

2 种桉树不同林龄生物量与能量的研究

韩斐扬¹, 周群英¹, 陈少雄^{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:对广东廉江市石岭林场 2 种桉树不同林龄的生物量和能量进行了研究。结果表明:2 种桉树各器官生物量及林分生物量都随林龄的增大而增大,各器官生物量都以干的最大,叶的最小。4.5 年生雷林 1 号桉和尾巨桉林分生物量分别为 77.13、80.03 t·hm⁻²。不同器官间灰分含量、干质量热值、去灰分热值差异很大,排序分别为:皮>叶>根>枝>干,叶>枝或干>根>皮,叶>枝或根>干>皮。叶、枝、根、干的灰分含量随林龄的增大有减小的趋势,而干质量热值则相反;皮的灰分含量和干质量热值随林龄的变化与前者相反。植株体的平均灰分含量与林龄呈不显著的负相关,平均干质量热值和去灰分热值则与林龄呈不显著的正相关。4.5 年生雷林 1 号桉和尾巨桉林分能量现存量分别为 1 482.91、1 515.06 GJ·hm⁻²。各林龄不同器官能量的大小顺序与生物量的排列顺序一致。2 种桉树林分生物量和林分能量的平均生长量都在 3.5 年生时达到最大。

关键词:桉树;生物量;热值;能量

中图分类号:S792.39

文献标识码:A

Study on Biomass and Energy of Two Different-aged *Eucalyptus* Stands

HAN Fei-yang¹, ZHOU Qun-ying¹, CHEN Shao-xiong¹, 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 524348, Guangdong, China)

Abstract: The biomass and energy of two different-aged *Eucalyptus* stands in Lianjiang city, Guangdong Province were studied. The results are as follows: The total retained biomass of plantation and the total biomass of various organs increased as the stand ages increased. The biomass of various organs were different, the stem's biomass was the highest while the leaf's was the lowest among five organs of different stand ages. The total retained biomass of 4.5-year-old *E. leizhouensis* No. 1 and *E. urophylla* × *E. grandis* plantation were 77.13 t·hm⁻² and 80.03 t·hm⁻². The ash content (AC), gross caloric values (GCV) and ash free caloric values (AFCV) of various organs were different. The order of AC, GCV and AFCV of various organs were bark > leaf > root > branch > stem, leaf > branch or stem > root > bark, leaf > branch > stem or root > bark. The AC of leaf, branch, root and stem increased as the stand ages increased, the GCV of them changed oppositely. The AC of bark decreased as the stand ages increased, the GCV of them changed oppositely. The average of AC of individual had not a significant negative correlation with the stand ages, the average of GCV and AFCV of individual had not a significant positive correlation with the stand ages. The total retained energy of 4.5-year-old *E. leizhouensis* No. 1 and *E. urophylla* × *E. grandis* plantation were 1 482.91 GJ·hm⁻² and 1 515.06 GJ·hm⁻². The energy of various organs at different ages changed and distributed as more or less with the biomass of plantation. The mean annual increments of the total retained bio-

收稿日期: 2009-12-23

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“桉树能源林栽培和主要品种木材热值研究”(No. CAFINT2008C13); 国家林业局“948”项目“优良能源树种丛生桉选育技术引进”(No. 2007-4-12)

作者简介: 韩斐扬(1986—), 男, 河南确山人, 硕士生, 主要从事桉树生物量与热值研究。

* 通讯作者, sxchen01@163.com

mass and energy of plantation of two *Eucalyptus* stands were the maximum in 3.5 years.

Key word: *Eucalyptus*; biomass; caloric values; energy

生物量作为森林生态系统的特征数据^[1-2],是研究森林生态系统结构和功能的基础^[3-4]。生物量是衡量能源林产量的主要指标之一,也是衡量生态系统在一定时间内固碳能力大小的重要指标。能量是生态学功能研究的基本概念之一, Gupta^[5]、Jordan^[6]研究认为,应用能量的概念研究植物群落比单纯用干物质测定更能反应出植物对自然资源(特别是太阳能)的利用情况。张海清等^[7]认为,结合生物量和能量能够更好地评价树种在该立地条件下的适应性。

