

中国红树林天然分布北缘区不同起源秋茄热值特征研究

谭 勇¹ 李晓景¹ 何东进¹ 王 韬² 蔡金标³ 郑开基¹ 游巍斌⁴ 张中瑞¹ 肖石红¹

(1 福建农林大学林学院 2 福建省福鼎市林业局 3 福建省霞浦县林业局 4 福建农林大学生命科学学院)

摘要:在测定红树林天然分布北缘区不同起源秋茄各器官干质量热值(GCV)的基础上,分析了不同起源秋茄红树林热值器官差异和滩位差异、秋茄天然林热值的径级变化和纬度变化。结果表明:秋茄天然林各器官热值均高于人工林,且各器官能量分配趋于均等,不同起源各器官热值顺序呈现出高度一致性,高低排序依次为叶、花、枝、树墩、干、粗根、细根、中根。秋茄热值随滩位向外延伸呈现上升趋势,天然林热值对滩位的响应比人工林更为敏感。从径级差异看,大致为径级越大,热值越高,径级IV热值>径级III>径级I>径级II,另外径级变化对秋茄不同器官的影响程度不一。与其他纬度相比,红树林天然分布北缘区秋茄热值较其他纬度秋茄热值低,并且各器官间热值差异不显著。

关键词:秋茄; 不同起源; 热值; 红树林天然分布北缘区

中图分类号:S718.554 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1522(2013)06-0055-06

TAN Yong¹; LI Xiao-jing¹; HE Dong-jin¹; WANG Ren²; CAI Jin-biao³; ZHENG Kai-ji¹; YOU Wei-bin⁴; ZHANG Zhong-rui¹; XIAO Shi-hong¹. **Characteristics of caloric values of *Kandelia obovata* among different origins in north marginal region of natural mangrove, eastern China.** *Journal of Beijing Forestry University* (2013)35(6)55-60 [Ch, 35 ref.]

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, P. R. China;

2 Forestry Bureau of Fuding City, Fujian, 355200, P. R. China;

3 Forestry Bureau of Xiapu County, Fujian, 355100, P. R. China;

4 College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, 350002, P. R. China.

Based on determining the gross caloric values(GCV) of *Kandelia obovata* from different origins in north marginal region of natural mangrove wetlands, eastern China, the paper makes an analysis of the difference in caloric value among each organ and different intertidal positions of varied original *K. obovata*, and the changing law of caloric value with diameter class and latitude in natural forest. It came to conclusions that GCV among each organ of the *K. obovata* natural forests, trending to equal, was higher than that of plantation. High consistency in the order of caloric value of the various organs was emerged between natural and plantation *K. obovata*, which was leaf, flower, branch, stump, trunk, coarse root, fine root, medium root from the high to the low. Caloric value of *K. obovata* appeared upward trend with the extending outward of beach, and the trend of natural forests was more sensitive than that of plantations. In diameter class, the larger the diameter was, the higher the caloric value was(diameter IV > III > I > II). In addition, the change of diameter class made varying degrees of impact on each organ of *K. obovata*. Compared with latitudes in other region, the caloric value of natural *K. obovata* in north marginal region was lower, and also, the change of caloric value among various organs was not significant.

Key words *Kandelia obovata*; different origins; caloric value; north marginal region of natural mangrove

收稿日期: 2013-04-08 修回日期: 2013-06-05

基金项目: 福建省科技厅重点项目(2009N0009)、国家自然科学基金项目(30870435)、教育部博士学科点专项基金项目(20103515110005)、福建省自然科学基金项目(2011J01071, 2008J0116)。

第一作者: 谭勇。主要研究方向: 景观生态学与空间异质性。Email:hnty1989@163.com 地址:350002 福建省福州市仓山区上下店路15号福建农林大学林学院。

