

我国植物热值研究综述^{*}

官丽莉^{**} 周小勇 罗 艳

(中国科学院华南植物园, 广州 510650)

摘 要 植物热值是指植物干物质完全燃烧后所释放出来的能量值,它反映了绿色植物在光合作用中固定太阳辐射能的能力,是植物本身的重要特征,也是衡量第一性生产力的重要指标。本文综述了目前国内有关植物热值研究的几个方面成果,包括植物热值在器官、个体、群落等水平上的变化规律和时间、空间动态以及物质成分、灰分含量、环境因子等因素对植物热值的影响。

关键词 植物,热值,影响因素

中图分类号 Q94 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2005)04-0452-06

A review on the study of plant caloric value in China. GUAN Lili, ZHOU Xiaoyong, LUO Yan (South China Botany Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(4): 452 ~ 457.

Plant caloric value is termed as heat emitted by plant materials after complete combustion of dry matter. It indicates capability of plants to fix solar radiation and therefore it is one of the characters of plant and an important index of primary production. Some aspects of plant caloric value study were reviewed in the paper, including changes of caloric value at organic, individual and community levels, spatial and temporal dynamics of plant caloric value, effects of components, ash contents and some environmental factors on caloric value of plant materials.

Key words plant, caloric value, influencing factor.

1 引 言

绿色植物在光合作用过程中,将日光能转化为化学能,这种潜在的化学能以植物热值含量的高低来表示,它直接反映植物对太阳能的转化效率,是生态系统中太阳能与所有生物组成之间的共同数值,所以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映出群落对自然资源(特别是太阳能)的利用情况^[41]。热值是能量的尺度,也是衡量第一性生产力水平的重要指标。同时,热值反映了组织中各种生理活动的变化和各種环境因子对植物生长的影响,可作为植物生长状况的一个有效指标^[21],其含量可作为植物营养价值的标志之一。所以,热值是评价和反映生态系统中物质循环和能量转化规律的重要指标。随着生态系统功能过程研究的深入,热值测定日益引起了人们的重视。

国外对植物热值的研究已有数十年历史。1934年 Long^[42]首先测定了向日葵(*Helianthus annuus*)不同部位叶片热值,1960年 Colley^[33]应用氧弹式热量计测定了从热带雨林至极地泰加林主要植物群落中优势植物种类的平均热值,同时 Bliss^[32]和 Ol-

son^[43]也进行了大量的能值研究,此后生物个体、种群和群落热值测定普遍开展^[34,35,40,45]。但经过20世纪60、70年代的蓬勃发展之后,植物热值的研究趋于沉寂。

我国在这方面的研究起步较晚,到20世纪80年代初才有零星报道。开展较早的是草原草甸生态系统的研究,如杨福囤等^[12]1978年对高寒草甸地区常见植物热值的测定。祖元刚等^[25]对羊草群落各器官热值的研究,其后有陈佐忠等^[14]对内蒙古典型草原地带118种植物热值的测定,龙瑞军等^[3]对天祝高山草原15种饲用灌木热值的研究。森林群落方面,在各个气候带内的多个生态系统都有报道。从北到南主要有刘世荣等^[5]对落叶松人工林,孙雪峰^[8]对暖温带落叶阔叶林热值的研究,还有任海等^[4]研究了南亚热带鼎湖山4个群落37种植物热值,李意德等^[10]测定了海南尖峰岭热带山地雨林共83种植物各器官热值。许多研究者对红树林生态系统进行研究,涉及海莲(*Bruguera sexangula*)、秋茄(*Kandelia candel*)、木榄(*Bruguiera gymnor-*

^{*}中国科学院知识创新工程重大方向性项目(KSCX2-SW-120)、和国家科技部“973”前期资助项目(2001CCB00600)。

^{**}通讯作者

收稿日期:2003-09-16 改回日期:2004-05-17

rhiza) 等多个群落的热值动态^[15,17,19,21,24]。但是, 这些研究大多在单个生态系统内进行, 而且研究方法不同, 从某种程度来说是零散、孤立的, 急需系统化。本文总结目前国内的研究成果, 试图归纳不同层次上植物热值的变化规律及其时间、空间动态和影响因素, 为今后植物热值研究的进一步开展提供一定的指导。

