

广东湛江次生与原生红树林群落 碳储量与掉落物动态研究

卢伟志^{1,2}, 林广旋³, 王参谋¹, 王文卿¹, 杨盛昌¹, 林光辉^{2,4}

(1. 厦门大学 滨海湿地生态系统教育部重点实验室, 生命科学学院, 福建 厦门 361005; 2. 清华大学 深圳研究生院海洋科学与技术学部, 广东 深圳 518055; 3. 广东湛江国家级红树林自然保护区管理局, 广东 湛江 524044; 4. 清华大学地球系统模拟教育部重点实验室, 地球系统科学研究中心, 北京 100005)

摘要: 通过群落调查、异速生长法计算以及样品测定, 分别对2010~2011年期间广东湛江高桥红树林生态系统中次生桐花树和原生木榄群落的植物和土壤碳储量进行了计算, 并利用掉落物收集筐对掉落物动态进行了比较研究。研究表明, 高桥桐花树与木榄群落的植物碳库(以C计,下同)分别为 $(51.16 \pm 12.06) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(38.52 \pm 6.94) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 地上部分明显高于地下部分; 土壤碳库分别为 $(111.86 \pm 7.96) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(106.13 \pm 11.12) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 明显高于植物碳库; 次生与原生红树林群落的总碳库没有差异($P > 0.05$)。桐花树和木榄群落的年均掉落物产量分别为 556.00 g/m^2 和 971.13 g/m^2 , 均以凋落叶居多, 但原生木榄群落的掉落物产量明显高于次生桐花树群落($P < 0.001$)。由此可见, 次生红树林桐花树群落与原生红树林木榄群落的碳储量相当, 但均显著低于热带地区的原生红树植物群落。

关键词: 滨海湿地; 生物量; 土壤; 碳库; 群落演替

中图分类号: Q948.8 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2014)06-913-07

DOI:10.13634/j.cnki.mes.2014.06.017

Comparative studies on carbon storage and litterfall dynamics between secondary and primary mangrove communities in Zhanjiang, Guangdong Provinces, China

LU Wei-zhi^{1,2}, LIN Guang-xuan³, WANG Can-mou¹, WANG Wen-qing¹,
YANG Sheng-chang¹, LIN Guang-hui^{2,4}

(1. Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, School of Life Sciences, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 2. Division of Marine Science and Technology, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 3. Administrative Bureau of Zhanjiang National Mangrove Nature Reserve, Zhanjiang 524000, China; 4. Ministry of Education Key Laboratory for Earth System Modeling, Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Carbon pools in both biomass and soil for two dominant mangrove communities (*Aegiceras corniculatum* and *Bruguiera gymnorrhiza*) of different succession stages in Gaoqiao, Zhanjiang, Guangdong province, China were quantified using community surveys, allometric calculations and carbon content tests, while litterfall production was also determined during the same period using the litter taps. Our results showed that the carbon pool in plant biomass was $(51.16 \pm 12.06) \times 10^6 \text{ g C/hm}^2$ and $(38.52 \pm 6.94) \times 10^6 \text{ g C/hm}^2$, respectively, for the *A. corniculatum* and *B. gymnorrhiza* communities, with the aboveground biomass significantly larger than the belowground biomass. The soil carbon pool was $(111.86 \pm 7.96) \times 10^6 \text{ g C/hm}^2$ and $(106.13 \pm 11.12) \times 10^6 \text{ g C/hm}^2$, respectively, for the two mangrove communities, much larger than the carbon pools in the plant biomass. There were no significant

收稿日期: 2013-09-05, 修订日期: 2013-12-04

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(30930017); 国家海洋公益性行业科研专项经费项目(200905009 201305021)

作者简介: 卢伟志(1985-) 男, 湖南临湘人, 博士研究生, 主要从事红树林湿地生态学的研究, E-mail: weizhilu@xmu.edu.cn

通讯作者: 林光辉, 教授, E-mail: lingh@tsinghua.edu.cn

differences in the carbon pools between the secondary and primary mangrove communities ($P > 0.05$). The mean annual litterfall production for the *B. gymnorrhiza* community was 971.13 g DW/m^2 , significantly higher than that of the *A. corniculatum* community (556.00 g/m^2 , $P < 0.001$). In conclusion, the carbon pools in the secondary *A. corniculatum* community were comparable with those for the primary *B. gymnorrhiza* community, but much lower than those for the primary mangrove communities in the tropical regions.