责任作者: 何东进,教授,博士生导师。主要研究方向: 景观生态学与森林生态学。Email:fjhdj1009@126.com 地址:同上。

本刊网址: <http://journal.bjfu.edu.cn>

热值指单位质量干物质在完全燃烧后所释放出来的热量值,它反映了绿色植物在光合作用中转化日光能的能力,是植物生理重要特征,也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^[1-3]。自 Long^[4]1934年首次较系统研究向日葵(*Helianthus annuus*)热值以来,对生态系统各种物种热值测定及其变化机制的研究日趋广泛^[5]。国内对热值研究起步较晚,主要从植物器官间热值差异^[6]、群落内各层次热值差异^[7]、植物热值时间动态^[8]、植物热值影响因素^[9]等方面进行探讨,鲜有涉及不同起源植物热值对比研究。过去几十年中,森林采伐、生境破碎化、气候变化、生物入侵等原因导致天然林面积以惊人的速度锐减^[10],世界各国不得不通过大面积种植人工林以应对这一问题,人工林科学种植与经营引起越来越多的关注。不同起源植物热值特征,对于了解人工林与天然林生物学特征差异,帮助植物科学种植、恢复生物多样性、维护生态系统健康都具有重要意义。

红树林是陆地向海洋过渡的特殊生态系统,具有重要的生态功能和社会经济价值^[11],其分布主要在南北纬25°之间,部分地区可达33°左右,我国红树林自然分布于海南、广东、广西、福建及台湾等地沿海滩涂浅滩。低温是限制红树林向高纬度分布的重要因子^[12],大多红树植物对寒潮、霜冻等低温天气敏感,Mcmillam^[13]指出低温严重影响红树林幼苗在海岸滩涂地的自然定着和存活。因此,从南到北,随纬度上升,温度下降,红树林组成种类逐渐减少,群落结构趋于简单^[14]。秋茄(*Kandelia obovata*)作为一种耐寒广布型红树植物^[14],是东北亚地区分布最广、纬度最靠北的一种红树植物。福建省福鼎市为中国红树林天然分布的最北缘,是我国红树林植物种类最单一,林相最矮小的地区。低温胁迫下红树林植物秋茄生态学活性变化已有报道^[15-16],也有对红树林能量生态学研究的报道^[17-22],但高纬度条件下不同起源秋茄能量生态学响应机理差异研究仍是空白。本文通过对红树林天然分布北缘区不同起源秋茄各器官热值的对比、不同滩位秋茄热值对比以及秋茄天然林不同径级热值变化分析,探讨红树林北缘区秋茄的热值特征,以期为高纬度红树天然林保护与红树人工林的种植与管理提供参考。

1 研究区概况

福鼎市位于福建省东北沿海,位于26°52'~27°26'N,119°55'~120°43'E;海域面积14 959.7 km²,海岸线曲折,长达432.7 km,港湾众多,岛屿星罗棋布;属亚热带海洋性季风气候,年均气温18.5~

19.3 °C,年均降水量1 300~2 200 mm,年均日照时长1 840 h,年均水温9.9~28.3 °C,海水盐度多年平均3.079%;湿地总面积648 km²,其中天然湿地500 km²,人工湿地148 km²;地带性植被为中亚热带常绿阔叶林,生物多样性丰富,是我国红树林天然分布最北界。福鼎市红树林种类单一,仅秋茄一种,面积为1.001 km²,共28个小斑块;造林0.165 km²未成林,分布3个小斑块,其中天然林0.56 km²,人工林0.441 km²;天然林平均高度1.71 m,平均地径26.81 cm,人工林平均高度1.80 m,平均地径11.20 cm,郁闭度均在0.7以上。1995年来,该区域多次开展了红树林湿地植被恢复试验,营造了以秋茄为主的红树林,扩大了红树林面积,通过消浪、促淤、降低风速等作用达到了保护海岸的目的^[23]。

2 研究方法

2.1 样品采集

2008年8月于福鼎市前岐秋茄天然林和点头秋茄人工林采样,在全面勘查的基础上,选择代表性的秋茄天然林与人工林各3块面积为20 m×20 m的样地,共6块。对其中乔木进行每木调查,测量胸径、树高、基径、冠幅,取其平均值,并以此标准取标准木,每个样方中随机设置5 m×5 m样方进行灌木层,记录林下死被物。调查记录经纬度、郁闭度、人为干扰状况、群落年龄等。样地基本特征见表1。由于北缘区秋茄个体矮小,其主干分级不是很明显,故利用地径来划分种群年龄结构。根据调查结果,将秋茄个体地径大小划分为4个等级(I<6 cm,6 cm<II<12 cm,12 cm<III<18 cm,IV>18 cm),每个样地在4个等级上各取1株,共24株,其中内滩8株,中滩10株,外滩6株。

