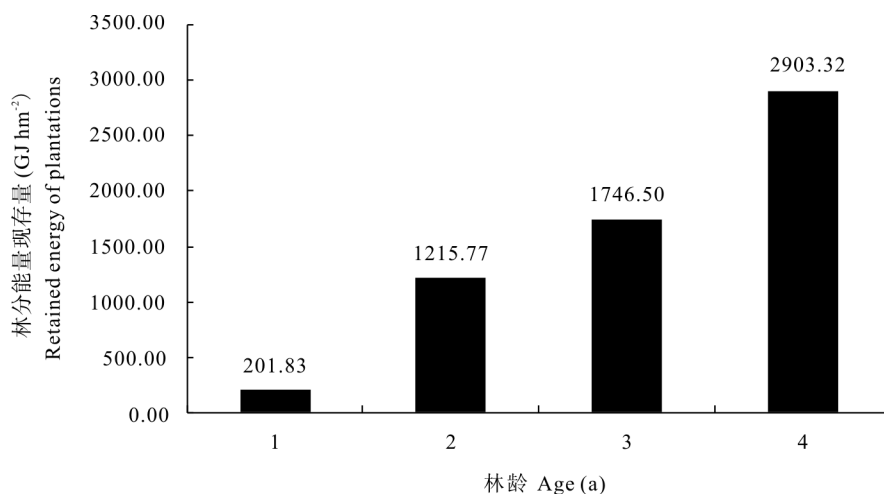


图 2 不同林龄尾巨桉林分能量现存量

Fig. 2 Retained energy of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different age

物量的排列顺序相同。组分干质量热值的差异导致其能量现存量的分配比例较生物量现存量有所不同,如叶片的热值最高,其4个林龄阶段的能量现存量分配比例较生物量的分配比例均有所升高,升幅为0.17%~0.83%;树皮则反之,降幅为0.35%~0.73%。4年生尾巨桉林分能量现存量达2903.32 GJ hm<sup>-2</sup>,分别是1~3年生的14.38、2.39和1.66倍(图2),其变化趋势与生物量相近。

## 4 结论和讨论

本研究结果表明,尾巨桉叶片、树枝、树根、树干、树皮及林分生物量均随林龄增加而升高,叶片、树枝、树皮生物量所占比例逐年下降,树干生物量则相反,树根生物量变化无显著规律。生物量结构特征数据表明,尾巨桉林分在第4年开始郁闭,枝叶的生长空间受到一定限制,林分生长过程以增加树干的生物量为主,这与薛鹏<sup>[10]</sup>的研究结果相

似。本研究中,4年生尾巨桉林分现存生物量为153.33 t hm<sup>-2</sup>,高于广东省遂溪县北坡林场4年生尾细桉(*E. urophylla* × *E. tereticornis*)的147.28 t hm<sup>-2</sup><sup>[11]</sup>、广东省廉江市石岭林场7.5年生尾叶桉(*E. urophylla*)的112.60 t hm<sup>-2</sup>、赤桉(*E. camaldulensis*)的83.81 t hm<sup>-2</sup>和雷林1号桉(*E. leizhou* No.1)的71.36 t hm<sup>-2</sup><sup>[12]</sup>,表明尾巨桉在桉树品系中表现优良,具有较强的速生性能。

尾巨桉不同组分的干质量热值差异显著,同一组分不同林龄的热值差异不显著,这与周群英等<sup>[11,13]</sup>及韩斐扬等<sup>[14-15]</sup>的研究结果一致。4个林龄阶段中,叶片的干质量热值最高,树皮的最低,这与周群英等<sup>[11-13,16]</sup>的研究结果一致。本研究结果表明,1~4年生尾巨桉植株的平均干质量热值为18.91~19.07 kJ g<sup>-1</sup>,高于云南牟定2~6年生史密斯桉(*E. smithii*)的18.61~18.86 kJ g<sup>-1</sup><sup>[14]</sup>,与广东省遂溪县北坡林场1~4年生尾细桉的18.88~19.15 kJ g<sup>-1</sup>接近<sup>[12]</sup>,低于广东省廉江市石岭林场7.5年生赤