Key words: coastal wetland; biomass; soil; carbon pool; succession

全球每年捕获的生物碳中约有 55% 是由海洋生物完成的,这部分碳被称为蓝碳^[1]。海洋高等植物主要以红树林、海草床和盐沼为主,是海洋蓝色碳汇的主力军^[2],每年捕获并储存(235 ~ 450) Tg (10^{12} g) 碳相当于全球所有交通运输部门的碳排放量的一半^[3-4]。最新研究发现滨海湿地的固碳能力是内陆泥炭湿地的 10 倍,其在持续吸收 CO_2 的同时还不会增加 CH_4 和 N_2O 等其它温室气体的排放,因此滨海湿地被认为是固碳效率最高的地区之一^[5-7]。红树林湿地作为滨海湿地高等植物的重要部分,分布于各种沉积型的海岸,据统计,全球红树林总面积为 $(1.4 \sim 1.8) \times 10^5 \text{ km}^2$, 仅占全球陆地面积的 0.1%^[8-9],但固定的碳占全球总固碳量的 5%^[8,10]。与此同时,红树林沉积速率比较快^[11],其生产力占滨海湿地总生产力的 50%^[10],高的沉积速率和生产力使得红树林湿地具有较强的固碳能力^[12]。因此准确地评估红树林生态系统的碳储量与碳动态特征,对全面理解红树林碳循环过程以及蓝碳研究极为重要。同时对群落生物量的研究,可以直接反应群落利用自然潜力的能力,是研究生态系统结构与功能的基础,在生态系统生物地球化学循环研究中具有重要的科学意义^[13-14]。

世界上关于红树林生态系统碳循环的研究逐渐增多,主要集中在对红树林碳储量和碳分配等问题上。例如 Kristensen 和 Bouillon 等通过文献综述,发现红树林初级生产力的分配主要包括掉落物、木材固碳、根系固碳、有机碳输出、沉积物埋藏与矿化等方面^[10,15],但仍有 45% 的红树林净生产力不知去向^[10]。与热带红树林相比,中国红树林有着自身的特点,其主要表现为分布于亚热带,受气候条件的限制,其物种多样性与生长状况明显低于热带红树林。同时受 60 ~ 70 年代围海造田、80 年代围塘养殖以及 90 年代以来城市化建设等干扰因素的反复影响,中国红树林遭受了很大程度的乱砍滥伐与退化,使得 80% 的现存红

树林为次生红树林,其中以桐花树群落居多^[16]。这些次生红树植物群落结构简单,有从乔木向灌木方向演替的趋势,其生产力显著下降,生物效能大大减少,生态服务功能也难以得到发挥^[16-17]。在以往的生产力与生物量研究中,研究人员往往关注原生红树植物群落如红海榄、秋茄和木榄等群落^[18-21],而忽略了次生林的生长状况,缺少次生林和原生林之间的比较研究。

本研究通过对广东湛江红树林桐花树和木榄群落植被进行调查,分别计算了植物、土壤碳储量并分析掉落物动态,比较研究了红树林桐花树群落与木榄群落的碳储量。桐花树群落在湛江红树林分布面积最广,是次生林的典型代表,而湛江的木榄林分布面积接近 300 hm^2 ,在本研究中作为原生红树林的代表。通过对两种红树植物群落的对比研究,可以阐明不同演替阶段红树林植物群落碳储量以及掉落物动态的变化。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