2.2 测定方法与数据分析

每株按花、叶、枝、干、墩、细根、中根、粗根8个部分分别取样,其中细根(直径d<1 cm),中根(1 cm<d<2 cm),粗根(d>2 cm),及时称鲜质量后,随机取样在105 °C下烘干至恒质量,磨粉处理后过筛贮存备用。用热量计法测定其热值含量,仪器采用长沙奔特WZR-1T微电脑自动热量计。测定环境温度为20 °C左右,每次实验前用苯甲酸标定,样品热值用干质量热值(每克干物质在完全燃烧条件下所释放的总热量,简称GCV)来表示,每种样品3次重复,平行误差控制在±0.2 kJ/g,取3次测定结果的平均值。

所测数据采用Excel 2003做预处理,再运用SPSS13.0软件进行单因素方差分析。文中数据均以平均值和标准差表示。

表1 秋茄群落特征

Tab. 1 Characteristics of *K. obovata* community

样点	群落类型	经纬度	土壤类型	郁闭度/%	林龄/a	平均树高/m	平均冠幅/m	平均地径/cm	保存密度/(株·hm ⁻²)	人为干扰情况
前歧	天然林	27°16'40"N 120°17'56"E	泥质土	75	150	1.71	1.42 × 1.51	26.81	4 800	弱
点头	人工林	27°15'58"N 120°12'10"E	泥质土	93	7	1.80	1.10 × 1.10	11.20	12 000	弱

3 结果与分析

3.1 不同起源秋茄各器官热值对比

植物不同器官干质量热值直接关系到整株植物能量的分配战略,对于了解植物生长特性和环境适应性具有重要的意义^[24]。表2反映了不同起源秋茄各器官干重热值,总体来看,红树林北缘区秋茄天然林各器官 GCV 均高于人工林。其存在范围为 12 865.66 ~ 17 395.89 J/g,均值为 15 501.08 J/g;秋茄人工林各器官 GCV 均值范围为 12 284.81 ~ 17 499.22 J/g,均值为 15 175.62 J/g,表明秋茄天然林各器官热值差异比人工林小,均值则高于人工林,高出 325.64 J/g。从地上部分与地下部分的分布来看,天然林地上部分平均干质量热值高于人工林 290.2 J/g,地下部分则高出 360.71 J/g,说明天然林热值根冠比高于人工林,其原因是天然林为应对恶劣的自然环境适应,已长成蛋白质含量高的强壮根系。

秋茄天然林各器官热值大小顺序为叶(17 130.46 J/g) > 花(17 054.64 J/g) > 枝(16 685.43 J/g) > 树墩(16 137.84 J/g) > 干(15 888.66 J/g) > 粗根(14 126.89 J/g) > 中根

(13 515.35 J/g) > 细根(13 469.38 J/g);秋茄人工林各器官热值大小的顺序为叶(17 018.73 J/g) > 花(16 768.63 J/g) > 枝(16 582.89 J/g) > 树墩(16 083.61 J/g) > 干(15 228.07 J/g) > 粗根(13 931.38 J/g) > 中根(13 047.72 J/g) > 细根(12 743.89 J/g),表明不同起源秋茄林各器官热值大小顺序具有高度一致性。

方差分析显示,不同起源秋茄各器官之间热值的差异均未达到显著程度($P > 0.05$),其中天然林 $F = 0.0425, P > 0.05$,人工林 $F = 0.2758, P > 0.05$,表明不同起源秋茄林各器官间热值差异不大,这与林光辉等^[25]发现海南秋茄各器官热值存在显著差异的结论不同,说明受地区气候条件影响,北缘区秋茄红树林热值在器官分配中趋向均等。