桉树是我国热带、亚热带地区的主要造林树种,桉树人工林已成为目前世界上单位面积森林生产力最大的森林生态系统^[8]。另外,桉树生物量大、全树热值均高、抗逆性强及易管理等优点使其作为生物质能源树种利用具有显著的优势和极高的价值^[8]。因此,研究桉树生物量和能量及其分布规律,不仅对了解桉树人工林生态系统能流与生物量生产之间的关系,更充分的阐明其功能特征及太阳能利用状况有着重要的意义,还可以为我国生物质能源林的发展提供理论依据。目前,有关桉树生物量的研究已有很多报道^[9-11],但有关桉树热值和能量研究的报道还不多^[12-14],尚未见桉树不同林龄生物量和能量及其变化规律的报道。本文通过对广东雷州半岛石岭林场雷林1号桉(*Eucalyptus leizhouensis* NO 1)和尾巨桉(*E. urophylla* S. T. Blake × *E. grandis* W. Hill ex. Maiden)的生物量现存量、不同器官的热值及能量现存量进行研究,比较不同林龄生物量与能量的差异,旨在全面了解桉树林分特征、生产力,也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),属南亚热带季风气候,年平均气温22.9℃,最热月平均气温28℃(7月),最冷月平均气温14℃(1月);年平均日照1884h;4-9月为雨季,年平均降水量1600~1900mm。地势平坦,成土母质为浅海沉积物,土层较深,但土壤肥力低下,酸度大。

试验林均为桉树纯林,无性系苗造林,穴规格为50cm×50cm×40cm,造林前施复合肥0.5kg·

穴⁻¹,定植后3个月追施复合肥0.5kg·株⁻¹,此后第2、3年的4月份各追肥1次,肥料为复合肥0.3kg·株⁻¹+尿素0.2kg·株⁻¹,所有林分的抚育管理措施完全一致。4个不同林龄的雷林1号桉和尾巨桉共8种林分试验地均位于石岭林场方圆5km之内,植被、土壤类型等立地条件一致。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.)等。土壤为浅海沉积物砖红壤,土壤肥力较低,有机质含量为15.54g·kg⁻¹(4级),全N含量为0.93g·kg⁻¹(4级),速效N、P、K含量分别为87.2(4级)、0.9(6级)、18.7(6级)mg·kg⁻¹,总体土壤养分偏低^[15]。各林分状况见表1。

表1 2种桉树不同林龄的林分状况

树种	林龄/ a	平均树 高/m	平均胸 径/cm	造林密度/ (株·hm ⁻²)	林分保 存率/%	现实密度/ (株·hm ⁻²)
雷林1 号桉	1.0	5.9	5.3	2500	90	2250
	2.0	11.4	6.9	2500	85	2125
	3.5	15.6	9.4	2500	96	2400
	4.5	16.0	10.2	2500	87	2175
尾巨桉	1.0	5.4	4.4	3333	90	3000
	2.5	11.1	8.3	2500	90	2250
	3.5	15.6	9.7	2500	96	2400
	4.5	16.2	10.4	2500	87	2175

2 研究方法

2.1 生物量测定和相对生长方程的建立

2008年10月在广东廉江市分别对1、2、3、5、4.5年生的雷林1号桉及1、2.5、3.5、4.5年生的尾巨桉林分进行测定,在4个不同林龄的雷林1号桉、尾巨桉林分中随机设立20m×20m样地3块,每木测定,各样地选取1株平均木,共24株,将其伐倒进行树干解析,采用“分层切割法”实测叶、枝、根、干、皮各器官鲜质量。在林冠垂直投影范围内,按0~20、21~40、41~60cm分层将地下根系挖出,分别称各层根的鲜质量,而后各器官分别取500g样品带回实验室,在80℃下烘干称质量,求含水率。根据各器官的含水率求得各器官的干物质质量。

用一元式 $W = a + bD + cD^{2[16]}$ 和二元式 $W = d(D^2H)^{e[17]}$ 作为相对生长方程,式中, W 、 D 和 H 分别为树木各器官生物量、胸径和树高; a 、 b 、 c 、 d 、 e 为参