广东湛江红树林保护区是我国面积最大的国家级红树林自然保护区,面积达 1.9 万 km^2 ,主要保护对象为红树林生态系统,其在保护生物多样性、控制海岸侵蚀和保持水土等方面发挥了重要作用。本研究主要选择在湛江红树林保护区高桥站进行,红树林面积为 2000 hm^2 ,其中木榄林面积近 300 hm^2 ,如此大面积的木榄群落在中国实属罕见。高桥红树林生态系统群落结构复杂,群落类型多样,主要包括桐花树群落、木榄群落、红海榄群落等类型。2010 年开始,在该保护区设立气象站,利用温湿度计(HMP45C, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah)与雨量筒(TE525MM, Campbell Scientific, Inc., Logan, Utah)对气温和降雨数据进行了跟踪监测,结果如图 1。

1.2 植物群落特征调查

2009 年 10 月在高桥红树林区以观测塔为核

心,呈发散状向东南西北四个方位每隔 50 m 选择样方进行植物群落调查,每个方位 5~8 个,共计 25 个样方,样方大小均为 10 m × 10 m。调查过程中记录每棵植物的种名、相对坐标、株高、基径和胸径等生长指标,进而得到各物种的密度、平均株高、平均基径,并计算每个物种的相对多度、相对盖度、相对频度及其重要值,确定高桥红树林的优势群落。

1.3 植物碳库计算

以桐花树和木榄群落为研究对象,对生物量

与碳储量分别进行了计算。本研究中植物生物量采用异速生长法计算,计算步骤如下:(1)通过样方调查获取目标样方内每棵树的株高、基径、胸径等指标,每种群落类型各 4 个样方;(2)参照异速生长方程(见表 1),分别计算样方内每棵植株的地上和地下生物量;(3)累加样方内所有树木的地上和地下生物量获得植物总生物量;(4)按照植物含碳量为生物量的 45%,计算得到群落总植物碳库。

表 1 计算红树植物地上和地下生物量的异速生长方程

Tab. 1 Allometrical equations used to estimate mangroves aboveground and belowground biomass

物种	地上生物量	地下生物量	参考文献
桐花树	$\text{Log}W_{\text{top}} = 1.496 + 0.465\text{Log}(DBH^2 H)$	$\text{Log}W_{\text{R}} = 0.967 + 0.303\text{Log}(DBH^2 H)$	[21]
木榄	$W_{\text{top}} = 0.168 \times DBH^{2.31}$	$W_{\text{R}} = 0.0188 \times (DBH^2 H)^{0.909}$	[22-23]
秋茄	$\text{Log}W_{\text{top}} = 2.814 + 1.053\text{Log}(DBH^2 H)$	$\text{Log}W_{\text{R}} = 2.433 + 0.990\text{Log}(DBH^2 H)$	[20]
红海榄	$W_{\text{top}} = 0.2206 \times DBH^{2.4292}$	$W_{\text{R}} = 0.261 \times DBH^{1.86}$	[24-25]

式中:DBH 为胸径, H 为株高, W_{top} 与 W_{R} 分别代表地上与地下生物量。

1.4 土壤样品采集与碳库估算

2010 年 7 月采集了桐花树和木榄群落的土壤样品。样方设定与植物样方保持一致,土壤样品主要包括 0~10 cm 表层土和 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 3 个深度的土壤剖面样品。表层土用以测定盐度、pH 以及碳氮含量等土壤性质。土壤剖面样品主要通过泥炭采样器(Eijkkamp, Holland)采集,每个样方内采集 5 个 0~60 cm 深度的土壤柱,分为 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 3 个深度,相同深度的样品进行混合,带回测定土壤容重与碳含量。

土壤样品处理过程参照^[27]:(1)挑去植物残体和动物壳体后常温风干约一周;(2)60℃烘干至恒重,研磨过 60 目网筛;(3)取土壤样品(约 1 g)至于 50 mL 试管中,加入 1 N 的 HCl 溶液 5 mL,震荡摇匀后静置过夜,中间震荡数次,离心后倒掉上清液,去离子水清洗 3 遍离心后,将得到的样品在 60℃条件下烘干重新研磨过 60 目筛后即可得到有机碳样品;(4)在元素分析仪(Vario ELI-II, German)上分析有机碳含量。同时,容重样品在称量湿重后,60℃烘干至恒重记录净干重,即可计算土壤容重。根据得到的容重和土壤有机碳含量数据,计算得到土壤碳库的数据,需要指出的