3.2 不同滩位秋茄热值比较

滩位是一个复杂的生态因子,不仅表现在海水浸泡时间、频率,还涉及盐度、波浪、淤积等方面的内容。由图1可知,随着滩位向外延伸,秋茄热值呈现略微上升的趋势,但总体上影响未达到显著性水平($P > 0.05$);各滩位秋茄天然林热值均比人工林高,内滩、中滩、外滩分别高出 238.04、244.01、392.59 J/g,可能与秋茄起源有关。然而两组数据极差和标

表2 不同起源秋茄热值器官间对比

Tab. 2 Comparation of caloric value in each organ of different origins of *K. obovata*J·g⁻¹

植株器官	天然林		人工林	
	GCV 平均值 ± SD	GCV 范围	GCV 平均值 ± SD	GCV 范围
花	17 054.64 ± 130.08	16 852.64 ~ 17 223.93	16 768.63 ± 206.69	16 463.10 ~ 16 972.49
叶	17 130.46 ± 181.44	16 952.12 ~ 17 395.89	17 018.73 ± 323.88	16 751.90 ~ 17 499.22
枝	16 685.43 ± 97.89	16 565.25 ~ 16 848.85	16 582.89 ± 246.91	16 259.38 ~ 16 914.67
干	15 888.66 ± 270.21	15 544.92 ~ 16 236.96	15 228.07 ± 201.56	13 677.81 ~ 16 622.90
地上部分	16 689.80 ± 423.29	15 544.92 ~ 17 395.89	16 399.60 ± 763.18	13 677.81 ~ 17 499.22
树墩	16 137.84 ± 156.52	15 917.98 ~ 16 319.39	16 083.61 ± 449.09	15 295.93 ~ 16 532.35
细根	13 469.38 ± 354.71	13 012.66 ~ 14 017.27	12 743.89 ± 284.44	12 284.81 ~ 13 091.60
中根	13 515.35 ± 205.66	12 865.66 ~ 14 180.21	13 047.72 ± 257.71	12 350.15 ~ 13 819.42
粗根	14 126.89 ± 285.31	13 803.91 ~ 14 540.07	13 931.38 ± 167.18	13 036.50 ~ 14 680.39
地下部分	14 312.36 ± 1 185.54	12 865.66 ~ 16 319.39	13 951.65 ± 1 238.96	12 284.81 ~ 16 532.35
平均值	15 501.08 ± 1 492.06	12 865.66 ~ 17 395.89	15 175.62 ± 1 592.33	12 284.81 ~ 17 499.22

准差表明,天然林热值($15\ 466.11 \sim 15\ 878.10\ J/g$)对滩位变化响应比人工林($15\ 228.07 \sim 15\ 485.51\ J/g$)更敏感,说明7年生秋茄人工林对当地环境的适应性还有待提高。林鹏等^[17]研究秋茄热值随河口距离变化发现,河口距离(土壤盐度)对秋茄灰分含量的影响不明显,而热值(包括GCV和AFCV)都有略微提高的趋势,但是同纬度、季节等其他因素相比,其影响并不太明显。

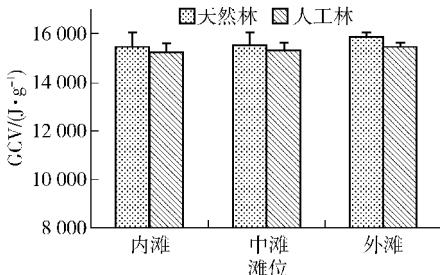


图1 不同滩位秋茄热值

Fig. 1 Caloric values of *K. obovata* at different intertidal positions

3.3 不同径级天然林秋茄热值比较

热值与树龄的关系是确定薪炭林始平期或平茬间隔期的重要依据,对生物能源研究具有重要意义^[26]。红树林为异林龄,个体大小和年龄差异很大^[27],加之福鼎市纬度较高造成秋茄林个体矮小,分丛多,外部形态很难精确测定生长年龄,生长锥钻取木芯困难,故采用地径结构代替年龄结构方法分析不同龄级秋茄不同组分热值的差异。人工林是统一栽种,地径差异不大,基于此,本文仅以天然秋茄林作为研究对象。

