

福建东山几种木麻黄的物质与能量特征

林益明¹, 郭启荣¹, 叶功富², 林玲¹, 林鹏¹

(1. 厦门大学生命科学院, 厦门 361005; 2. 福建省林业科学研究院, 福州 350012)

摘要: 对福建东山 7 种木麻黄(普通木麻黄、粗枝木麻黄、细枝木麻黄、肥木木麻黄、山神木麻黄、鸡冠木麻黄、滨海木麻黄)及其距海岸不同远近的普通木麻黄的小枝的物质和能量特征进行了研究。结果表明: (1) 东山 7 种木麻黄小枝的灰分含量、干重热值和去灰分热值因种而异, 灰分含量在 3.06% ~ 5.98% 之间, 干重热值在 $19.46 \pm 0.07 \sim 20.82 \pm 0.15$ kJ/g 之间, 去灰分热值在 $20.59 \pm 0.05 \sim 21.48 \pm 0.15$ kJ/g 之间; 其中, 山神木麻黄小枝的灰分含量最低, 而干重热值和去灰分热值最高, 符合理想燃料对低灰分含量和高热值的要求; 木麻黄小枝具有相对较高的热值现象(特别是山神木麻黄)是在贫瘠的土壤条件下适应环境的结果, 在小枝中进行了高能化合物的积累。木麻黄对环境的特殊适应也反映其主动适应环境的能力, 是植物自身的高能量对物质的一种补偿作用; 7 种木麻黄小枝的干重热值与灰分含量具有显著的线性负相关 ($P < 0.05$); 干重热值与粗脂肪含量具有极显著的线性正相关 ($P < 0.01$), 而与蛋白质、可溶性糖含量相关性不显著 ($P > 0.05$); (2) 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的物质与能量特征存在差异, 灰分含量在 3.58% ~ 8.75% 之间, 平均为 6.03%; 干重热值在 $20.33 \pm 0.00 \sim 21.63 \pm 0.06$ kJ/g 之间, 平均为 20.95 ± 0.50 kJ/g; 去灰分热值在 $21.67 \pm 0.00 \sim 22.86 \pm 0.06$ kJ/g 之间, 平均为 22.29 ± 0.43 kJ/g; 其中位于前沿、中部的普通木麻黄小枝的干重热值和去灰分热值相对较低, 特别是前沿的低热值是长期强风胁迫的结果, 是耗能的过程, 从中部到后沿, 风的胁迫小, 植株的生长及热值主要受土壤因子的影响, 后沿相对优越的土壤条件, 更有利于植株的生长, 植株生长良好, 光合作用越强, 光合作用积累的能量也越多, 因此后沿的植株热值最高。距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的干重热值与粗脂肪含量具有极显著的线性相关 ($P < 0.01$), 而与灰分含量、蛋白质、可溶性糖含量相关性不显著 ($P > 0.05$)。综合来看, 热值的高低受多种因素的影响, 是各种因素综合作用的结果。

关键词: 木麻黄; 物质; 能量; 东山; 福建

Characteristics of matter and energy of some Casuarinaceae species in Dongshan County, Fujian Province

L N YiM ing¹, GUO Q iRong¹, YE Gong-Fu², L N L ing¹, L N Peng¹ (1. School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Fujian Academy of Forestry, Fuzhou 350012, China). Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(10): 2217~ 2224

Abstract Characteristics of matter and energy in branchlets of seven Casuarinaceae species (*Casuarina equisetifolia*, *C. glauca*, *C. cunninghamiana*, *C. obesa*, *C. collina*, *C. cristata* and *Alocasuarina littoralis*) and *Casuarina equisetifolia* at different sites far from seashore in Dongshan County, Fujian Province were discussed in this paper. There were differences in the ash contents, gross caloric values and ash free caloric values among the seven Casuarinaceae species, with the range of ash contents (3.06% ~ 5.98%), gross caloric values ($19.46 \pm 0.07 \sim 20.82 \pm 0.15$ kJ/g) and ash free caloric values ($20.59 \pm 0.05 \sim 21.48 \pm 0.15$ kJ/g), respectively. Of seven species, *C. collina* had the lowest ash content and the highest gross caloric value and ash free caloric value, indicating that it was satisfactory for ideal fuel wood species. The phenomenon of relatively high caloric values in branchlets of Casuarinaceae species (especially *Casuarina collina*) resulted from their adaptations to poor soils accompanying with the accumulations of high-energy compounds in branchlets. These reflected that Casuarinaceae species had strong abilities to adapt to environment on their own initiative. There were significantly negative correlations between gross

基金项目: 国家“十五”科技攻关专题资助项目(2002BA516A16-15)

收稿日期: 2003-10-17; **修订日期:** 2004-04-05

作者简介: 林益明(1967~), 男, 福建省福清市人, 博士, 教授, 主要从事植物生态学及红树林湿地生态学研究。E-mail: linyim@xmu.edu.cn

Foundation item: Key project of science and technology in the Chinese Tenth Five-Year Plan (No. 2002BA516A16-15)

Received date: 2003-10-17; **Accepted date:** 2004-04-05

Biography: L N YiM ing, Ph. D., Professor, mainly engaged in plant ecology and mangrove wetland ecology. E-mail: linyim@xmu.edu.cn

caloric value and ash content ($P < 0.05$), positive correlations between gross caloric value and raw fat ($P < 0.01$), and not significant correlations between gross caloric value and crude protein, gross caloric value and soluble sugars. There were differences in matter and energy of the branchlets of *Casuarina equisetifolia* at different sites according to the distance from the coast, ash contents varied from 3.58% to 8.75%, with the average of 6.03%; gross caloric values varied from $20.33 \pm 0.00 \text{ kJ/g}$ to $21.63 \pm 0.06 \text{ kJ/g}$, with the average of $20.95 \pm 0.50 \text{ kJ/g}$; ash free caloric values varied from $21.67 \pm 0.00 \text{ kJ/g}$ to $22.86 \pm 0.06 \text{ kJ/g}$, with the average of $22.29 \pm 0.43 \text{ kJ/g}$. Low gross caloric values and ash free caloric values appeared in front and middle zones of the forest, low caloric values in front zone resulted from the long-term strong wind stress and energy consumed process. From middle zone to back fringe of the forest, without strong wind stress, plant growth and accordingly caloric values were mainly affected by soil conditions, High caloric values occurred in the back of the forest with relatively good soil conditions and strong plant photosynthesis. There were remarkably significant correlations between gross caloric value and raw fat in branchlets of *Casuarina equisetifolia* at different sites far from coast, without significant correlations between gross caloric values and contents of ash, crude protein and soluble sugars. The caloric values were influenced by several factors and may be attributable to their comprehensive roles.