是本研究受土壤采样器的限制,仅采集 0~60 cm 深土壤用以计算土壤碳库。

1.5 掉落物收集

2010 年 1 月开始,对桐花树和木榄群落的掉落物进行了收集,收集时间持续 2 a。在每个群落中设置 5 个掉落物收集筐,收集筐由不锈钢丝弯制而成,利用网孔为 1.5 mm 的纱网缝制而成,在收集筐下方设置收集口进行掉落物的收集。通过尼龙绳将收集筐挂在离地面约 1.2 m 处。由于红树林环境潮湿,掉落物分解较快,期间每半月收集一次,每次将收集到的掉落物放入 60℃烘箱烘至恒重(约 72 h)。烘干完成后,人工将树叶、枝条、花和果实区分开并称取各部分的重量,计算得到掉落物月产量。

1.6 统计分析

应用 SPSS for windows (SPSS Inc., USA) 对植物的密度、株高、基径进行单因素方差分析,计算标准偏差,且对其差异性进行检验。同时对桐花树和木榄群落的地上生物量、地下生物量、总生物量、植物碳库、土壤碳库以及表层土壤性质进行分析,计算标准偏差,且对其差异性进行 *t*-检验,采用 Sigmaplot 12.0 进行作图。

2 结果与讨论

2.1 气温与降雨

高桥红树林位于北热带向亚热带过渡区域,受季风气候和海洋气候影响较大,主要表现为气温较高,空气潮湿,冬夏差别较大。从2010年到2011年的观测数据来看,气温表现出明显的季节变化(图1)。在1~3月,气温相对较低,随后快速攀升,6~9月为炎热的夏天,日均温超过30℃,而后气温开始下降。2010和2011年,年均温分别为23.39℃和21.56℃。观测期间,最低温为3.84℃,最高温为36.98℃。同时,降雨量也表现出明显的季节动态,主要集中在6~9月,2010和2011年年降雨量分别为1266mm和1169mm(图1)。

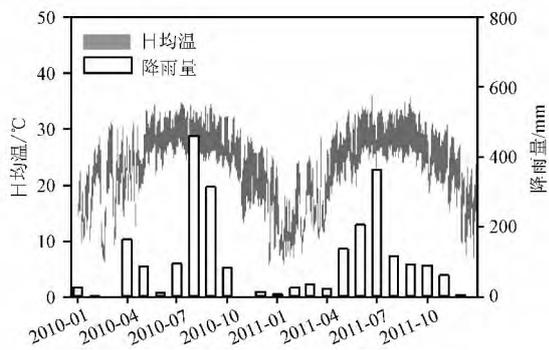


图1 高桥红树林2010年和2011年日均温范围和月降雨量
Fig. 1 Daily temperature range and monthly precipitation from January 1, 2010 to December 31, 2011 in Gaoqiao mangrove forest

2.2 群落调查结果与群落生物量

植物群落调查结果如表2所示,该红树林群落以桐花树为主,木榄次之,间有秋茄和红海榄。红树林群落冠层分布于2.3~3.1m,以秋茄最高,红海榄和木榄次之,桐花树最低,仅为2.3m(表2)。

从植物密度来看,桐花树密度最高,达到4.5棵/m²,远远高于其它物种(表2)。该地区所有树种的基径比较发现,木榄基径明显大于其它树种,达到19.7±1.8cm,而桐花树基径最小,基径平均值仅为7.2cm(表2)。以上结果可以看出,该红树林区的木榄、秋茄和红海榄株高较高且相对稀疏,树木较大,而桐花树则比较密集,但基径比较小(表2)。