数。通过 SPSS 软件对生物量、胸径和树高进行回归分析,计算出各器官相对生长方程的参数(表 2)。从表 2 可看出:二元方程的相关系数大部分稍高于

一元方程,说明各器官生物量不仅与胸径有关,与树高也有较密切的关系。因此,各器官生物量及现存量的计算采用二元式。

表 2 相对生长方程及相关系数表

树种	器官	$W = a + bD + cD^2$			相关系数	$W = d(D^2H)^e$		相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>		<i>d</i>	<i>e</i>	
雷林 1 号桉	叶	-0.875 1	0.209 6	0.002 0	0.968 9	0.011 3	0.661 6	0.985 9
	枝	1.585 1	-0.198 7	0.045 7	0.722 5	0.283 0	0.369 0	0.721 1
	根	3.615 2	-1.100 1	0.089 7	0.958 6	0.003 0	0.883 4	0.971 1
	干	22.217 0	-7.873 1	0.765 8	0.983 9	0.008 2	1.080 4	0.993 5
	皮	0.678 4	-0.225 6	0.038 5	0.978 3	0.021 6	0.649 8	0.992 5
	地上部分	23.618 2	-8.091 3	0.852 2	0.995 0	0.074 0	0.828 6	0.998 5
	总生物量	27.222 5	-9.188 7	0.941 8	0.994 5	0.077 1	0.831 4	0.998 5
尾巨桉	叶	-0.158 8	-0.004 7	0.017 4	0.982 3	0.002 2	0.889 7	0.993 5
	枝	1.358 4	-0.195 8	0.031 4	0.670 1	0.261 7	0.306 3	0.641 9
	根	-1.146 2	0.307 0	0.003 8	0.958 6	0.008 9	0.750 2	0.993 5
	干	17.247 5	-6.708 7	0.722 9	0.994 0	0.012 9	1.025 2	0.999 0
	皮	0.046 0	-0.053 0	0.029 8	0.995 5	0.012 5	0.725 8	0.998 0
	地上部分	18.486 7	-6.960 0	0.801 2	0.997 5	0.057 6	0.858 7	0.996 5
	总生物量	17.340 6	-6.653 0	0.805 0	0.998 0	0.065 0	0.851 6	0.997 0

2.2 热值测定

采集各样木胸径处的树干(不含皮)、树根、树枝、叶片和树皮各 500 g 进行热值和灰分测定,其中,树枝和叶片按冠幅不同层次和东南西北 4 个方位均匀混合取样,采集树根时沿侧根方向将不同径级的根系等比混合。样品先用 105 °C 烘 10 min,之后在 80 °C 的条件下烘干至恒质量,测定生物量的样品需求算含水率和绝干质量,测定热值的样品经磨粉处理过筛后装瓶贮存备用。样品热值以干质量热值(每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量(GCV)和去灰分热值(AFCV)来表示,采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热值。每个样品重复 3 次,误差控制在 $\pm 0.200 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,否则重新称样测定。每次测定前用苯甲酸标定,测定环境用空调控温在 20 °C 左右。

灰分含量(AC)用干灰分化法测定^[14]。

去灰分热值(AFCV) = 干质量热值 / (1 - 灰分含量)。

3 结果与分析

3.1 生物量及其分布

从表 3 可以看出:除 3.5 年生枝的生物量大于 4.5 年生的外,其它各器官生物量随林龄的增大而增大;雷林 1 号桉各器官占林分生物量的比重分别为:叶 4.30% ~ 6.51%,枝 12.34% ~ 36.37%,根 5.38% ~ 5.97%,干 40.02% ~ 69.88%,皮 7.55% ~ 11.72%;尾巨桉各器官占林分生物量的比重分别

为:叶 3.99% ~ 4.67%,枝 7.01% ~ 32.34%,根 6.56% ~ 8.58%,干 44.31% ~ 74.15%,皮 7.68% ~ 10.78%。各器官生物量大小顺序都是干的最大,叶的最小。各器官生物量所占比重随林龄的变化规律是:2 种桉树的枝、皮随林龄的增大其生物量所占比重减小,干所占比重随林龄的增大而增大;雷林 1 号桉叶的生物量所占比重随林龄增大而减小,而尾巨桉叶的变化不明显;尾巨桉根的生物量所占比重随林龄增大而减小,而雷林 1 号桉根的变化不明显。2 种桉树人工林的林分生物量都随着林龄的增大有明显的增大,4.5 年生雷林 1 号桉和尾巨桉的林分生物量分别达 77.13、80.03 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。根据各林龄的生物量可得到其平均生长量,雷林 1 号桉和尾巨桉的生物量平均生长量都以 3.5 年生时最大,分别为 20.42、21.42 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.2 灰分含量和热值