Key words: Casuarinaceae; matter; energy; Dongshan; Fujian

文章编号: 1000-0933(2004)10-2217-08 中图分类号: Q 948 文献标识码: A

木麻黄是具有多用途的优良速生树种, 不仅适于滨海防风固沙、盐碱地改良和干旱地区造林, 同时也是重要的用材、薪材和饲料树种, 并且可供制浆造纸^[1,2]。我国在 20 世纪 50 年代后开始大面积引进木麻黄作为沿海防风固沙树种, 现在木麻黄林已经成为沿海防护林系统的重要组成部分, 尤其是东南沿海防护林体系的重要组成部分。它对改善沿海地区生态环境, 促进沿海经济的发展起着十分巨大的作用。

福建省是我国木麻黄引种较早的省份, 且木麻黄防护林面积比较大。在国内, 有关木麻黄的研究主要集中在木麻黄的更新改造及抗旱抗盐生理生态等方面^[3], 而对木麻黄的能量生态学的报道很少, 开展木麻黄的能量生态学研究具有重要的理论意义和实践指导价值。

能量是生态学功能研究中的基本概念之一, 植物热值是植物含能产品能量水平的一种度量, 可反映植物对太阳辐射能的利用状况, 也是评价植物营养成分的标志之一。孙国夫等对水稻叶片热值的研究表明, 植物热值研究最重要意义在于热值能反映组织各种生理活动的变化和植物生长状况的差异; 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^[4]。

本文对福建东山 7 种木麻黄以及距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的物质与能量特征进行研究, 探讨木麻黄的生境适应性, 为保护和发展木麻黄防护林资源提供理论依据。

1 研究地自然条件概况

本文研究的木麻黄采自福建省东山县赤山国有防护林场。

东山赤山林场位于福建沿海南部, 北纬 23°40', 东经 117°18'。属于亚热带海洋性季风气候, 干、湿季节较为明显, 年平均降水量 1 945mm, 大部分降雨集中于 5~9 月份, 11 月至翌年 2 月份为旱季, 年平均蒸发量为 1 056mm, 年平均相对湿度为 80%。年平均气温为 20.8℃, 绝对最高气温为 36.6℃, 绝对最低气温为 3.8℃。年平均风速 7.0m/s, 年均大风日数 121d。主要自然灾害为台风和干旱, 台风多发生在 7~8 月份, 年平均 5.1 次。成土母岩多为花岗岩, 母质类型以海积物和风积物为主, 土壤主要为滨海沙土, 土壤盐度为 1‰~3‰, pH 值为 5~6, 有机质含量较低, 一般在 2% 以下, 土壤肥力通常较低。天然植被稀少, 林下常见零星植物有鼠刺 (*Spinifex littoreus*)、牡荊 (*Verbena negando*) 等。

2 材料与方法

2.1 样品采集

在赤山林场引种园中采集的 7 种木麻黄分别为: 普通木麻黄 (*Casuarina equisetifolia*)、粗枝木麻黄 (*C. glauca*)、细枝木麻黄 (*C. cunninghamiana*)、肥木木麻黄 (*C. obesa*)、山神木麻黄 (*C. collina*)、鸡冠木麻黄 (*C. cristata*)、滨海木麻黄 (*Allocasuarina littoralis*)。采集林冠外侧木麻黄小枝(包括鳞片叶), 按东西南北方向混合采样。

与此同时, 在林场大帽山工地采集距海岸不同远近(防护林带)的普通木麻黄小枝, 采集 10 点, 每点相距大约 300m。依距海岸风口远近依次标记为 1~10 号样地, 各采样点土壤(20~40cm)盐度、有机质含量和 pH 值见表 1, 其中 9、10 号位于滨海沙土后沿, 林场附近山地山脚下。

2.2 测定方法



表 1 1~10 号样点土壤盐度、有机质含量及 pH

Table 1 Soil salinity, organic matter and pH from site 1 to 10

样点 Site	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
盐度 Salinity (‰)	1.67	1.50	1.29	2.34	1.24	1.89	2.49	1.37	1.17	1.93
pH	5.28	5.67	5.86	5.55	5.72	6.04	5.59	5.88	5.71	5.36
有机质 Organic matter (%)	0.05	0.03	0.06	0.55	0.13	0.14	0.43	1.98	1.90	1.89

(1) 热值与灰分的测定 用热量计法测定其热值含量, 仪器采用长沙仪器厂生产的 GR-3500 型微电脑氧弹式热量计。样品热值以干重热值 (gross caloric value, 简称 GCV) (每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量) 和去灰分热值 (ash free caloric value, 简称 AFCV) 来表示。测定环境是空调控温 20 左右; 每份样品 3 次重复以上, 重复间误差控制在 $\pm 0.20\text{kJ/g}$, 每次实验前用苯甲酸标定。

灰分含量的测定用干灰化法, 即样品在马福炉 550 下灰化 5h 后测定其灰分含量。之后用以计算样品的去灰分热值, 计算方法为: 去灰分热值 = 干重热值 / (1 - 灰分含量)。

(2) 全氮、全磷和全碳测定 植物样品的全氮含量采用纳氏试剂比色法^[5], 全磷含量采用钼蓝比色法, 全碳采用 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 容量法^[6]。