桐花树与木榄群落地上生物量分别为(73.03±13.58)×10⁶g/hm²和(72.50±13.26)×10⁶g/hm²,两者没有差异(P>0.05)(图2)。地下生物量分别为(40.67±13.45)×10⁶g/hm²和(13.10±2.53)×10⁶g/hm²,两者间差异十分显著(P<0.001)(图2)。从总生物量结果比较来看,桐花树群落生物量明显高于木榄群落(P<0.001),差异主要受地下生物量影响(图2)。综合群落结构特征分析,高桥红树林中桐花树相对多度和相对盖度明显大于其它物种,重要值远远超过木榄、秋茄和红海榄,其重要值顺序为桐花树>木榄>秋茄>红海榄。桐花树作为红树植物的先锋树种,它的大量存在说明高桥红树林即使处于红树林保护区的核心区,大部分红树群落仍为次生群落,与以往研究结果类似^[16]。

表2 高桥红树林主要植被特征

Tab. 2 Key vegetation characteristics of Gaoqiao mangrove forest

群落	密度/棵·m ⁻²	株高/m	基径/cm	相对多度	相对盖度	相对频度	重要值
桐花树	4.43±2.25 ^{a*}	2.31±0.26 ^c	7.19±0.65 ^c	0.921	0.696	0.250	1.867
木榄	0.32±0.10 ^b	2.79±0.14 ^b	19.66±1.81 ^a	0.066	0.268	0.400	0.734
秋茄	0.05±0.02 ^c	3.04±0.22 ^a	13.48±0.42 ^b	0.011	0.028	0.250	0.290
红海榄	0.01±0.01 ^d	3.01±0.16 ^a	15.20±4.19 ^b	0.002	0.007	0.100	0.109

* 表内数据为平均值±标准误差,a,b与c表示不同树种间经过单因素方差分析,通过HSD检验后的具有显著性差异(P<0.05)

通过调查我们发现桐花树密度达到4.43棵/m²,是木榄群落的13.8倍,受此影响桐花树群落生物量明显高于木榄群落。尽管木榄平均基径是桐花树的2.7倍,但生物量仍然低于桐花树群落,其地下生物量的差别更加明显。桐花树群落作为

演替次生群落,其生物量积累处于快速积累期,只有当其随着演替的进行转入过渡期后,其总生物量才开始下降,而后转入稳定期,群落总生物量达到平均值,类似于木榄群落生物量积累。与以往研究相比,高桥红树林桐花树和木榄群落的生物

量明显低于热带红树林群落^[10, 28-29], 而与其它中国红树林研究相当^[22, 30]。本研究说明, 红树林演替过程生物量积累符合一般森林生态系统生物量积累模型^[31]。

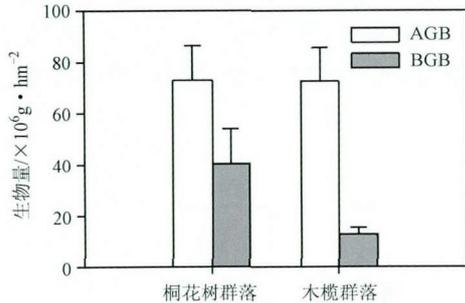


图 2 高桥红树林桐花树和木榄群落的地上 (AGB) 和地下 (BGB) 生物量

Fig. 2 Comparison in the aboveground (AGB) and below-ground (BGB) biomass between *A. corniculatum* and *B. gymnorrhiza* communities in Gaoqiao mangrove forest

2.3 群落土壤性质与土壤碳库

高桥红树林土壤性质如表 3 所示, 桐花树和木榄群落表层土的 pH、盐度和容重没有差异 ($P > 0.05$) 而表层土的有机碳、总氮含量以及碳氮比差异均显著 ($P < 0.01$) 桐花树群落的有机碳、总氮以及碳氮比明显高于木榄群落。桐花树和木

榄群落的土壤碳储量(深度为 60 cm) (以 C 计,下同) 分别为 $(111.86 \pm 7.96) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(106.13 \pm 11.12) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 两者间没有差异 ($P > 0.05$)。桐花树与木榄群落植物碳库分别为 $(51.16 \pm 12.06) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(38.52 \pm 6.94) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 两者没有差异 ($P > 0.05$)。