叶、枝和干占秋茄生物量的55.119%^[28],可以反映不同径级秋茄热值的变化规律。不同径级秋茄热值差异不是很大,未达到显著差异水平($F = 0.344, P > 0.05$),这可能与福鼎市秋茄本身个体矮小,径级差异不大有关。由图2可知,秋茄热值并没有完全随径级的增大而增加,径级I到径级II热值

呈小幅度下降,径级II到IV随径级的增大而不断增加,且各器官叶、枝和干热值随径级变化趋势呈现出高度一致性,均为径级IV>径级III>径级I>径级II。其中,干的热值变化最大,枝最稳定,说明径级变化对3个器官影响程度为干>叶>枝。

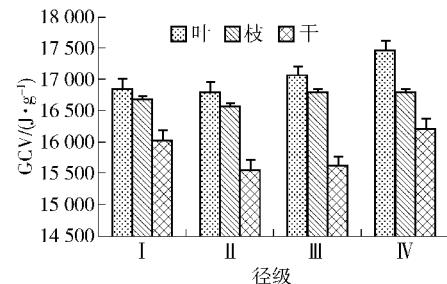


图2 不同径级天然秋茄热值

Fig. 2 Caloric values of natural *K. obovata* with different diameter classes

3.4 不同纬度秋茄热值比较

秋茄作为我国红树林自然分布最北端的主要物种,其热值较其他纬度带红树林存在一定差异,已有关于红树林热值的研究成果表明,红树林热值种间存在差异^[17,20],且单个秋茄物种热值也存在季节变化^[21-29]。为确保可比性,本文选取采样均在夏季(6月到9月)的秋茄天然林热值研究进行对比,结果见表3。从中可以发现,不同纬度秋茄热值差异不大,树叶热值范围为 $17\ 130 \sim 20\ 300\ J/g$ 之间,树干的热值范围在 $15\ 888 \sim 19\ 200$ 之间(表3),未达到显著水平($F = 2.359, P > 0.05$),说明纬度对秋茄热值的影响不显著。其中,树叶热值呈下降—上升—下降的波动变化趋势,顺序为 $22^{\circ}30'N > 24^{\circ}54'N > 1^{\circ}17'N > 19^{\circ}54'N > 27^{\circ}26'N$,树干热值呈先上升后下降到V字趋势,高低排序为 $22^{\circ}30'N > 19^{\circ}54'N > 24^{\circ}24'N > 24^{\circ}54'N > 27^{\circ}26'N$ 。总体上讲,除局部范围(广东福田)外,秋茄热值呈随纬度升高而降低趋势。

表3 不同纬度秋茄热值对比

Tab. 3 Contrast of calorific value among latitudes of natural *K. obovata*

$J \cdot g^{-1}$

	新加坡白礁 ^[17] 1°17'N	海南东寨港 ^[18] 19°54'N	广东福田 ^[29] 22°30'N	福建龙海 ^[18] 24°24'N	福建厦门 ^[19] 24°54'N	福建福鼎 27°26'N
叶	20 020	19 650	20 300		20 160	17 130
干		18 950	19 200	17 860	17 420	15 888
取样时间	8月	7—8月	6—9月	7—8月	8—12月	8月

注:为确保可比性,对所引文献中的部分资料进行了单位换算处理。

4 结论与讨论

秋茄天然林各器官平均热值较人工林大,存在

范围比人工林小,说明天然林能量转换能力优于人工林,同时,不同起源秋茄能量储存战略存在差异,天然林各器官能量分配更加均等。就地上部分与地

下部分而言,天然林热值根冠比高于人工林;表明为适应红树林北缘区恶劣的生境要求,秋茄将更多的能量储存在地下部分。不同起源各器官热值高低顺序呈现高度一致性,为叶(17 018.73 J/g)>花(16 768.63 J/g)>枝(16 685.43 J/g)>树墩(16 137.84 J/g)>干(15 888.66 J/g)>粗根(14 126.89 J/g)>细根(14 126.89 J/g)>中根(13 047.72 J/g),前人研究表明,植物各器官干物质热值的高低,与器官蛋白质、脂肪和碳水化合物含量呈明显的正相关^[30]。从植物生理学和植物解剖学角度看,叶是植物进行光合作用的场所,是植物生理活动最活跃的器官,含有较多的高能化合物,干、枝是植物体的支持器官,组成以纤维素和木质素为主,纤维素和木质素的热值相对蛋白质和脂肪低;而根部则残留了大量从土壤中吸收的氧化物和低能矿物质,灰分含量高^[31]。因此,本文与多数植物热值研究结论一致,即地上部分热值高于地下部分,其中花、叶的干质量热值较高,干、枝的热值其次,根最低。另外,由方差分析可知,与其他区域秋茄各器官间热值差异显著相比^[18,22],北缘区秋茄热值器官间差异不大。