(3) 单宁、可溶性糖、粗脂肪、粗蛋白含量的测定

单宁采用 Folin-D 比色法^[7]; 可溶性糖采用蒽酮比色法^[8]; 粗脂肪用石油醚索氏提取法^[6]; 粗蛋白含量为 $6.25 \times \text{N} \%$ 。

(4) 盐度及 pH 值的测定 土壤全盐量测定用 AgNO_3 滴定法^[9]; pH 值用电位法 (水土比 2.5 : 1, pH S-3C 型酸度计)。

3 结果与讨论

3.1 7 种木麻黄小枝的物质与能量特征

3.1.1 灰分含量 灰分是指植物体矿物元素氧化物的总和, 不同植物以及不同生长发育时期其含量不同。

东山 7 种木麻黄小枝的灰分含量在 3.06% ~ 5.98% 之间。灰分含量最高的是普通木麻黄 (5.98%), 最低的是山神木麻黄 (3.06%) (图 1)。杨继镛等研究广西北海市海岸砂土木麻黄小枝的灰分含量为 4.53%^[10]; 李意德等研究海南尖峰岭热带山地雨林 46 种乔木叶的平均灰分含量为 6.8%^[11]; 林益明等研究福建华安竹园竹类植物叶的灰分含量在 8.05% ~ 28.14%^[12]。灰分含量的高低与植物吸收的元素量有关。灰分含量高低可指示植物富集元素的作用, 如红树植物白骨壤 (*Avicennia marina*) 的叶被广西沿海群众用作绿肥就是因为其灰分含量高 (12.27%), 特别是 N、P 含量高的缘故^[13]。植物各组分对土壤元素的富集量本质上与植物各组分对元素的需求量和土壤中元素的含量及存在形态等有关, 而元素的存在形态因不同因素而不同, 因此灰分含量与生长的土壤条件有关, 不是固定不变的, 灰分含量的高低可反映不同植物对矿质元素选择吸收与积累的特点。

3.1.2 干重热值 7 种木麻黄小枝的干重热值在 $19.46 \pm 0.07 \sim 20.82 \pm 0.15\text{kJ/g}$ 之间。山神木麻黄的干重热值最高 (其灰分含量最低), 普通木麻黄的干重热值最低 (其灰分含量最高)。其中, 山神木麻黄、鸡冠木麻黄、粗枝木麻黄的干重热值较高, 在 20.50kJ/g 以上; 肥木木麻黄、普通木麻黄较低, 在 19.80kJ/g 以下; 而细枝木麻黄、滨海木麻黄居中, 在 20kJ/g 左右。

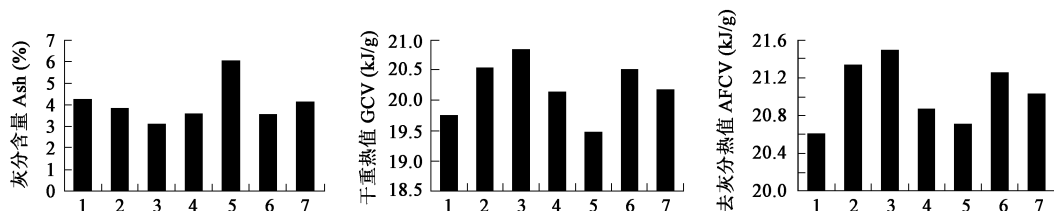


图 1 7 种木麻黄小枝的灰分含量、干重热值和去灰分热值

Fig 1 Ash content, gross caloric value and ash free caloric value in branchlets of seven Casuarinaceae species

1. 肥木木麻黄 *Casuarina obesa*; 2. 鸡冠木麻黄 *C. cristata*; 3. 山神木麻黄 *C. collina*; 4. 滨海木麻黄 *A. llocasuarina littoralis*; 5. 普通木麻黄 *C. equisetifolia*; 6. 粗枝木麻黄 *C. glauca*; 7. 细枝木麻黄 *C. cunninghamiana*

与福建邻近地区不同植被类型叶片的平均干重热值相比 (表 2), 亚热带福建东山 7 种木麻黄小枝的平均干重热值 20.19kJ/g , 高于福建厦门棕榈植物叶 19.63kJ/g , 榕属植物叶 19.05kJ/g , 福建华安竹类植物叶 17.67kJ/g ; 而与海南尖峰岭热带山地雨林乔木叶 20.47kJ/g 相近。同时, 东山 7 种木麻黄小枝的平均干重热值明显高于世界陆生植物叶的平均干重热值 (17.77kJ/g)^[16]。反映出木麻黄植物具有相对较高的热值水平。

3.1.3 去灰分热值 7 种木麻黄小枝的去灰分热值在 $20.59 \pm 0.05 \sim 21.48 \pm 0.15\text{kJ/g}$ 之间, 平均为 $21.03 \pm 0.33\text{kJ/g}$ (图 1)。

山神木麻黄的去灰分热值最高(其干重热值也最高),肥木木麻黄的去灰分热值最低。去灰分热值与干重热值的高低顺序不完全相同。

山神木麻黄具有高的干重热值和去灰分热值,Howard-William^[17]、Franken^[18]在研究亚马逊地区的热带雨林时发现有些植物叶的高热值现象。Howard-William 指出,亚马逊地区植物叶的高热值现象是与亚马逊地区非常贫瘠的土壤条件下,植物适应环境的结果,在植物叶子中进行了高能化合物的积累。由于土壤贫瘠,养分的有效性较低限制了植物的生长,导致光合作用进入另一渠道生产高能的化合物如蜡、树脂和脂肪,这些化合物保护叶子免受食草动物的啃食,避免了植物体的能量损失。这种植物对环境的特殊适应也反映植物主动适应环境的能力,是植物自身的高能量对物质的一种补偿作用。山神木麻黄的研究得出相类似的结果,从表 4 可以看出,山神木麻黄小枝的粗脂肪含量明显高于其余种类,在小枝内进行了粗脂肪的积累。