2 植物器官间热值的差异

由于草本植物不易区分器官, 多数研究均按整株取样, 在此只考虑乔、灌木和某些竹类不同器官的热值变化。

植物体器官间热值存在差异, 一般来说, 各器官

表1 我国不同气候区一些树种不同器官的热值(kJ g⁻¹)

Tab.1 Caloric value in organs of some species in different climatic zones of China

气候带	群落	树种	器 官					群落平均	来源
			叶	枝	干	根	皮		
暖温带	高寒草甸	金露梅	20.17	20.63	-	20.78	-	20.70	[1]
暖温带	落叶阔叶林	辽东栎	18.52	18.23	18.22	17.72	-	18.35	[8]
		棘皮桦	19.39	18.93	19.06	18.51	-		
		五角枫	18.38	18.36	18.29	18.29	-		
		大叶白蜡	18.32	17.95	17.44	18.00	-		
暖温带	针阔混交林	青	20.27	19.94	20.31	20.01	20.28	20.08 ^a	[2]
		巴山冷杉	22.44	20.69	20.16	19.78	19.86		
		牛皮桦	18.50	19.47	19.37	18.40	21.73		
亚热带	慈竹林	慈竹 ^b	19.45	18.11	17.11	15.35	-	17.51	[13]
南亚热带	绿竹林	绿竹	17.12	19.96	18.65	16.63	-	18.09	[16]
南亚热带	季风常绿阔叶林	锥栗	19.85	19.59	19.18	18.49	-	20.14	[4]
		荷木	20.29	18.56	18.89	16.60	-		
		厚壳桂	21.90	19.36	19.59	18.77	-		
		云南银柴	19.45	18.89	18.28	14.93	-		
	混交林	马尾松	22.89	21.82	18.83	18.02	-	20.57	
		锥栗	20.09	19.31	19.96	18.65	-		
		荷木	20.09	19.06	19.62	18.34	-		
南亚热带	马尾松林	马尾松	19.99	19.38	18.75	17.53	-	19.84	
	红树林	无瓣海桑	19.48	19.01	19.33	17.50	17.18	18.45	[24]
热带	红树林	海桑	19.61	19.56	19.33	16.36	17.11		
		海莲	19.83	19.71	19.64	15.80	18.35	18.86	[15]
热带	山地雨林	秋茄	19.53	18.67	18.91	17.23	18.35		
		大叶白颜	17.88	18.54	19.44	-	15.95	19.57	[10]
		山月桂	19.08	19.73	20.03	-	20.06		
		黎蒴	21.14	19.46	19.53	-	19.21		
		鸡毛松	21.65	19.94	20.40	-	18.91		
		荷木	21.14	19.46	19.53	-	19.33		

a 为列出的三种植物的平均热值, b 为去灰分热值。其他为干重热值。金露梅 *Dasiphora fruticosa*, 辽东栎 *Quercus liaotungensis*, 棘皮桦 *Betula dahurica*, 五角枫 *Acer mono*, 大叶白蜡 *Fraxinus rhynchophylla*, 青杆 *Picea wilsonii*, 巴山冷杉 *Abies fargesii*, 牛皮桦 *Betula utilis*, 慈竹 *Neosinocalamus affinis*, 绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami*, 锥栗 *Castanopsis chinensis*, 荷木 *Schima superba*, 厚壳桂 *Cryptocarya chinensis*, 云南银柴 *Aporosa yunnanensis*, 马尾松 *Pinus massoniana*, 无瓣海桑 *Pinus massoniana*, 海桑 *Sonneratia apetala*, 大叶白颜 *Kandelia candel*, 山月桂 *Gironniera subaequalis*, 黎蒴 *Olea dioica*, 鸡毛松 *Castanopsis fissa*, 荷木 *Dacrycarpus imbricatus*。