3.2.1 不同器官的灰分含量和热值 雷林 1 号桉各器官的灰分含量分别为:叶 4.05% ~ 5.11%,枝 0.99% ~ 1.90%,根 2.34% ~ 3.69%,干 0.27% ~ 1.58%,皮 4.81% ~ 6.81%;尾巨桉各器官的灰分含量分别为:叶 3.99% ~ 4.21%,枝 1.33% ~ 3.24%,根 1.67% ~ 2.28%,干 0.29% ~ 0.59%,皮 3.55% ~ 6.20%。由表 4 可看出:雷林 1 号桉和尾巨桉各器官间灰分含量差异显著(F 值分别为 109.96 和 53.86, $p < 0.05$),其大小顺序为:皮 > 叶 > 根 > 枝 > 干。雷林 1 号桉各器官干质量热值分别为:叶 20.52 ~ 20.66 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,枝 18.92 ~ 19.22 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,根 18.68

~18.92 kJ · g⁻¹,干 18.98 ~ 18.51 kJ · g⁻¹,皮 16.39 ~ 17.96 kJ · g⁻¹;尾巨桉各器官干质量热值分别为:叶 20.31 ~ 20.77 kJ · g⁻¹,枝 19.03 ~ 19.33 kJ · g⁻¹,根 18.72 ~ 19.05 kJ · g⁻¹,干 18.82 ~ 19.28 kJ · g⁻¹,皮 16.79 ~ 17.57 kJ · g⁻¹。雷林1号桉和尾巨桉各器官间干质量热值差异显著(*F*值分别为 128.57 和 256.17, *p* < 0.05),其大小顺序分别为:叶 > 干 > 枝 > 根 > 皮,叶 > 枝 > 干 > 根 > 皮。雷林1号桉各器官的去灰分热值分别为:叶 21.50 ~ 21.77 kJ ·

g⁻¹,枝 19.25 ~ 19.54 kJ · g⁻¹,根 19.37 ~ 19.44 kJ · g⁻¹,干 19.06 ~ 19.57 kJ · g⁻¹,皮 17.59 ~ 19.20 kJ · g⁻¹;尾巨桉各器官的去灰分热值分别为:叶 21.16 ~ 21.67 kJ · g⁻¹,枝 19.43 ~ 19.68 kJ · g⁻¹,根 19.03 ~ 19.50 kJ · g⁻¹,干 18.90 ~ 19.33 kJ · g⁻¹,皮 17.90 ~ 18.22 kJ · g⁻¹。雷林1号桉和尾巨桉各器官间去灰分热值差异显著(*F*值分别为 131.30 和 300.13, *p* < 0.05),其大小顺序分别为:叶 > 枝、根 > 干 > 皮,叶 > 枝 > 根 > 干 > 皮。

表3 2种桉树不同林龄林分生物量及其分布

t · hm⁻²

树种	林龄/a	叶	枝	根	干	皮	合计
雷林1号桉	1.0	0.75 (6.51%)	4.19 (36.37%)	0.62(5.38%)	4.61(40.02%)	1.35(11.72%)	11.52(100%)
	2.0	1.55 (5.57%)	6.16 (22.12%)	1.66(5.96%)	15.73(56.48%)	2.75(9.87%)	27.85(100%)
	3.5	3.24 (4.53%)	9.78 (13.68%)	4.27(5.97%)	48.51(67.87%)	5.68(7.95%)	71.48(100%)
	4.5	3.32 (4.30%)	9.52 (12.34%)	4.57(5.93%)	53.90(69.88%)	5.82(7.55%)	77.13(100%)
尾巨桉	1.0	0.40(3.99%)	3.24(32.34%)	0.86(8.58%)	4.44(44.31%)	1.08(10.78%)	10.02(100%)
	2.5	1.82(4.67%)	4.50(11.55%)	2.92(7.49%)	26.24(67.35%)	3.48(8.93%)	38.96(100%)
	3.5	3.47(4.63%)	5.86(7.82%)	5.07(6.76%)	54.61(72.84%)	5.96(7.95%)	74.97(100%)
	4.5	3.68(4.60%)	5.61(7.01%)	5.25(6.56%)	59.34(74.15%)	6.15(7.68%)	80.03(100%)