表 2 不同植被类型叶片的平均干重热值

Table 2 Average gross caloric values in leaves of various vegetation types

植被类型 Vegetation type	取样地区 Sampling site	种数 No. of species	叶片平均干重热值 Average gross caloric values in leaves (kJ/g)	资料来源 Cited from
热带山地雨林 Tropical mountain rain forest	海南尖峰岭 Jianfengling, Hainan	68	20.47	[11]
竹类植物 Bamboo	福建华安 Huaan County, Fujian	46	17.67	[12]
棕榈植物 Palmae species	福建厦门 Xiamen City, Fujian	8	19.63	[14]
榕属植物 Ficus species	福建厦门 Xiamen City, Fujian	10	19.05	[15]
木麻黄植物 Casuarinaceae species	福建东山 Dongshan County, Fujian	7	20.19	本文

表 3 7 种木麻黄小枝元素含量

Table 3 Element contents in branchlets of seven Casuarinaceae species

树种 Species	N (%)	P (%)	C (%)	C N	N P
肥木木麻黄 <i>Casuarina obesa</i>	1.59 ± 0.01	0.14 ± 0.00	43.76 ± 1.35	27.58	11.11
鸡冠木麻黄 <i>C. cristata</i>	1.65 ± 0.02	0.10 ± 0.00	43.13 ± 1.37	26.15	17.04
山神木麻黄 <i>C. collina</i>	1.66 ± 0.03	0.14 ± 0.00	49.96 ± 1.34	30.04	11.96
滨海木麻黄 <i>A. locasuarina littoralis</i>	1.49 ± 0.02	0.09 ± 0.01	47.51 ± 1.17	31.80	17.14
普通木麻黄 <i>C. equisetifolia</i>	1.79 ± 0.01	0.19 ± 0.01	45.51 ± 0.33	25.48	9.29
粗枝木麻黄 <i>C. gluca</i>	1.70 ± 0.02	0.15 ± 0.00	44.62 ± 1.30	26.22	11.14
细枝木麻黄 <i>C. cunningham aina</i>	1.69 ± 0.03	0.14 ± 0.00	45.81 ± 0.91	27.07	11.87
平均 Average	1.65 ± 0.09	0.14 ± 0.04	45.76 ± 2.43	27.76	12.79

3.1.4 元素含量 7 种木麻黄小枝的 N 含量在 (1.49 ± 0.02)% ~ (1.79 ± 0.01)% 之间,平均 (1.65 ± 0.09)% ; P 含量在 (0.09 ± 0.01)% ~ (0.19 ± 0.01)% 之间,平均 (0.14 ± 0.04)% ; N 与 P 含量具有显著线性相关,相关方程为: $y = 0.3116x - 0.3789$, $r = 0.8179$, $P < 0.05$ 。C 含量在 (43.13 ± 1.37)% ~ (49.96 ± 1.34)% 之间,平均 (45.76 ± 2.43)% (表 3)。黄维南等^[19]研究与木麻黄相伴而生的马占相思 (*Acacia mangium*) 叶状柄的 N 含量为 2.64%, P 含量为 0.62%, N、P 含量都要比木麻黄高。

Bhatt & Todaria^[20]认为,理想的植物燃料应该是热值高、密度高、灰分含量低和水分含量低,但他们没有考虑 P 和 K 浓度对燃料品质的影响。不同的植物品种有不同的燃料特性。木麻黄作为一种重要的沿海防护林,同时也是沿海一带重要的薪炭林^[21]。在 7 种木麻黄中,山神木麻黄小枝的灰分含量最低 (3.06%), 而干重热值和去灰分热值最高,符合理想燃料对低灰分含量和高热值的要求;但由于木麻黄生长地方多为滨海地带,土壤贫瘠,过去海岸居民常收集落叶作为燃料,这对改善土壤不利,落叶如果留在林地,将有利于减少土壤养分损失。

3.1.5 粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖、单宁含量 植物在能量生产中合成的基本含能物质是脂肪、蛋白质和碳水化合物,它们是植物含能产品干物质的主要组成成分^[22]。另外单宁中的水溶性成分,可以和可溶性糖构成可溶性有机物质的重要成分;木麻黄是一种单宁含量较高的植物,而且单宁在植物体内也是一种重要的含能物质^[23]。

7 种木麻黄小枝的粗蛋白含量在 (9.34 ± 0.11)% ~ (11.16 ± 0.09)% 之间,平均为 (10.33 ± 0.58)% ;粗脂肪的含量在 (2.45 ± 0.02)% ~ (6.57 ± 0.30)% 之间,平均为 (3.81 ± 1.57)% ;可溶性糖的含量在 (5.68 ± 0.13)% ~ (10.46 ± 0.70)% 之间,平均为 (7.14 ± 1.58)% ;单宁含量在 (6.39 ± 0.53)% ~ (15.77 ± 0.28)% 之间,平均为 (10.01 ± 3.18)% (表 4)。黄维南等^[19]研究马占相思叶状柄的粗蛋白含量为 16.5%, 高于东山 7 种木麻黄;粗脂肪为 4.86% ~ 5.59% 则较为接近。刘荣堂和陈本健^[24]分析了赛加羚羊引种区 72 种植物的营养成分,粗蛋白含量一般在 10% ~ 15% 之间,这个结果与东山 7 种木麻黄所测定的结果比较接近。

3.1.6 讨论 植物组分或器官干重热值的差异主要是受自身组成(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^[14]。