热值大小顺序为叶 > 枝 > 干 > 根(表 1), 也有部分树种具体顺序略有不同。从植物解剖学和植物生理学角度看, 叶是植物体生理活动最活跃的器官, 含有较多的高能化合物如蛋白质和脂肪等物质, 另外它自身还能合成高能有机物, 因此, 叶的干重热值一般较高^[30]。而根、干、枝均为支持器官, 含纤维素成分多, 故热值也低。其中根距叶片最远, 又主要担负吸收矿质营养和水分的功能, 因而根的热值最低^[4]。

另外, 各器官热值大小除与各自有机成分相关外, 还与营养物质的运输过程关系密切。光合器官合成有机物, 沿枝送入茎干中, 最后才流入根中。在营养物质的输送过程中, 高能产品, 如脂类和蛋白质的输送速率要低于低能产品, 如碳水化合物; 而积累

速率却要高于低能产品。因此,高能产品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,形成叶 > 枝 > 干 > 根的顺序^[8]。

3 植物热值的种间差异

植物热值首先受植物种本身生物生态学特征的制约,不同植物种有其本身的遗传特性,具有不同生长发育节律和对环境的同化能力,反映在热值含量也有差异。

Whittaker^[31]的研究认为世界陆生植物的平均去灰分热值为 $17.7905 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。杨福国等^[12]测定了青海高寒草甸地区 29 种常见植物的热值,得到平均去灰分热值为 $18.5335 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,最高金露梅 $19.9082 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,最低是萼果香薷 (*Elsholtzia calycocarpa*) $16.0943 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,只有两种植物低于世界平均值。而内蒙古典型草原地带^[14] 118 中植物的平均热值为 $19.38 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,与美国 Bliss^[34]和 Ovington 等^[44]得到的草本植物热值相近,其中 $18 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的低热值植物占 11.02%, $18.1 \sim 20.9 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的中热值植物占 84.7%,而 $> 20.9 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的高热值植物仅占 4.2%,基本呈正态分布。对苜蓿属 (*Medicago*) 植物 45 个种的热值测定结果表明,不同种苜蓿差异显著性水平各异,总体上野生种群较栽培种群热值高^[9]。

天祝高山草原 15 种饲用灌木的热值同样分为高中低三类,其范围分别为 $21 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, $20 \sim 21 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 和 $20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,平均干重热值为 $20.3713 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

从表 1 可见,不同气候带乔木树种的平均热值为 $19.48 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$,最高达 $22.89 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (鼎湖混交林马尾松叶),最低只有 $14.93 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ (鼎湖季风林云南银柴根)。尖峰岭热带山地雨林内 67 种乔木中,各器官热值 $< 19.00 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的低热值种类占 20%, $> 20 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的约占 32%,其余是占 48% 的中热值种类,这个结果与该群落的生活型谱基本一致。王得祥等^[2]认为,针叶树各器官热值普遍高于阔叶树,尤其是树干。这可能是因为一方面针叶树脂类物质含量较高,另一方面与木质素含量有关,针叶树种木质素含量 (25% ~ 35%) 比阔叶树种 (18% ~ 22%) 高,其相应热值也高。另外,对 8 种阔叶树种各器官热值的测定表明,硬阔叶树种的干热值高于软阔叶树种,原因可能是前者的木质素含量较高。

4 植物热值的科间差异

比较科间热值差异的研究仅见陈佐忠对内蒙古典型草原地带 118 种植物热值的测定。由于研究的种类较多,包括 37 个科,选取了含有 6 个种以上的科进行分析统计^[14]。