桉的  $19.15 \text{ kJ g}^{-1}$ 、尾叶桉的  $19.17 \text{ kJ g}^{-1}$ 、尾细桉的  $19.18 \text{ kJ g}^{-1}$  及雷林 1 号桉的  $19.32 \text{ kJ g}^{-1}$  [12]。植物热值受多种因素影响,除与植物自身营养物质组成密切相关外,还受光强、土壤理化性质、日照长短、采样季节等外界因素共同作用,因此不同植物的热值高低虽有一定规律,但不是恒定的。

尾巨桉各组分和林分的能量现存量均随林龄增加而增加。因受各组分热值差异的影响,尾巨桉各分组的能量分配比例与生物量的不同,但生物量的大小直接决定其能量现存量的优势,因此能量分配比例的变化趋势与生物量的相同。4 年生尾巨桉林分的能量现存量达  $2903.32 \text{ GJ hm}^{-2}$ ,与同属品系林分的能量现存量相比,高于广东省遂溪县北坡林场 4 年生尾细桉的  $2837.20 \text{ GJ hm}^{-2}$  [11]、云南牟定 6 年生史密斯桉的  $1789.91 \text{ GJ hm}^{-2}$  [14] 及广东省廉江市石岭林场 4.5 年生雷林 1 号桉的  $1482.91 \text{ GJ hm}^{-2}$  [15],表明尾巨桉对自然环境的资源利用效率较高,具有较高的能量固定能力和生产力。

关于能源林的种植密度与采伐周期已有研究报道。巴西的澳洲金合欢(*Acacia decurrens*) 3 年收获时的密度以  $1 \times 10^4 \text{ ind. hm}^{-2}$  的生物量最大 [17]; Mead [18] 认为典型的桉树能源林收获周期为 7 年,密度为  $900 \sim 1500 \text{ ind. hm}^{-2}$ ;对于巨桉,一般的造林密度为  $2268 \text{ ind. hm}^{-2}$ ,采伐年龄为 4 年 [18];韩斐扬等 [14] 建议史密斯桉能源林的采伐周期应为 6 年;澳大利亚的桉树能源林第 5 年起开始采收 [19]。本研究尾巨桉能源林初植密度为  $2500 \text{ ind. hm}^{-2}$ ,虽林分生物量有随林龄增加而增加的趋势,但因病虫害、自然灾害等不可抗拒因素而导致林分保存率逐渐下降,现实密度将低于  $2500 \text{ ind. hm}^{-2}$ ,最终林分能量产出会受到一定影响。结合相关研究结果,作为能源林培育的桉树人工林可适当密植。发展林业生物质能源需有充足的原料保证,而要实现林木的高能效转化,就必须把尾巨桉的生产力全部发挥出来。本研究的尾巨桉能源林能量产出在第 4 年时增幅最大,为保证生物质能源供应,缩短经营周期,减少成本投入,建议在适当密植的条件下,以 4 年短周期对其能源林进行采收。