滩位对秋茄热值的影响小于其他因素,随着滩位向外延伸,不同起源秋茄热值均呈现略微上升的趋势,但天然林热值随滩位变化的敏感程度大于人工林,说明天然林具有更强的滩位适应性。滩位主要通过盐度、淤积程度等因素而影响秋茄生态学特性。盐胁迫条件下植物吸收多余的盐离子及进行各种生命活动,须要消耗大量能量,抗盐植物为保持能量平衡,必须积累高能化合物,从而表现为抗盐植物热值的升高,其代价则是生长的降低^[32]。另外,毛子龙等^[33]发现深圳福田秋茄碳含量随滩位的淤积增加而增加,一般来讲,碳含量增加会使植物热值降低。因此,本文从侧面契合了前人研究结果。

不同径级秋茄干质量热值差异未达到显著水平($P > 0.05$),其顺序为径级IV>径级III>径级I>径级II,说明秋茄热值并没有严格按径级的增大而增加,器官叶、枝和干热值随径级变化趋势呈现出高度一致性,3个器官中,干受径级变化的影响最为显著,叶次之,枝最小。

纬度对秋茄影响不大,未达到显著水平($P > 0.05$),总体上讲,秋茄热值呈随纬度升高而降低趋势,其中树叶和树干的顺序又略有差别。林益明等^[18]对几种红树林木材热值研究发现,秋茄热值随纬度的升高而降低;Golley^[34]发现尽管局部地区因小生境的影响例外,热带植物热值存在着随纬度升高而上升的趋势;Wielgolaski^[35]在研究极地冻原时,

也认为随纬度的增加温度下降,会致使植物累积高能量的脂肪而使热值升高,这些与本文结果基本一致。另外,林光辉等^[21]研究秋茄植物叶片热值时发现,除受纬度影响外,植物热值还受季节的影响,秋茄叶热值在除冬季随纬度升高而升高外,其他季节是随纬度升高而下降。

总之,就起源而言,秋茄天然林各器官热值高于人工林,且各器官能量分配趋于均等;秋茄天然林热值对滩位变化的响应比7年生人工林敏感,表明秋茄人工林还需要长期驯化。与我国其他地区秋茄热值特征相比,红树林天然分布北缘区秋茄热值表现出以下特征,一是北缘区秋茄热值较其他纬度秋茄热值低,二是北缘区秋茄各器官间热值差异不显著,说明热值可以作为红树林抗寒性的生理指标之一。

参 考 文 献

- [1] 任海,彭少麟,刘鸿先,等.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,1999,23(2):148-154.
- [2] 官丽莉,周小勇,罗燕.我国植物热值研究综述[J].生态学杂志,2005,24(4):452-457.
- [3] 张启昌,张英楠,其其格.长白山阔叶红松林的红松种群热值[J].林业科学,2010,46(8):15-21.
- [4] LONG F L. Application of calorimetric methods to ecological research[J]. Plant Physiology,1934,9(2):323-327.
- [5] LEMENIH M, BEKELE T. Effect of age on calorific value and some mechanical properties of three *Eucalyptus* species grown in Ethiopia [J]. Biomass and Bioenergy,2004,27(3):223-232.
- [6] 康文星,熊振湘,何介南,等.会同和朱亭11年生杉木林能量积累与分配[J].生态学报,2012,32(21):6901-6908.
- [7] 旷远文,温达志,周国逸,等.鼎湖山季风常绿阔叶林各层次优势种热值研究[J].北京林业大学学报,2005,27(2):6-12.
- [8] 宁祖林,陈慧娟,王珠娜,等.几种高大禾草热值和灰分动态变化研究[J].草业学报,2010,19(2):241-247.
- [9] 龙世友,鲍雅静,李政海,等.内蒙古草原67种植物碳含量分析及与热值的关系研究[J].草业学报,2013,22(1):112-119.
- [10] ALONGI D M. Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science,2008,76: 1-13.
- [11] ZHANG F Q, WANG Y S, LOU Z P, et al. Effect of heavy metal stress on antioxidative enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorhiza*) [J]. Chemosphere,2007,67: 44-50.
- [12] 林鹏,沈瑞池,卢昌义.六种红树植物的抗寒特性研究[J].厦门大学学报:自然科学版,1994,33(2):249-252.
- [13] MCMILLAM C. Environmental factors affecting seedling establishment of the *Black mangrove* on the central Texas coast [J]. Ecology,1971,52(5): 927-930.
- [14] 杨盛昌,林鹏.潮滩红树植物抗低温适应的生态学研究[J].植物生态学报,1998,22(1):60-67.
- [15] ALLEN D J, ORT D R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants[J]. Trends Plant Sci,2001,