表 4 7 种木麻黄小枝的粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖、单宁含量

树种 Species	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Raw fat (%)	可溶性糖 Soluble sugar (%)	单宁 Tannin (%)
肥木木麻黄 <i>Casuarina obesa</i>	9.91 ± 0.07	2.49 ± 0.12	6.76 ± 0.24	12.06 ± 0.01
鸡冠木麻黄 <i>C. cristata</i>	10.31 ± 0.12	4.96 ± 0.11	6.24 ± 0.45	7.70 ± 0.60
山神木麻黄 <i>C. collina</i>	10.40 ± 0.17	6.57 ± 0.30	7.65 ± 0.28	8.51 ± 0.20
滨海木麻黄 <i>Alocasuarina littoralis</i>	9.34 ± 0.11	2.83 ± 0.01	10.46 ± 0.70	15.77 ± 0.28
普通木麻黄 <i>C. equisetifolia</i>	11.16 ± 0.09	2.45 ± 0.02	5.68 ± 0.13	6.39 ± 0.53
粗枝木麻黄 <i>C. glauca</i>	10.64 ± 0.11	4.47 ± 0.05	6.40 ± 0.09	8.76 ± 0.12
细枝木麻黄 <i>C. cunninghamiana</i>	10.58 ± 0.21	2.88 ± 0.18	6.78 ± 0.22	10.92 ± 0.64
平均 Average	10.33 ± 0.58	3.81 ± 1.57	7.14 ± 1.58	10.01 ± 3.18

通过相关分析表明, 7 种木麻黄小枝的干重热值与灰分含量具有显著的线性负相关(相关方程为 $y = -1.7185x + 38.705$, 其中 $r = 0.8645$, $P < 0.01$); 干重热值与粗脂肪含量具有极显著的线性正相关(相关方程为 $y = 2.9637x - 56.025$, 其中 $r = 0.8983$, $P < 0.01$), 而与蛋白质、可溶性糖、单宁含量相关性不显著($P > 0.05$)。粗脂肪、粗蛋白、可溶性糖和单宁是植物重要的含能有机物, 它们的干重热值分别为 38.87kJ/g、22.99kJ/g、15.99kJ/g 和 16.31kJ/g^[16]。可以看出, 4 种有机化合物中, 粗脂肪具有最高的热值, 其含量较小的变化就可以引起样品热值的波动。所以, 在热值与各营养成分的回归方程中, 粗脂肪的贡献值最大。但样品热值与有机化合物的关系是复杂的。Boyd^[25]发现, 虽然水生维管植物蛋白质含量相差很大, 但它们的热值都相当一致。De la Cruz 和 Gabriel^[26]研究发现, 黑灯心草(*Juncus roemerianus*) 叶片分解时虽然热值提高, 但粗脂肪、粗蛋白、碳水化合物和粗纤维的含量不仅没有相应提高, 反而下降。他们没有对此矛盾作出解释。由此看来, 可能存在其它类型的富能化合物。如木质素-蛋白质缩合物或酚类-蛋白质缩合物之类的复杂大分子含 N 缩合物, 木麻黄小枝具有较高的单宁含量, 张振珏等^[23]发现细枝木麻黄的韧皮薄壁组织细胞和射线组织细胞中终年含有单宁, 单宁的多元酚结构赋予其一系列独特的化学性质, 其中单宁与蛋白质的结合是其最重要的特征, 蛋白质和单宁对木麻黄小枝热值的影响是复杂的, 这将有待于进一步研究。

木麻黄作为滨海防护树种, 与相邻地区的不同植被类型植物叶片热值进行比较, 其干重热值和去灰分热值均达较高水平, 反映了木麻黄在光合作用中转化太阳能的能力较高; 由于生长于滨海沙地, 土壤贫瘠, 养分有效性低限制了木麻黄的生长, 导致光合作用进入另一渠道生产高能的化合物, 如脂肪, 木麻黄小枝的干重热值与粗脂肪含量具有极显著的线性正相关证明了这一点; 同时木麻黄体内要进行能量积累以抵抗强风等环境胁迫, 这些也可使热值提高。木麻黄的高热值现象是其适应环境的结果。

许多研究表明, 干重热值的高低与植物的抗寒性有一定的关系, 抗寒的种类比喜热的种类具有更高的干重热值^[12, 27]。在 7 种木麻黄中, 山神木麻黄的干重热值和去灰分热值最高, 反映出其具有较强的抗低温适应性, 这对山神木麻黄的引种栽培具有实践指导意义。

3.2 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的物质与能量特征

3.2.1 灰分含量 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的灰分含量在 3.58% ~ 8.75% 之间, 灰分含量最高的是海岸 2 号, 最低的是海岸 9 号, 平均为 6.03%。除海岸 2 号与 9 号外, 其余各点的灰分含量在 5.24% ~ 6.95% 之间, 灰分含量较为接近(图 2)。如前所述, 灰分含量与生长的土壤条件有关, 不是固定不变的。

3.2.2 干重热值 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的干重热值在 20.33 ± 0.00 ~ 21.63 ± 0.06kJ/g 之间, 平均为 20.95 ± 0.50kJ/g。前沿的 1、2 号和中部的 5、6 号干重热值较低, 而后沿的 9、10 号干重热值较高(图 2)。一般认为, 海岸 1、2 号的普通木麻黄, 要消耗大量能量以抵抗强风胁迫; 为保持能量平衡, 就必须积累能量丰富的化合物, 从而表现为热值升高, 其代价为生长的降低; 因而海岸前沿的普通木麻黄通常生长低矮, 但这是有限度的, 但胁迫超过某一阈值, 植物体通过降低生长还不足以维持能量的平衡时, 只有动用自身的能量贮备, 结果引起热值下降。

3.2.3 去灰分热值 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的去灰分热值在 21.67 ± 0.00 ~ 22.86 ± 0.06kJ/g 之间, 平均为 22.29 ± 0.43kJ/g。后沿的海岸 10 号的去灰分热值较高, 中部海岸 5、6 号和前沿的 1 号的去灰分热值较低。去灰分热值与干重热值的高低顺序不太相同, 灰分含量的差异是干重热值差异的重要原因。

3.2.4 元素含量 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的 N 含量在 (1.46 ± 0.03)% ~ (2.43 ± 0.08)% 之间, 平均值为 (2.01 ± 0.28)% (表 5)。干重热值最低的海岸 6 号, 其 N 含量也最低; N 含量最高的为海岸 2 号。