不同科的热值有一定差异,以百合科最低,豆科最高,可能是由于后者脂肪含量较高。要进行科间热值的比较,需要有大量的测定结果,目前相关报道较少。

5 群落内各组分的热值差异

由表 2 可知,绝大多数群落各组分热值的大小顺序为乔木层 > 灌木层 > 草本层,这与 Adamandiadou^[33]的研究一致。这首先是因为植物生活型不同,其所含的木质素、纤维素及淀粉差别很大,所以热值大小不同。干重热值的这种递变还与各层次对矿物质的富集能力依次增强、群落内光照的有效性随高度依次降低有关,造成群落各层次在能量固定方面存在差异。

表 2 不同群落内各层次热值比较 ($\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$)

Tab.2 Comparison of caloric values at different levels of different communities

地点	群落	层次			来源
		乔木	灌木	草本	
美国	萨瓦纳群落	21.27	19.89	19.66	[42]
美国	新罕布什尔州华盛顿山	21.33	21.02	19.25	
内蒙古	典型草原	20.29	20.00	19.08	[14]
东北帽儿山	落叶松人工林	18.97	16.14	12.54	[5]
北京东灵山	落叶阔叶林	18.35	18.61	16.95	[8]
广东鼎湖	季风常绿阔叶林 ^a	20.14	19.80	18.57	[4]
广东鼎湖	针阔混交林 ^a	20.57	20.35	19.91	
广东鼎湖	针叶林 ^a	19.84	18.45	18.01	
福建和溪	热带雨林 ^b	20.97	18.64		[22]
福建三明	木荚红豆群落	19.09	18.29	17.53	[20]
海南尖峰岭	热带山地雨林	19.57	18.59		[10]

注: a 为去灰分热值,其他为干重热值; b 为叶的热值,其他为总体平均值。

6 植物热值的时间动态

Wielgolaski 等^[46]认为植物叶干重热值的季节变化趋势因不同种类而不同或相似。James 等^[40]研究发现叶在春季最高, Singh 等^[45]报道了印度萨瓦纳群落中草本植被地上部分干重热值在秋季最高。又如天祝高山草原 15 种灌木热值的季节变化可分为 3 种类型,即平滑型 (占总数 47%)、递增型 (33%) 和“V”字型 (20%)^[3]。

植物组织的生命活动与其体内物质能量的变化是紧密相关的,因此其热值的变化应与生命活动一样具有一定的规律和特点。例如水稻各组织在整个生育期的热值变化不同,其中叶片热值的变化曲线与水稻不同生长阶段物质的合成、积累、运输和转化理论相吻合。天祝金强河高寒地区金露梅整株热值在4~10月间成V型变化,可用线性方程 $y = 1058.18 - 38.636T$ ($r = -0.958$, y 为热值, T 为月均气温) 表达。叶的热值在6~9月间与当地水热因素变化一致,随生长季推移,在7月22日左右达最高值,之后又下降。茎的热值与当地水热变化呈相反趋势,这主要是受生长中期生殖器官逐渐形成,消耗大量能量的影响^[1]。看来植物各器官热值的季节动态存在一定相互消长作用。

植物干重热值随季节变化与植物的物候节律及对环境因子变化的不同反应有关。林益明等^[16-19]认为,嗜热窄布种无瓣海桑在春、夏季热值较高是因为植物在恢复生长期和生长旺期,光合作用强,有机物不断积累使干重热值较高;秋季由于温度逐渐降低,累积有机物质促使其提高干重热值增强抗寒力,因此干重热值最高;冬季低温季节,有机物质合成受阻,干重热值降至最低。而抗低温广布种秋茄,同样在春季因有机物积累而热值较高,夏季虽为旺盛生长期,但同时也逢花期,大量开花消耗了叶中运来的有机物,使热值急剧下降;秋冬季变化与无瓣海桑相似。