## 参考文献

- [1] Li J, Xu X. Research on the value of *Eucalyptus* biomass energy [J]. *Techn Dev Enterp*, 2008, 27(9): 96–98.  
李俊, 许兴. 桉树生物质能源的价值研究 [J]. *企业技术开发*, 2008, 27(9): 96–98.
- [2] Guan L L, Zhou X Y, Luo Y. A review on the study of plant caloric value in China [J]. *Chin J Ecol*, 2005, 24(4): 452–457.  
官丽莉, 周小勇, 罗艳. 我国植物热值研究综述 [J]. *生态学杂志*, 2005, 24(4): 452–457.
- [3] Bao Y Z, Li Z H, Han X G, et al. Plant caloric value and its bio-ecological attributes [J]. *Chin J Ecol*, 2006, 25(9): 1095–1103.  
鲍雅静, 李政海, 韩兴国, 等. 植物热值及其生物生态学属性 [J]. *生态学杂志*, 2006, 25(9): 1095–1103.
- [4] Somogyi Z, Cienciala E, Mäkipää R, et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation [J]. *Eur J For Res*, 2007, 126(2): 197–207.
- [5] Garkoti S C. Estimates of biomass and primary productivity in a high-altitude maple forest of the west central Himalayas [J]. *Ecol Res*, 2008, 23(1): 41–49.
- [6] He G H, Lin H, Chen W P. Study of field trial on *Eucalyptus tereticornis* families [J]. *Guangdong For Sci Techn*, 2009, 25(2): 30–35.  
何国华, 林桦, 陈文平. 细叶桉家系选育试验研究 [J]. *广东林业科技*, 2009, 25(2): 30–35.
- [7] Qi L H, Zhang X D, Zhou J X, et al. Changing regularities and structural characteristics of the biomass and productivity of aerially seeded *Pinus massoniana* plantation [J]. *For Res*, 2007, 20(3): 344–349.  
漆良华, 张旭东, 周金星, 等. 马尾松飞播林生物量与生产力的变化规律与结构特征 [J]. *林业科学研究*, 2007, 20(3): 344–349.
- [8] Kuang Y W, Wen D Z, Zhou G Y, et al. Comparison of caloric value, C/N ratio and ash content in the leaves of seedlings of nine species under air pollution stress [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2005, 13(2): 117–122.  
旷远文, 温达志, 周国逸, 等. 大气污染胁迫下 9 种植物幼苗叶片热值、C/N 和灰分含量比较 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13(2): 117–122.
- [9] Zhang Q H, Ye G F, Lin Y M. Studies on energy of *Casuarina equisetifolia* plantation on degraded coastal sand [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, 42(8): 1–7.  
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.
- [10] Xue P. Growth and biomass of six-year-old *Eucalyptus urophylla* plantation in Leizhou Forestry Bureau [J]. *Euc Sci Techn*, 2009, 26(1): 18–21.  
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.
- [11] Zhou Q Y, Chen S X, Han F Y, et al. Biomass and energy allocation in *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus tereticornis* plantations at different stand ages [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21(1): 16–22.  
周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等. 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*, 2010, 21(1): 16–22.

- [12] Zhou Q Y, Chen S X, Han F Y, et al. Comparison study on biomass and energy of five eucalypt clones [J]. *For Res*, 2010, 23(1): 18–24.  
周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等. 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*, 2010, 23(1): 18–24.
- [13] Zhou Q Y, Chen S X, Han F Y, et al. Ash contents and caloric values of *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* in different stand ages [J]. *Guihaia*, 2011, 31(1): 75–80.  
周群英, 陈少雄, 韩斐扬, 等. 不同林龄巨尾桉的灰分含量和热值 [J]. *广西植物*, 2011, 31(1): 75–80.
- [14] Han F Y, Zhou Q Y, Chen S X, et al. Standing crop and energy of *Eucalyptus smithii* energy plantation at different ages [J]. *Chin J Trop Crops*, 2010, 31(2): 298–303.  
韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 等. 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*, 2010, 31(2): 298–303.
- [15] Han F Y, Zhou Q Y, Chen S X, et al. Study on biomass and energy of two different-aged *Eucalyptus* stands [J]. *For Res*, 2010, 23(5): 690–696.  
韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 等. 2种桉树不同林龄生物量与能量的研究 [J]. *林业科学研究*, 2010, 23(5): 690–696.
- [16] Zhou Q Y, Chen S X, Wu Z H, et al. Energy characteristics of five *Eucalyptus* species in Zhangmutou Forest Farm, Guangdong Province [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2009, 17(6): 549–555.  
周群英, 陈少雄, 吴志华, 等. 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*, 2009, 17(6): 549–555.
- [17] Kang S Z, Jia L M, Peng Z D, et al. Progress on the species choice and silvicultural practices of fuel energy forest [J]. *World For Res*, 2007, 20(3): 27–33.  
康树珍, 贾黎明, 彭祚登, 等. 燃料能源林树种选育及培育技术研究进展 [J]. *世界林业研究*, 2007, 20(3): 27–33.
- [18] Mead D J. Opportunities for improving plantation productivity: How much? How quickly? How realistic? [J] *Biomass Bioenergy*, 2004, 28(2): 249–266.
- [19] Han F Y. Study on energy structure features of *Eucalyptus* plantations and species selection for *Eucalyptus* energy forest [D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2010: 1–13.  
韩斐扬. 桉树人工林能量结构特征与能源林品种选择 [D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010: 1–13.