P 含量在 (0.11 ± 0.01)% ~ (0.37 ± 0.01)% 之间, 平均 (0.21 ± 0.08)%。海岸 6 号的 P 含量也是最低, 海岸 2 号 P 含量最高。其中 N 与 P 含量具有极显著的线性相关, 相关方程为: $y = 0.2505x - 0.2893$, 其中 $r = 0.9053$, $P < 0.01$ 。

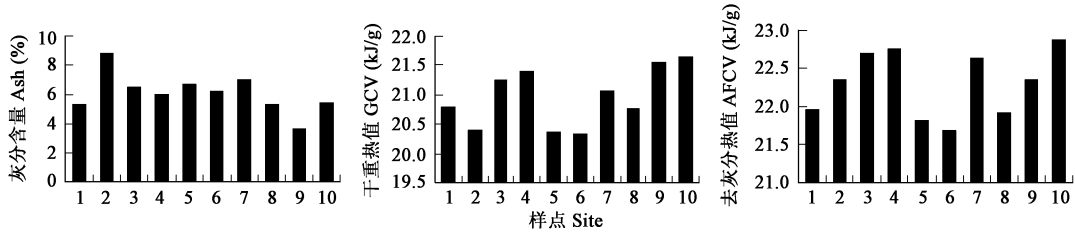


图2 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的灰分含量、干重热值、去灰分热值变化

Fig 2 Ash content, gross calorific value and ash free calorific value in branchlets of *Casuarina equisetifolia* at different sites far from coast

距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的C含量在(43.13 ± 0.22)% ~ (52.53 ± 0.78)%之间,平均值为(47.50 ± 2.87)%。C/N比为(20~ 33) 1, C/N比最高的为干重热值最低的海岸6号。

表5 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的元素含量

Table 5 Element concentrations in branchlets of *Casuarina equisetifolia* at different sites far from coast

样点 Site	N (%)	P (%)	C (%)	C/N	N/P
1	2.05 ± 0.02	0.19 ± 0.01	43.13 ± 0.22	21.08	10.88
2	2.43 ± 0.08	0.37 ± 0.01	49.53 ± 0.85	20.42	6.64
3	2.18 ± 0.02	0.27 ± 0.01	46.47 ± 0.09	21.27	8.18
4	2.31 ± 0.04	0.32 ± 0.01	52.53 ± 0.78	22.71	7.25
5	2.05 ± 0.04	0.19 ± 0.01	44.04 ± 0.78	21.52	10.82
6	1.46 ± 0.05	0.11 ± 0.01	47.61 ± 0.31	32.66	13.47
7	1.90 ± 0.03	0.18 ± 0.01	46.38 ± 0.59	24.41	10.72
8	1.69 ± 0.02	0.16 ± 0.01	49.87 ± 0.85	29.53	10.85
9	1.94 ± 0.03	0.19 ± 0.01	49.42 ± 0.86	25.45	10.29
10	2.09 ± 0.03	0.18 ± 0.01	46.06 ± 0.95	22.06	11.57
平均 Average	2.01 ± 0.28	0.21 ± 0.08	47.50 ± 2.87	24.11	10.07

C、N同为生物圈最重要的基本元素,密切参与植物的生命过程。C、N不仅各自影响着生物活动,它们之间也密切相关。碳代谢有效性与氮代谢的有效性是相互影响的。氮渗入时所用的能量和分子骨架来源于碳代谢,而植物的合成活力及新组织的生成则受控于氮的供给^[28]。生物学上,通过这两种元素的比例来透视它们之间的相互关系。所谓碳氮比就是含碳百分率与含氮百分率之比,它反映出在新鲜有机物质、腐殖质或整个个体中这两种元素的相对量。碳氮比值的大小对于有机物的矿化速度及植物的生长有很大影响,而且还可借此评价土壤肥力是否有效,最适C/N比为(25~ 30) 1^[29]。东山距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的C/N比为(20~ 33) 1,与此值范围较为接近,表明木麻黄是适合于滨海沙地贫瘠土壤栽培的重要防护树种。

3.2.5 粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖、单宁含量 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的粗蛋白含量在(9.11 ± 0.31)% ~ (15.16 ± 0.48)%之间,平均为(12.55 ± 1.78)%;粗脂肪的含量在(4.20 ± 0.05)% ~ (6.14 ± 0.08)%之间,平均为(5.24 ± 0.61)%。可溶性糖含量在(6.33 ± 0.46)% ~ (12.06 ± 0.66)%之间,平均为(8.45 ± 1.63)%;单宁含量在(3.99 ± 0.04)% ~ (12.44 ± 0.71)%之间,平均为(7.50 ± 2.42)% (表6)。

表6 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝粗蛋白、粗脂肪、可溶性糖、单宁含量

Table 6 Contents of crude protein, raw fat, soluble sugar and tannin in branchlets of *Casuarina equisetifolia* at different sites far from coast

样点 Site	粗蛋白	粗脂肪	可溶性糖	单宁 Tannin (%)
	Crude protein (%)	Raw fat (%)	Soluble sugar (%)	
1	12.79 ± 0.10	5.15 ± 0.03	9.59 ± 0.83	9.64 ± 0.29
2	15.16 ± 0.48	4.44 ± 0.15	6.80 ± 1.25	7.68 ± 0.35
3	13.65 ± 0.13	5.72 ± 0.19	6.33 ± 0.46	4.43 ± 0.33
4	14.46 ± 0.23	5.82 ± 0.18	8.25 ± 0.54	7.48 ± 0.43
5	12.79 ± 0.27	4.20 ± 0.05	8.17 ± 1.02	6.66 ± 0.06
6	9.11 ± 0.31	5.06 ± 0.01	9.11 ± 0.20	8.49 ± 0.05
7	11.88 ± 0.21	5.42 ± 0.06	7.42 ± 1.05	3.99 ± 0.04
8	10.56 ± 0.11	4.91 ± 0.11	9.03 ± 0.41	6.87 ± 0.12
9	12.14 ± 0.17	6.14 ± 0.08	7.78 ± 1.01	7.33 ± 0.16
10	13.05 ± 0.18	5.51 ± 0.07	12.06 ± 0.66	12.44 ± 0.71
平均 Average	12.55 ± 1.78	5.24 ± 0.61	8.45 ± 1.63	7.50 ± 2.42