7 植物热值的空间动态

国外对植物热值的空间动态有较全面的研究。在阿尔卑斯山 *Saxifraga* 和 *Primula* 两属植物的研究发现,植物的脂肪含量一般随海拔高度的增加而增加^[37]。对华盛顿高山植物能量研究证实高山地区植物热值较高。Golley^[36]研究热带植物时认为热值随纬度增加而增加。Wielgolaski 等^[32]研究极地冻原植物热值也得到随纬度提高而提高的结论,这是由于纬度或海拔升高,温度降低,紫外线辐射增强,从而植物的呼吸作用减弱,其叶片组织中酶活性增强,体内非结构性碳水化合物积累的能力高于低纬度或暖地的品种,这正是高海拔或寒地植物品种以较高热值适应高寒气候的生理基础^[28,29]。Jordan^[41]综合了生态群落中不同植被类型叶片的平均干重热值后认为,植物群落的热值含量随降水量梯度降低而减少,随可利用太阳辐射梯度的降低而增

加。

国内相关研究很少,较有代表性的是林鹏等^[21]从海南琼山(19°54'N)到浙江温州(27°51'N)共选择8个样点进行秋茄的热值测定,得到干重热值含量在冬季随纬度升高而升高,其他季节则随纬度上升而下降。林益明等^[18]研究秋茄木材也发现热值随纬度上升而下降。这与 Golley 等的结论不同,他认为可能是由于 Golley 和 Wielgolaski 等采样时间的差异及用不同种类比较等因素的影响。

由表1可知,我国暖温带、南亚热带和热带的平均植物热值分别为19.71、19.42和19.22 kJ·g⁻¹,从南到北逐渐升高,与国外的多数研究结果吻合。不过,由于这是多项研究在不同时间单独得到的结果,只能在一定程度上反映大概的趋势,要得出更为精确的结论,最好能用统一的方法对各个气候带典型生态系统进行同步的研究,才能得到我国植物热值的大尺度分布格局。

小尺度上,乔木树干的垂直方向上热值也有一定的变化规律。我国东北山区主要硬阔树种黄菠萝(*Phellodendron amurense*)、水曲柳(*Fraxinus mandshurica*)从地表至5.30 m的高度,其干材热值呈上升趋势,从5.30~9.30 m高,则呈下降趋势;而胡桃楸(*Juglans mandshurica*)的干材热值在其相同高度的垂直梯度上,其变化规律则与黄菠萝、水曲柳相反^[27]。

8 植物热值的影响因素

8.1 内在因素

8.1.1 物质成分 植物体主要由木质素、纤维素、淀粉、蛋白质、脂肪等物质构成,而不同物质成分热值差异很大,脂肪达到38.9 kJ·g⁻¹,其次为木质素26.4 kJ·g⁻¹,粗蛋白23.0 kJ·g⁻¹,粗纤维和淀粉17.6 kJ·g⁻¹。所以这些物质成分含量的高低决定着植物的热值。

孙国夫等^[7]测定水稻叶片各生育期的氮素含量和热值表明,总体上二者之间无相关性,叶片氮素对热值的影响决定于叶片所处的生育期,氮素在组织中的存在状况以及氮素含量的变化而导致的其他物质组分的变化。而叶片碳素与热值之间存在极显著正相关性($r^{**} = 0.9883$),由于任何一类有机质均由碳素构成骨架,在一般植物中,碳和氧元素占干重的大部分,所以碳素含量越高,则热值可能越高。

另外,林鹏等^[22]在对和溪热带雨林的研究所

为,当植物含有挥发油或油点、特殊乳汁及芳香性物质时,其热值较高。相关报道还有,Golley^[35]发现松林群落因含较高的松脂和松节油而使其热值提高,Adamandiadou^[33]发现唇形科的迷迭香(*Rosmarinus officinalis*)有高达 $23.44 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 的热值。有关植物含特殊成分对热值的影响还需进一步深入研究。