注:生物量为绝干质量,括号内数据为各器官生物量占林分生物量的比例。

表4 2种桉树各器官平均灰分含量及干质量热值

器官	雷林1号桉			尾巨桉		
	灰分含量/%	干质量热值/(kJ · g ⁻¹)	去灰分热值/(kJ · g ⁻¹)	灰分含量/%	干质量热值/(kJ · g ⁻¹)	去灰分热值/(kJ · g ⁻¹)
叶	4.58 ± 0.46 b	20.60 ± 0.14 a	21.59 ± 0.16 a	4.06 ± 0.13 a	20.58 ± 0.34 a	21.45 ± 0.37 a
干	0.72 ± 0.78 e	19.15 ± 0.28 b	19.29 ± 0.30 b	0.42 ± 0.14 c	19.02 ± 0.24 bc	19.10 ± 0.23 d
枝	1.55 ± 0.37 d	19.11 ± 0.20 bc	19.41 ± 0.19 b	1.92 ± 1.23 b	19.18 ± 0.16 b	19.56 ± 0.28 b
根	3.02 ± 1.20 c	18.82 ± 0.31 c	19.41 ± 0.16 b	1.94 ± 0.87 b	18.93 ± 0.38 c	19.30 ± 0.32 c
皮	5.91 ± 0.95 a	17.33 ± 0.78 d	18.42 ± 0.81 c	4.43 ± 1.35 a	17.24 ± 0.31 d	18.04 ± 0.22 e

注:各器官间灰分含量、干质量热值和去灰分热值多重比较的结果用小写字母表示差异显著性(*p* < 0.05)。

3.2.2 各器官灰分含量和热值随林龄的变化规律

从表5可以看出:雷林1号桉树干的干质量热值、树叶的去灰分热值与林龄呈显著的正相关(相关系数分别为0.57、0.54),说明二者随林龄的增大有增大的趋势;其它器官的灰分含量、干质量热值或去灰分热值和林龄的相关关系不显著;尾巨桉枝的灰分含量与林龄呈显著负相关,干的灰分含量与林龄呈极显著负相关,其它与林龄的相关关系不显著,说明尾巨桉枝和干的灰分含量随林龄的增大有减小的趋势。总之,2种桉树各器官的灰分含量、干质量热值和去灰分热值在随林龄变化的规律上有差异,叶、枝、根、干的灰分含量与林龄呈负相关,干质量热值和去灰分热值与林龄呈正相关,说明叶、枝、根、干的灰分含量随林龄的增大有减小的趋势,而干质量热值则相反;皮的灰分含量和干质量热值随林龄的变

化则反之。

表5 2种桉树各器官灰分含量、干质量热值与林龄的相关系数

相关系数	雷林1号桉			尾巨桉		
	灰分含量 - 林龄	干质量热 - 林龄	去灰分热 - 林龄	灰分含量 - 林龄	干质量热 - 林龄	去灰分热 - 林龄
叶	-0.29	0.35	0.54*	-0.25	0.17	0.14
枝	-0.07	0.24	0.22	-0.52*	0.38	0.24
根	-0.04	0.09	0.12	-0.08	0.21	0.31
干	-0.40	0.57*	0.34	-0.70**	0.24	0.18
皮	0.20	-0.43	-0.40	0.46	-0.37	-0.02

注:*表示显著相关(*p* < 0.05),**表示极显著相关(*p* < 0.01)。

3.2.3 不同林龄的平均灰分含量和热值

根据各器官生物量所占比重将灰分含量和干质量热值加权平均得到植株体的平均灰分含量和平均干质量热值。由表6可知:雷林1号桉和尾巨桉植株体的平

均灰分含量分别为 1.03% ~ 2.14%、0.94% ~ 2.08%，且与林龄的相关关系都不显著(相关系数分别为 -0.86、-0.42, p 值分别为 0.14、0.58); 雷林 1 号桉和尾巨桉植株体的平均干质量热值分别为 18.79 ~ 19.23、18.78 ~ 19.11 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 且与林龄的相关关系都不显著(相关系数分别为 0.77、0.40, p 值分别为 0.23、0.60); 雷林 1 号桉和尾巨桉植株体