3.2.6 讨论 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的干重热值在 20.33 ± 0.00~ 21.63 ± 0.06kJ/g 之间,前沿的1、2号干重热

值较低是由于长期的强风胁迫的结果,一方面植株消耗了自身的能量储备以维持能量平衡,另一方面海风中夹带盐沙对风口的普通木麻黄小枝也造成伤害,表现在叶绿素降解,植株失绿,小枝发生“肥胖”现象,光合能力下降,引起热值下降;3、4号的普通木麻黄受强风胁迫明显减轻,能量消耗减少,植株在体内进行能量积累,热值逐渐升高;从中部5号到后沿10号,由于前沿林带的阻挡,风力大为减弱,植株的生长主要受土壤因子的影响;5~7号土壤(沙土)有机质的含量明显低于8~10号(后沿土壤为沙壤土),8~10号土壤有机质含量是5、6号土壤的10倍,而7号也有5、6号的3倍(表1),后沿相对优越的土壤条件,更有利于植株的生长,植株生长良好,光合作用越强,光合作用积累的能量也越多,因此后沿的植株热值最高。

通过相关分析表明,距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的干重热值与所含的粗脂肪含量具有极显著的线性相关,相关方程为 $y = 1.0761x - 17.301$, 其中 $r = 0.8731$, $P < 0.01$; 而与蛋白质 ($P > 0.05$)、可溶性糖含量 ($P > 0.05$)、灰分含量 ($P > 0.05$) 相关性不显著。

4 结论

(1) 东山7种木麻黄小枝的灰分含量、干重热值和去灰分热值因种而异,其中,山神木麻黄小枝的灰分含量最低,而干重热值和去灰分热值最高。木麻黄小枝具有相对较高的热值现象(特别是山神木麻黄)是在贫瘠的土壤条件下适应环境的结果,在小枝中进行了高能化合物的积累。木麻黄对环境的特殊适应也反映其主动适应环境的能力,是植物自身的高能量对物质的一种补偿作用。

(2) 7种木麻黄小枝的干重热值与灰分含量具有显著的线性负相关 ($P < 0.05$); 干重热值与粗脂肪含量具有极显著的线性正相关 ($P < 0.01$), 而与蛋白质、可溶性糖含量相关性不显著 ($P > 0.05$)。

(3) 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的物质与能量特征存在差异,其中位于前沿、中部的普通木麻黄小枝的干重热值和去灰分热值相对较低,特别是前沿的低热值是长期强风胁迫的结果,是耗能的过程;从中部到后沿,风的胁迫小,植株的生长及热值的高低主要受土壤因子的影响,后沿相对优越的土壤条件,更有利于植株的生长,植株生长良好,光合作用越强,光合作用积累的能量也越多,因此后沿的植株热值最高。

(4) 距海岸不同远近的普通木麻黄小枝的干重热值与所含的粗脂肪含量具有极显著的线性相关 ($P < 0.01$); 而与蛋白质 ($P > 0.05$)、可溶性糖含量 ($P > 0.05$)、灰分含量 ($P > 0.05$) 相关性不显著。

(5) 综合来看,热值的高低受多种因素的影响,是各种因素综合作用的结果。

References

- [1] Ye G F, Zheng R H, Feng Z X. A study on the monographic literature of *Casuarina*. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology*, 1994, **21**(1): 57~ 61.
- [2] Zhan H Y, Yue B Z, Liu J W, et al. Fiber characteristics and pulping and bleaching performances of *Casuarina equisetifolia*. *China Pulp & Paper*, 1998, **17**(6): 38~ 43.
- [3] Zhang S S, Ye G F. A study on techniques of regeneration and transformation of protection forest in the coast zone. *Protection Forest Science and Technology*, 2000, (Sp. 1): 1~ 193.
- [4] Sun G F, Zheng Z M, Wang Z Q. Dynamics of calorific values of rice. *Chinese Journal of Ecology*, 1993, **12**(1): 1~ 4.
- [5] South China Institute of Tropical Crops. Determining N concentration in the leaves of rubber trees by colorimetric method. *Bulletin of Tropical Crops*, 1974, (5): 12~ 13.
- [6] The agricultural chemistry committee of Chinese Soil Society. *Common analysis methods in soil agricultural chemistry*. Beijing: Science Press, 1983. 261~ 265.
- [7] Shi B, Di Y. *Plant Polyphenols*. Beijing: Science Press, 2000. 1~ 324.
- [8] Li H S. *Principles and technology of plant physiological and biochemical experiments*. Beijing: Higher Education Press, 2000. 194~ 197.
- [9] The Chinese Soil Society. *Analysis methods in soil agricultural chemistry of China*. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 2000. 92~ 94.
- [10] Yang J G, Tang J, He S L. Relationships between chemical compositions of trees and characteristics of coastal sand and beach salty soils in Beihai city of Guangxi Province. *Chinese Journal of Soil Science*, 1994, **25**(4): 158~ 162.
- [11] Li Y D, Wu Z M, Zeng Q B, et al. Caloric values of main species in a tropical mountain rain forest at Jianfengling, Hainan island. *Acta Phytocologia Sinica*, 1996, **20**(1): 1~ 10.
- [12] Lin Y M, Li Z B, Chen Y Y, et al. Caloric values in leaves of some bamboo species in the Bamboo Garden of Hua an county. *Chinese Bulletin of Botany*, 2001, **18**(3): 356~ 362.
- [13] Lin P. *Mangrove vegetation*. Beijing: China Ocean Press, 1984. 38~ 48.
- [14] Lin Y M, Wang Z C, Ke L N, et al. Monthly changes in the calorific values of the leaves of four shrubby and four tree-dwelling *Palmae* species. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, **23**(6): 1117~ 1124.
- [15] Xiang P, Lin Y M, Ding Y L, et al. Study on calorific values and ash contents in the leaves of ten *Ficus* species at Xiamen Botanical