该结果说明桐花树表层土壤累积了较多的碳, 结合野外观察发现由于桐花树植株生长密度明显高于木榄, 能够更有效的拦截掉落物等物质、截留有机物质, 有利于有机碳的截留与固存。综合植物碳库和土壤碳库来看, 两群落总碳储量没有差异 ($P > 0.05$)。桐花树作为次生演替群落, 通过增加植物的生长密度快速进行生物量和土壤碳库的累积, 其碳库累积量与原生木榄群落相当。与热带红树林生态系统碳储量比较发现, 其总碳库是本研究的 3~8 倍^[28-29], 主要原因有如下两方面: 首先, 受气候与物种分布的影响, 中国亚热带红树林植物株高明显低于热带红树林, 在某些热带地区红树植物株高超过 10 m, 而中国红树林以次生红树林为主^[32], 株高为 2 m~5 m^[16]; 其次, 在土壤碳库计算过程中, 土壤深度直接影响了土壤碳库的计算, 在本研究中土壤碳库计算为 0~60 cm 深度, 与热带红树林碳库研究中采用的 2 m~6 m 土壤剖面存在一定的差异。

表 3 桐花树和木榄群落土壤表层土性质比较

Tab. 3 Comparison in the topsoil properties between *A. corniculatum* and *B. gymnorrhiza* communities

群落	有机碳 / (%)	总氮 / (%)	C: N	pH	S	容重 / $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$
桐花树	4.17 ± 0.15^a	0.24 ± 0.01^a	17.71 ± 0.23^a	5.60 ± 0.08^a	16.90 ± 0.78^a	0.61 ± 0.03^a
木榄	3.15 ± 0.06^b	0.21 ± 0.00^b	15.34 ± 0.49^b	5.88 ± 0.06^a	17.10 ± 0.33^a	0.68 ± 0.01^a

* 表内数据表示平均值 ± 标准误差, a 与 b 表示不同群落经过单因素方差分析, 通过 HSD 检验后的具有显著性差异 ($P < 0.05$)

2.4 桐花树和木榄群落掉落物动态

掉落物是植物生产力分配的重要组成部分, 是红树林碳循环研究中非常重要的环节^[33]。掉落物的季节变化以及物种间差别的评价, 对评估红树植物生产力分配具有非常重要的意义。高桥桐花树群落年均掉落物总量 556.00 g/m^2 (DW) (图 4 和表 4), 其中 2010 和 2011 年分别为 $548.35 \pm 82.45 \text{ g/m}^2$ (DW) 和 $563.66 \pm 63.94 \text{ g/m}^2$ (DW)。高桥木榄年均掉落物总量 971.13 g/m^2 (DW) (图 4), 2010 和 2011 年分别为 $1010.26 \pm 72.09 \text{ g/m}^2$ (DW) 和 $932.00 \pm 182.92 \text{ g/m}^2$ (DW) (表 4)。

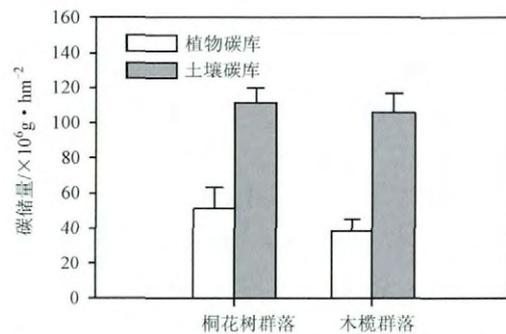


图 3 高桥红树林桐花树和木榄群落植物碳库和土壤碳库比较

Fig. 3 Comparison of plant carbon and soil carbon storage between *A. corniculatum* and *B. gymnorrhiza* communities

两个群落对比发现桐花树的掉落物产量明显低于木榄群落,仅为木榄群落的一半左右。在掉落物产量中,大部分为凋落叶,其次为繁殖体和枝条。由于受2010年虫害的影响,桐花树在2011年繁殖体数量急剧减少,由 $150.88 \text{ g/m}^2(\text{DW})$ 降低到 $7.93 \text{ g/m}^2(\text{DW})$,虫害的暴发严重的影响了桐花树繁殖体的产量,而木榄群落几乎未受到虫害的影响。研究结果显示,高