的平均去灰分热值分别为 19.13 ~ 19.47、18.97 ~ 19.29 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 且与林龄的相关关系都不显著(相关系数分别为 0.30、0.62, p 值分别为 0.70、0.38)。总之, 2 种桉树植株体的平均灰分含量与林龄呈负相关, 而平均干质量热值和去灰分热值与林龄呈正相关。

表 6 2 种桉树不同林龄植株体的平均灰分含量和平均干质量热值

雷林 1 号桉				尾巨桉			
林龄/ a	灰分含量/ %	干质量热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)	去灰分热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)	林龄/ a	灰分含量/ %	干质量热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)	去灰分热值/ ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	1.98	18.79	19.17	1	2.08	18.88	19.09
2	2.14	19.06	19.47	2.5	0.96	18.78	18.97
3.5	1.03	18.93	19.13	3.5	0.94	19.11	19.29
4.5	1.16	19.23	19.46	4.5	1.62	18.92	19.23

3.3 能量现存量

能量现存量是根据各器官的平均干质量热值与现存生物量相乘累加而得, 它比生物量能更好地体现植物在现有生态条件下所固定的太阳能总量^[19]。由表 7 可知: 雷林 1 号桉各器官能量占林分总能量的比例分别为: 叶 4.63% ~ 7.08%, 枝 12.22% ~ 36.58%, 根 5.31% ~ 5.95%, 干 40.33% ~ 70.92%, 皮 6.44% ~ 10.71%; 尾巨桉各器官能量占林分总能量的比例分别为: 叶 4.39% ~ 5.14%, 枝 7.13% ~ 32.62%, 根 6.56% ~ 8.51%, 干 44.64% ~ 74.45%, 皮 6.81% ~ 9.84%。由于本研究中 2 种

桉树不同林龄各器官的热值差距不大, 因此, 各林龄不同器官能量的大小顺序与生物量的排列顺序基本一致, 即林分生物量的大小及变化规律直接决定了林分能量现存量的大小及变化规律。虽然树叶中的热值最大, 但它的生物量限制了其能量的积累; 树干则相反, 尽管热值很低, 但能量现存量仍很高。4.5 年生雷林 1 号桉和尾巨桉林分能量现存量分别为 1 482.91、1 515.06 $\text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。在研究范围内, 和林分生物量一样, 2 种林分的能量平均生长量都在 3.5 年生时达最大, 分别为 387.74、410.35 $\text{GJ} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

表 7 2 种桉树不同林龄的林分能量现存量及其分布

树种	林龄/a	GJ · hm ⁻²					
		叶	枝	根	干	皮	合计
雷林 1 号桉	1.0	15.37(7.08%)	79.40(36.58%)	11.52(5.31%)	87.53(40.33%)	23.24(10.71%)	217.06(100%)
	2.0	31.83(5.99%)	118.32(22.26%)	31.49(5.92%)	300.49(56.53%)	49.43(9.30%)	531.56(100%)
	3.5	66.84(4.93%)	187.98(13.85%)	80.76(5.95%)	920.94(67.86%)	100.56(7.41%)	1 357.08(100%)
	4.5	68.69(4.63%)	181.17(12.22%)	85.87(5.79%)	1 051.74(70.92%)	95.44(6.44%)	1 482.91(100%)
尾巨桉	1.0	8.29(4.39%)	61.63(32.62%)	16.08(8.51%)	84.35(44.64%)	18.59(9.84%)	188.94(100%)
	2.5	37.78(5.14%)	86.98(11.84%)	55.56(7.57%)	493.66(67.22%)	60.39(8.22%)	734.37(100%)
	3.5	70.42(4.90%)	112.01(7.80%)	96.41(6.71%)	1 052.63(73.29%)	104.77(7.29%)	1 436.24(100%)
	4.5	76.42(5.04%)	107.99(7.13%)	99.43(6.56%)	1 128.02(74.45%)	103.20(6.81%)	1 515.06(100%)

注: 括号内数据为各器官能量占林分总能量的比例, 1GJ(吉焦) = 106 kJ。

4 结论与讨论

本研究中, 2 种桉树各器官干质量热值排序为: 叶 > 枝或干 > 根 > 皮, 各器官中叶的干质量热值最大, 这与前人的研究结论一致^[20-24]。植物体的不同成分热值差异很大, 脂肪的热值达 38.9 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 木