8.1.2 灰分含量 研究表明,植物样品的灰分含量直接影响了植物干重热值,灰分含量较高的植物则干重热值较低,反之则干重热值较高^[3,12,21]。研究还发现,华安竹园竹类植物叶的干重热值和灰分含量有极显著的线性相关,相关方程为: $Y = -169.21x + 20241$, $r = 0.7370^{**}$ ($r = 0.7370 > r_{0.01(44)}$, $df = 44$)^[26]。陈佐忠等^[14]测定118种植物得到热值与灰分的回归方程如下: $y = 59.3 - 0.0113x$ ($r = 0.608$, y 为植物去灰分热值 $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$, x 灰分含量 (%))。另外,深圳福田7种红树植物中有5种红树植物叶的干重热值与灰分含量相关性不显著,而海漆(*Excoecaria agallocha*)、银叶树(*Heritiera littoralis*)两种存在极显著的线性相关,相关方程分别为 $y = -0.2404x + 20.195$ ($r = 0.997^{**}$, $n = 4$), $y = -1.1095x + 26.383$ ($r = 0.992^{**}$, $n = 4$)^[19]。但孙国夫等^[7]发现不同生育期的水稻叶片热值与灰分含量无相关性。可能原因有三点:首先因为除灰分外,热值还决定于其他物质组分;其次不同生育期叶片所含不同矿质元素含量和矿质元素所处状态不同,使灰分含量并不能精确代表矿质元素含量,也就不能准确反映组织热值的变化;另外,灰分的生成有时也伴随着一定的能量放出。

8.1.3 其他性质 除了物质成分等因素,可能植物的其他性质也对热值大小有影响。毕玉芬等^[9]研究苜蓿属植物时发现,热值与叶重/总株丛重、生长习性值(植株主茎与地面夹角 $>30^\circ$ 为1,示斜生;夹角 $>60^\circ$ 为3,示直立;夹角在 30° 和 60° 之间为2,示半直立)和叶宽等形态特征呈显著的负相关,而与茎重/总株丛重呈正相关。这方面研究少见报道,有必要进一步深入开展。

8.2 环境因素

植物热值的差异除受不同植物自身组成、结构和功能影响外,还受光照强度、日照长短、土壤类型和营养条件等诸多方面环境因素影响^[34,35,37]。

在这些环境因子中,气候影响十分显著。较多的晴天、较长的日照、较高的辐射,都有利于植物的光合作用过程和能量固定过程,因之植物热值较高。

Hadley等^[38]指出,多年生植物冬季的热值高于春夏季,高寒带地区植物的热值比热带高,高海拔地区植物高于低海拔地区^[39]。于应文等^[1]报道,不同生境下金露梅的热值不同,一般高海拔或水热条件较好处的金露梅的热值较高。在北疆地域,随着气温的升高和降水量的增大,苜蓿属植株的热值减小($R = 0.996$)。而且,土壤pH与植株热值有一定相关,pH值高的地区,植株的热值含量降低^[9]。

植物对某些极端环境的适应同样反映在热值变化上。如亚马逊地区植物叶的高热值现象是植物适应本地非常贫瘠的土壤条件,在叶子中进行了高能化合物积累的结果^[23]。刘祖祺^[6]、林鹏等^[23]的研究发现,盐胁迫条件下植物吸收多余的盐离子及进行各种生物合成作用,必须消耗大量的能量,抗盐植物为保持能量平衡,就积累能量丰富的化合物,从而表现为热值的升高,而其代价是生长的降低。但当盐胁迫超过某一阈值,植物体通过降低生长还不足以维持能量平衡时,在无外界能量物质输入的情况下,只有动用自身的能量储备,结果引起热值的下降。在冷胁迫条件下,白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)叶片的热值逐渐降低,热值可以作为这两种植物在冷胁迫下的表征指标使用^[11]。

9 结 语

植物热值反映着植物组织各种生命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,在一定程度上可以从热值的变化上反映出来^[7]。热值不仅可以作为植物生长的有效指标,其测定也是生态系统生产者亚系统能量流动研究的基本方法之一,是能量生态学研究的基础之一,对生理、栽培、育种、土壤、生态等研究有重要意义。

我国国土广袤,有完整的气候带和多样的环境,从群系的水平上可划分得到600多个生态系统类型。目前仅有十多个生态系统有过对植物热值的研究报道,所以有必要对更多的典型生态系统开展热值测定,为能量生态学研究提供基础数据,以期推动我国生态学的进一步发展。

参考文献

- [1] 于应文,胡自治,张德罡,等. 2000. 天祝金强河高寒地区金露梅的热值及其季节动态[J]. 草业科学, 17(2): 1~4.
- [2] 王得祥,雷瑞德,尚廉斌. 1999. 秦岭林区主要乔木、灌木种类能量背景值测定分析[J]. 西北林学院学报, 14(1): 54~58.