6: 36-42.

- [16] ASHWORTHE N, PEARCE R S. Extracellular freezing in leaves of freezing-sensitive species[J]. *Planta*, 2002, 214: 798-805.
- [17] 林鹏,林光辉.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,1991,15(2):114-120.
- [18] 林益明,林鹏,王通.几种红树植物木材热值和灰分含量的研究[J].应用生态学报,2000,11(2):181-184.
- [19] 张银龙,林鹏.九龙江口秋茄红树林根分解过程的物质和能量变化[J].南京林业大学学报,1998,22(4):47-50.
- [20] 林益明,向平,林鹏.深圳福田几种红树植物繁殖体与不同发育阶段叶片热值研究[J].海洋科学,2004,28(2):43-48.
- [21] 林光辉,林鹏.红树植物秋茄热值及其变化的研究[J].生态学报,1991,11(1):44-48.
- [22] 林鹏,范航清.九龙江口秋茄叶热值月变化的初步探究[J].科学通报,1989(4):298-300.
- [23] 何东进,郑开基,王韧,等.闽东滨海湿地不同起源秋茄林重金属元素 Zn、Cd、Cu 的累积与分布特征比较[J].福建农林大学学报:自然科学版,2012,41(2):187-192.
- [24] 何晓,包维楷,辜彬,等.中国高等植物干质量热值特点[J].生态环境,2007,16(3):973-981.
- [25] 林光辉,林鹏.海莲、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,1988,12(1):31-39.
- [26] 赵廷宁,杨维西,王冬梅,等.木本植物热值与树龄关系的研究

[J].北京林业大学学报,1992,14(3):46-53.

- [27] 温远光.广西英罗港 5 种红树植物群落的生物量和生产力[J].广西科学,1999,6(2):142-147.
- [28] 王韧,李晓景,蔡金标,等.闽东沿海秋茄天然林与人工林生物量比较[J].西南林学院学报,2010,30(1):16-20.
- [29] 林益明,柯莉娜,王湛昌,等.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,2002,24(3):112-118.
- [30] 祖元刚.能量生态系统引论[M].长春:吉林科学技术出版社,1990.
- [31] BIDWELL R G S. *Plant physiology (Volume II)* [M]. London: Macmillan Publishing, 1982: 173-181.
- [32] 廖岩,陈桂珠.盐度对红树植物影响研究[J].湿地研究,2007,5(3):266-273.
- [33] 毛子龙,杨小毛,赵振业,等.深圳福田秋茄红树林生态系统碳循环的初步研究[J].生态环境学报,2012,21(7):1189-1199.
- [34] GOLLEY F B. Caloric value of wet tropical forest vegetation[J]. Ecology, 1969, 50(3): 517-519.
- [35] WIELGOLASKI F E, KJELVIK S. Energy content and use of solar radiation of Fennoscandian Tundra plants [M]//WIELGOLASKI F E. Fennoscandian Tundra ecosystem part (I): Plant and microorganisms. Berlin: Springer Verlag, 1975: 201-207.

(责任编辑 赵 勃)