质素达 26.4 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 粗蛋白达 23.0 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 粗纤维和淀粉达 17.6 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, 所以这些成分含量的高低决定着植物的热值。有研究表明, 植物体内高能产品(蛋白质和脂肪)在输送过程中的积累浓度由叶 → 枝 → 干 → 根逐渐降低, 故热值也相应逐渐减小, 各器官干质量热值应形成叶 > 枝 > 干 > 根的顺

序^[25], 本研究中出现干与枝的干质量热值相近, 可能是由于采样时干去皮, 而枝未去皮的缘故, 也可能是其它因素综合作用的结果, 因为植物组分或器官干质量热值的差异主要受自身组成(所含的营养物质)、结构和功能的影响; 其次, 还受光照强度、日照长短及土壤类型和植物年龄影响^[26]。

Hadley 等^[27]通过对美国华盛顿山高山植物能量变化的研究指出, 毕氏苔草 (*Calix bigelowii*) 随着生长进程热值逐渐增加。胡宝忠等^[28]对白三叶 (*Trifolium repens* Linn.) 种群的能量测定表明, 能量与年龄相关, 特别是根的能量与年龄显著相关, 年龄越大, 能量越高; 刘庆等^[29]对斑苦竹 (*Pleioblastus maculatus* (McClure) C. D. Chu et C. S. Chao) 无性系种群的能量结构研究表明, 竹子的年龄对能量有一定影响, 斑苦竹无性系分株的平均能量随着年龄级的增加, 呈 Logistic 曲线变化。乔秀娟等^[30]和曾小平等^[31]的研究都表明, 热值随着植物年龄的增加而增加。上述研究都对植物热值随植物年龄的变化规律进行了深入探讨, 但对不同器官热值随林龄的变化缺乏讨论。本文通过对 2 种桉树 4 个林龄的各器官干质量热值进行分析, 叶、根、干、枝的干质量热值和林龄成正相关, 皮则反之, 植株体的平均干质量热值也和林龄成正相关, 但和林龄的相关性都不显著。热值更多的用途是在研究能量分配和能量转移过程中, 作为能量当量来计算群落、种群或器官的总能量现存量或能量转化率^[32], 因此, 在研究生态系统能量和物质流动时, 还必须结合不同林龄林分或森林生态系统的生物量现存量。

张林等^[33]对杉木、马尾松林分及各器官生物量随林龄的变化规律进行了探讨, 分析结果表明, 杉木、马尾松林分树干、地上生物量及林分总生物量均随林龄的增加而显著增加, 枝条、根系生物量在马尾松林分中也随林龄显著增加, 但在杉木林中则随林龄的增加逐渐趋向稳定, 2 种林分叶生物量与林龄的关系不密切。薛鹏^[34]对雷州林业局 6 年生尾叶桉人工林生物量的研究表明, 在桉树生长的不同阶段, 其生物量分配也不同: 初期树叶生物量增加较快, 3 年后树干、树皮的生物量积累速度增加, 到 6 年时, 树干生物量占总生物量的 50% 以上, 占地上部分生物量的 58% 以上。本文中, 2 种桉树的各器官及林分生物量随林龄增加而显著增加, 叶、枝、根、皮的生物量所占总生物量比例随林龄增加表现出下降的趋势, 而干则相反。原因是在桉树生长的初期

需较大叶量才能满足桉树整体生长的需求, 随着林龄的增加, 当叶片的光合产物供给桉树的营养生长时, 生物量的积累就以树干为主, 其他器官的生物量增幅减缓。由于品种器官的平均热值差距不大, 各器官及林分能量的大小顺序及变化规律与其生物量的排列顺序及变化规律一致, 2 种桉树林分生物量和林分能量的平均生长量都在 3.5 年生时达到最大。

本文的研究对象是同一立地不同林龄的桉树纯林, 虽然不同林分的土壤条件、环境因子等相差不大, 在同一时期的经营管理措施也完全一致, 但是用同一时期不同林龄的林分生长规律代替同一林分不同时期的生长规律还是存在误差。文中 2 种桉树林分为中幼龄林, 据此测定数据推导出的生物量-材积回归方程并不能很好地适用于所有龄级林分。因为, 中幼龄林的生物量碳累积速率明显高于成过熟林, 而枝叶生物量则随林龄的增加而趋于稳定, 以中幼龄林为主的测定数据建立的回归方程必定会高估近熟林、成熟林以及过熟林的枝叶生物量^[35]。本文以空间代替时间的方法研究 2 种桉树热值的结论尚需更多研究来完善, 但该结论和国内外植物热值相关研究的结论基本一致, 为更深入系统研究植物热值的变化规律提供了依据; 对于桉树不同林龄生物量和能量的研究, 对我国南方桉树人工林生态系统物质与能量流动的研究具有重要意义, 也为发展桉树生物质能源林提供理论依据。