- [3] 龙瑞军,徐长林,胡自治,等.1993.天祝高山草原15种饲用灌木的热值及季节动态[J].生态学杂志,12(5):13~16.
- [4] 任海,彭少麟,刘鸿先,等.1999.鼎湖山植物群落及其主要植物的热值研究[J].植物生态学报,23(2):148~154.
- [5] 刘世荣,王文章,王明启.1992.落叶松人工林生态系统净初级生产力形成过程中的能量特征[J].植物生态学与地植物学学报,16(3):209~218.
- [6] 刘祖祺,张石城.1992.植物胁迫生理学[M].北京:中国农业出版社,232~282.
- [7] 孙国夫,郑志明,王兆骞.1993.水稻热值的动态变化研究[J].生态学杂志,12(1):1~4.
- [8] 孙雪峰,陈灵芝,徐瑞成.1997.暖温带落叶阔叶林内能量的分配组合特征[A].见:陈灵芝,黄建辉.暖温带生态系统结构与功能的研究[C].北京:科学出版社,163~172.
- [9] 毕玉芬,车伟光.2002.几种苜蓿属植物植株热值研究[J].草地学报,10(4):265~269.
- [10] 李意德,吴仲民,曾庆波,等.1996.尖峰林山地雨林主要种类能量背景值测定分析[J].植物生态学报,20(1):1~10.
- [11] 杨盛昌,李云波,林鹏.2003.冷胁迫下红树植物白骨壤和桐花树叶片热值的变化[J].台湾海峡,22(1):46~52.
- [12] 杨福国,何海菊.1983.高寒草甸地区常见植物热值的初步研究[J].植物生态学与地植物学丛刊,7(4):280~288.
- [13] 苏智先,黄焰平,牟德俊,等.1993.慈竹无性系种群能值特点及其影响能值测因子的研究[J].植物生态学与地植物学学报,17(3):273~279.
- [14] 陈佐忠,张鸿芳.1992.内蒙古典型草原地带118种植物的热值[J].草原生态系统研究,4:41~48.
- [15] 林光辉,林鹏.1988.海蓬、秋茄两种红树群落能量的研究[J].植物生态学与地植物学学报,12(1):31~38.
- [16] 林益明,林鹏.1998.华安县绿竹林能量的研究[J].厦门大学学报(自然科学版),37(6):908~914.
- [17] 林益明,林鹏,王通.2000.几种红树植物木材热值和灰分含量研究[J].应用生态学报,1(2):181~184.
- [18] 林益明,黎中宝,陈奕源.2001.福建建安竹园一些竹类植物叶的热值研究[J].植物学通报,18(3):356~362.
- [19] 林益明,柯莉娜,王湛昌,等.2002.深圳福田红树林区7种红树植物叶热值的季节变化[J].海洋学报,24(3):112~118.
- [20] 林瑞余,谢锦升,蔡丽平,等.2002.木荚红豆群落的能量现存量[J].南京林业大学学报(自然科学版),26(1):37~40.
- [21] 林鹏,林光辉.1991.几种红树植物的热值和灰分含量研究[J].植物生态学与地植物学学报,15(1):114~120.
- [22] 林鹏,邵成,郑文教.1996.福建和溪亚热带雨林优势植物叶的热值研究[J].植物生态学报,20(4):303~309.
- [23] 林鹏,王文卿.1999.盐胁迫下红树林植物秋茄(*Kandelia candel*)热值变化的研究[J].植物生态学报,23(5):466~470.
- [24] 曾启杰,王伯荪,王勇军.2003.深圳福田无瓣海桑——海桑林能量的研究[J].应用生态学报,14(2):170~174.
- [25] 祖元刚,张宏一.1986.植物热值测定的若干技术问题[J].生态学杂志,5(4):53~56.
- [26] 祖元刚.1990.能量生态学引论[M].长春:吉林科学技术出版社.
- [27] 郭明辉,张艳华.1993.天然三大硬阔林热值及其变化的研究.能量生态学——理论与方法与实践[M].长春:吉林科学技术出版社,110~115.
- [28] 韩发,贲桂英,师生波.1995.高寒草甸生态微气候和植物的生理生态反应.高寒草甸几种植物非结构性碳水化合物昼夜变化的研究[A].高寒草甸生态系统(4)[C].北京:科学出版社,35~43.
- [29] 韩发,贲桂英,师生波.1995.高寒草甸生态微气候和植物的生理生态反应.高寒草甸几种植物非结构性碳水化合物昼夜变化的研究[A].高寒草甸生态系统(4)[C].北京:科学出版社,45~51.
- [30] Bidwell RGS(刘富林译).1982.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,173~181.
- [31] Whittaker R.H.(姚壁君等译).1977.群落与生态系统[M].北京:科学出版社.