桥的桐花树和木榄掉落物均具有明显的季节动态,主要受物候因素影响,在繁殖体成熟季节出现峰值。同时台风季节,掉落物也会出现一定程度的增多,主要表现为台风破坏植物枝条导致掉落物量明显增加,其次,植物受病虫害影响,掉落物表现出明显的年际差异,例如2010年虫害暴发使得2011年桐花树的繁殖体产量急剧下降。

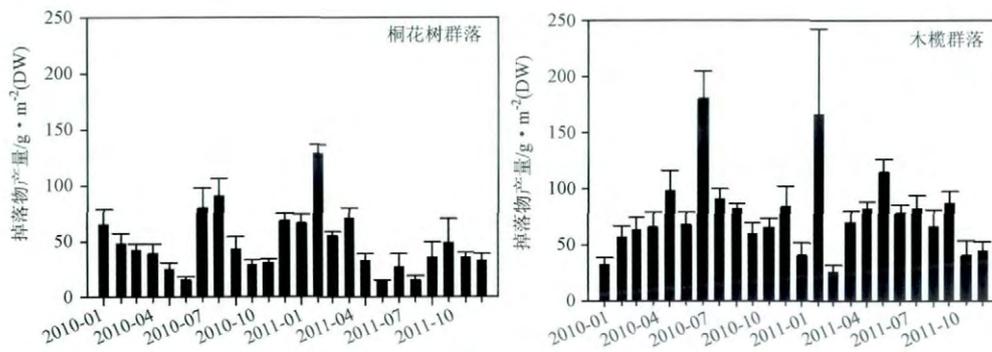


图4 高桥红树林植物群落掉落物产量的季节动态

Fig.4 Seasonal variations of litterfall production in the two plant communities of Gaoqiao mangrove forest

表4 高桥红树林桐花树和木榄掉落物各组分总量比较

Tab.4 Comparison in the production of litterfall component between *A. corniculatum* and *B. gymnorhiza* communities in Gaoqiao mangrove forest

组分	桐花树/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}(\text{DW})$		木榄/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}(\text{DW})$	
	2010	2011	2010	2011
叶	$346.08 \pm 46.31^{a*}$	422.15 ± 26.50^a	763.16 ± 52.15^a	603.77 ± 69.78^a
繁殖体	150.88 ± 39.47^b	7.93 ± 5.12^c	176.08 ± 14.60^b	280.14 ± 132.73^b
枝条	54.49 ± 7.74^c	133.57 ± 40.91^b	71.02 ± 13.70^c	48.09 ± 7.07^c
总量	548.35 ± 82.45	563.66 ± 63.94	1010.26 ± 72.09	932.00 ± 182.92

* 表内数据为平均值 ± 标准误差, a, b 与 c 表示不同组分经过单因素方差分析, 通过 HSD 检验后的具有显著性差异 ($P < 0.05$)

3 结论

(1) 高桥红树林的植物碳库: 本研究确定了高桥次生桐花树群落和原生木榄群落的总碳储量分别为 $163.02 \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $144.65 \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 两群落间没有差异 ($P > 0.05$)。其中, 桐花树与木榄群落植物碳库分别为 $(51.16 \pm 12.06) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(38.52 \pm 6.94) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$, 土壤碳库分别为 $(111.86 \pm 7.96) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 和 $(106.13 \pm 11.12) \times 10^6 \text{ g/hm}^2$ 。桐花树和木榄群落的年均掉落物产量分别为 556.00 g/m^2 和 $971.13 \text{ g/m}^2(\text{DW})$, 木榄群落的掉落物产量显著高于桐花树群落 ($P < 0.001$)。

(2) 桐花树与木榄群落的生物量和碳库比较说明 桐花树群落生物量明显高于成熟的木榄群落, 符合一般的森林生物量累积模型。但桐花树作为次生群落, 群落结构简单, 容易受到干扰的影响, 譬如在观测期内, 暴发的虫害对桐花树造成了严重的影响, 使得其次年的繁殖体急剧减少趋近于零, 这种群落的大量存在, 说明中国红树林处于急剧退化的阶段, 将会严重的影响红树林的生态系统服务功能。

致谢: 衷心感谢课题组其他成员在野外调查中给予的帮助与支持, 感谢广东湛江国家级红树林自然保护区对本研究工作的大力支持和协助!