- Garden *Scientia Silvae Sinicae*, 2003, **39**(Sp. 1): 68~ 73
- [16] Lieth H, Whittaker R. *Primary productivity of the biosphere* New York: Springer-verlag, 1975. 1~ 129
- [17] Howards-William s C. Nutrient quality and caloric value of Amazonian forest litter *Amazonsians*, 1974, **1**: 67~ 75
- [18] Franken M. Major nutrient and energy contents of the litterfall of a riverine forest of central Amazonia *Trop. Ecol*, 1979, **20**(2): 211~ 224
- [19] Huang W N, You R C, Huang Z H, *et al* Plant growth, nodule nitrogenase activity and phyllode nutrient content in *Acacia mangium*. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2000, **8**(2): 118~ 122
- [20] Bhatt B P, Todaria N P. Fuelwood characteristics of some mountain trees and shrubs *Biomass*, 1990, **21**: 233~ 238
- [21] National Academy of Sciences *Firewood crops: shrub and tree species for energy production*. National Academy of Sciences, Washington D C, 1980 38~ 41
- [22] Zu Y G. *Introduction to energy ecology*. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1990
- [23] Zhang Z J, Lin J Y, Chen Z R, *et al* The distribution of tannin in vegetation organs of three important tannin plants *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 1997, **5**(2): 89~ 92
- [24] Liu R T, Chen B J. The vegetation characteristics in the introduction area of *Saiga tatarica* II. structure of plant community and nutrition analysis of the main species *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(3): 265~ 268
- [25] Boyd C E. Amino acid, protein, and caloric content of vascular aquatic macrophytes *Ecology*, 1970, **51**: 902~ 906
- [26] De la Cruz A A, Gabriel B C. Caloric, elemental, and nutritive changes in decomposing *Juncus roemerianus* leaves *Ecology*, 1974, **55**: 882~ 886
- [27] Lin P, Lin G H. Study on the caloric value and ash content of some mangrove species in China *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1991, **15**(2): 114~ 120
- [28] Larcher W. Translated by Li B. *Physiological Plant Ecology*. Beijing: Science Press, 1980 119~ 131.
- [29] Tisdale S L, Nelson W L. Translated by Sun X T. *Soil fertility and fertilizers* Beijing: Science Press, 1984 74~ 115.

参考文献:

- [1] 叶功富, 郑仁华, 冯泽幸. 木麻黄专题文献研究. 福建林业科技, 1994, **21**(1): 57~ 61.
- [2] 詹怀宇, 岳保珍, 刘继文, 等. 木麻黄纤维特性和制浆漂白性能的初步研究. 中国造纸, 1998, **17**(6): 38~ 43.
- [3] 张水松, 叶功富. 海岸带防护林更新改造技术研究. 防护林科技, 2000, (专刊 1): 1~ 193.
- [4] 孙国夫, 郑志明, 王兆骞. 水稻热值的动态变化研究. 生态学杂志, 1993, **12**(1): 1~ 4.
- [5] 华南热带作物研究所. 用比色法测定橡胶叶片氮含量. 热作科技通讯, 1974, (5): 12~ 13.
- [6] 中国土壤学会农业化学专业委员会. 土壤农业化学分析常规分析方法. 北京: 科学出版社, 1983. 261~ 265.
- [7] 石碧, 狄莹. 植物多酚. 北京: 科学出版社, 2000. 1~ 324.
- [8] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术. 北京: 高等教育出版社, 2000. 194~ 197.
- [9] 中国土壤学会. 中国农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 92~ 94.
- [10] 杨继镛, 唐俊, 何盛烈. 广西北海市海岸砂土和潮滩盐土的特性与林木化学成分及其相互关系. 土壤通报, 1994, **25**(4): 158~ 162.
- [11] 李意德, 吴仲民, 曾庆波, 等. 尖峰岭热带山地雨林主要种类能量背景值测定分析. 植物生态学报, 1996, **20**(1): 1~ 10.
- [12] 林益明, 黎中宝, 陈奕源, 等. 福建华安竹园一些竹类植物叶的热值研究. 植物学通报, 2001, **18**(3): 356~ 362.
- [13] 林鹏. 红树林. 北京: 海洋出版社, 1984. 38~ 48.
- [14] 林益明, 王湛昌, 柯莉娜, 等. 四种灌木状与四种乔木状棕榈植物热值的月变化. 生态学报, 2003, **23**(6): 1117~ 1124.
- [15] 向平, 林益明, 丁印龙, 等. 厦门园林植物园 10 种榕属植物叶热值与灰分含量的研究. 林业科学, 2003, **39**(专刊 1): 68~ 73.
- [19] 黄维南, 尤瑞琛, 黄志宏, 等. 马占相思(*Acacia mangium*) 的生长、固氮及叶状柄的营养成分. 热带亚热带植物学报, 2000, **8**(2): 118~ 122.
- [22] 祖元刚. 能量生态学引论. 长春: 吉林科学技术出版社, 1990.
- [23] 张振珏, 林锦仪, 陈忠仁, 等. 三种重要单宁植物营养器官中单宁的分布. 热带亚热带植物学报, 1997, **5**(2): 89~ 92.
- [24] 刘荣堂, 陈本健. 赛加羚羊 *Saiga tatarica* 引种区植被特征研究 II. 植物群落结构及主要植物营养成分分析. 生态学报, 1996, **16**(3): 265~ 268.
- [27] 林鹏, 林光辉. 几种红树植物的热值和灰分含量的研究. 植物生态学与地植物学学报, 1991, **15**(2): 114~ 120.
- [28] Larcher W. 李博, 等译. 植物生理生态学. 北京: 科学出版社, 1980. 119~ 131.
- [29] Tisdale S L, Nelson W L, 孙秀廷, 等译. 土壤肥力与肥料. 北京: 科学出版社, 1984. 74~ 115.