- [32] Wielgolaski FE, Kjevik S.(杨福国译).1982.芬兰斯堪的纳维亚冻原植物能量含量及太阳辐射能的利用[J].国外畜牧学—草原,(3):27~31.
- [33] Adamandiadou S.1978. Caloric content of plants dominating phrygancic (East Mediterranean) ecosystem in Greece[J]. *Flora*,167:514~584.
- [34] Bliss LC.1962. Caloric and lipid content in Alpine Tundra plants[J]. *Ecology*,43(4):753~757.
- [35] Golley FG.1961. Energy values of ecological materials[J]. *Ecology*,42(3):581~584.
- [36] Golley FG.1968. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. *Ecology*,50(3):517~519.
- [37] Hadley EB, Bliss IC. Energy relationship of alpine plants and Mt. Washington. New Hampshire Ecological[J]. *Bioenergetics*, 281~288.
- [38] Hadley NF, Tinkle DW.1975. Lizard reproductive effects: caloric estimates and comments on its evolution[J]. *Ecology*,56(3):427~434.
- [39] Howards-Williams C.1974. Nutritional quality and caloric value of Amazonian forest litter[J]. *A mazonisana*,1:67~75.
- [40] James TDW, Smith DW.1978. Seasonal changes in the caloric values of the leaves and twigs of *Papulus remuloides*[J]. *Can. J. Bot.*,56:1804~1805.
- [41] Jordan CF.1971. Productivity of a tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage[J]. *J. Ecol.*,59:127~142.
- [42] Long FL.1934. Application of calorimetric methods to ecological research[J]. *Plant Physiol.*,9(2):323~327.
- [43] Olson JS.1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems[J]. *Ecology*,44:322~331.
- [44] Ovington JD, Lawrence DB.1967. Comparative chlorophyll and energy studies of prairie, savanna, oakwood and maize field ecosystem[J]. *Ecology*,48(4):515~524.
- [45] Singh AK, Misra R, Ambasht RS.1980. Energy dynamics in a savanna ecosystem in India[J]. *Jap. J. Ecol.*,3:295~305.
- [46] Wielgolaski FE, Kjelvik S.1975. Energy content and use of solar radiation of Fennoscandian Tundra plants[A]. In: Wielgolaski FE, eds. Fennoscandian Tundra Ecosystem, Part 1: Plants and Microorganisms[C]. Berlin: Springer-Verlag, 201~207.

作者简介 官丽莉,女,1978年生,云南昆明人,在读博士研究生。主要从事生态系统生态学研究。E-mail:llguan@scib.ac.cn

责任编辑 王伟