参考文献:

- [1] Reichle D E. Dynamic Properties of Forest Ecosystems[M]. London: Cambridge University Press, 1982
- [2] Somogyi Z, Cienciala E, Makipaa R, et al. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation[J]. European Journal of Forest Research, 2007, 126: 197-207
- [3] Garkoti S S. 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
- [4] Ketterings Q M, Coe R, Noordwijk K, et al. Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests[J]. Forest Ecology and Management, 2001, 146: 199-209
- [5] Gupta S K. Energy structure of standing crop in certain grasslands at Gyanpur[J]. Trop Ecol, 1972, 13: 147-155
- [6] Jordan C F. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage [J]. J Ecol, 1971, 59: 127-142
- [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

- [8] 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
- [9] 谢正生,陈北光,韩锦光,等. 雷州两种桉树的生物量估测模型[C]//中国林学会桉树专业委员会第十三届学术交流会. 中国林学会,1996
- [10] 姚东和,杨民胜,李志辉. 林分密度对巨尾桉生物产量及生产力的影响[J]. 中南林学院学报,2000,20(3):20-23
- [11] 谢贤健,张健,赖挺,等. 短轮伐期巨桉人工林地上部分生物量和生产力研究[J]. 四川农业大学学报,2005,23(1):66-74
- [12] 黄世能,郑海水,何克军. 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,1991,4(5):545-549
- [13] 杨成源,张加研,李文政,等. 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,1996,16(4):294-302
- [14] 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
- [15] 陈少雄. 桉树人工林土壤养分现状与施肥研究[J]. 桉树科技,2009,26(1):52-63
- [16] Ares A, Fownes J. Comparisons between generalized and specific tree biomass functions as applied to tropical ash (*Fraxinus uhdei*) [J]. *New Forests*, 2000,20:277-286
- [17] Cienciaia, Cemy M, Tatarinov F, et al. Biomass functions applicable to Scots pine[J]. *Trees*, 2006,20:483-495
- [19] 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
- [20] 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
- [21] 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
- [22] 管启杰,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
- [23] 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
- [24] 侯庸,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
- [25] 孙雪峰,陈灵芝,徐瑞成. 暖温带落叶阔叶林林内能量的分配组合特征[C]//陈灵芝,黄建辉. 暖温带生态系统结构与功能的研究. 北京:科学出版社,1997,163-172
- [26] 孙国夫,郑志明,王兆蓂. 水稻热值的动态变化研究[J]. 生态学杂志,1993,12(1):1-4
- [27] Hadley E B, Bliss L C. Energy relationships of alpine plants on Mt. Washington, New Hampshire [J]. *Ecol Monogr*, 1964,34:331-357
- [28] 胡宝忠,刘娣,周以良,等. 白三叶无性系植物种群分株间的资源分配[J]. 东北林业大学学报,1998,26(2):25-28
- [29] 刘庆,钟章成. 斑苦竹无性系种群能量结构研究[J]. 渝州大学学报:自然科学版,1995,12(3):22-27
- [30] 乔秀娟,曹敏,林华. 西双版纳不同林龄次生植物群落优势树种的热值[J]. 植物生态学报,2007,31(2):326-332
- [31] 曾小平,蔡锡安,赵平,等. 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,2009,20(3):485-492
- [32] 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
- [33] 张林,黄永,罗天祥,等. 林分各器官生物量随林龄的变化规律——以杉木、马尾松人工林为例[J]. 中国科学院研究生院学报,2005,22(2):170-178
- [34] 薛鹏. 雷州林业局6年生尾叶桉人工林生长量和生物量研究[J]. 桉树科技,2009,26(1):18-21
- [35] 刘茜. 不同龄组马尾松人工林生物量及生产力的研究[J]. 中南林学院学报,1996,16(4):47-51