参考文献:

- [1] NELLEMAN C, CORCORAN E, DUARTE C M, et al. Blue carbon. A Rapid Response Assessment [R]. Arendal: United Nations Environment Programme, GRID 2009.
- [2] 林鹏. 海洋高等植物生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [3] DUARTE C, MIDDELBURG J, CARACO N. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2004, 1(1): 659-679.
- [4] HOUGHTON R A. Balancing the global carbon budget [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2007, 35(1): 313-347.
- [5] BRIDGHAM S, MEGONIGAL J, KELLER J, et al. The carbon balance of North American wetlands [J]. *Wetlands*, 2006, 26(4): 889-916.
- [6] CHMURA G L, ANISFELD S C, CAHOON D R, et al. Global carbon sequestration in tidal, saline wetland soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(4): 1111.
- [7] BURDEN A, GARbutt A, EVANS C, et al. Carbon sequestration and biogeochemical cycling in a saltmarsh subject to coastal managed realignment [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2013, 120(1): 12-20.
- [8] SPALDING M, BLASCO F, FIELD C D, World mangrove atlas—The international society for mangrove ecosystems [M]. Okinawa: The International Society for Mangrove Ecosystems, 1997: 176-178.
- [9] GIRI C, OCHIENG E, TIESZEN L L, et al. Status and distribution of mangrove forests of the world using earth observation satellite data [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(1): 154-159.
- [10] BOUILLON S, BORGES A V, CASTAÑEDA-MOYA E, et al. Mangrove production and carbon sinks: A revision of global budget estimates [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(2): GB2013. doi: 10.1029/2007GB003052.
- [11] ALONGI D M, WATTAYAKORN G, PFITZNER J, et al. Organic carbon accumulation and metabolic pathways in sediments of mangrove forests in southern Thailand [J]. *Marine Geology*, 2001, 179(1/2): 85-103.
- [12] 段晓男, 王效科, 尹 毅, 等. 湿地生态系统固碳潜力研究进展 [J]. *生态环境*, 2006, 15(05): 1091-1095.
- [13] NAGELKERKEN I, BLABER S J M, BOUILLON S, et al. The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 155-185.
- [14] 方精云, 刘国华, 徐高龄. 我国森林植被的生物量和净生产量 [J]. *生态学报*, 1996, 16(5): 497-508.
- [15] KRISTENSEN E, BOUILLON S, DITTMAR T, et al. Organic carbon dynamics in mangrove ecosystems: A review [J]. *Aquatic Botany*, 2008, 89(2): 201-219.
- [16] 王文卿, 王 璠. 中国红树林 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [17] 林 鹏. 中国红树林生态学 [M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [18] 林 鹏, 卢昌义, 林光辉, 等. 九龙江口红树林研究——秋茄群落的生物量和生产力 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1985, 24(4): 508-514.
- [19] 林 鹏, 尹 毅, 卢昌义. 广西红海榄群落的生物量和生产力 [J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 1992, 31(2): 199-202.
- [20] 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(01): 16-20.
- [21] 金 川, 王金旺, 郑 坚, 等. 异速生长法计算秋茄红树林生物量 [J]. *生态学报*, 2012, 32(11): 3414-3422.
- [22] TAM N F Y, WONG Y S, LAN C Y, et al. Community structure and standing crop biomass of a mangrove forest in Futian Nature Reserve, Shenzhen, China [J]. *Hydrobiologia*, 1995, 295(1/2/3): 193-201.
- [23] CLOUGH B F, SCOTT K. Allometric relationships for estimating above-ground biomass in six mangrove species [J]. *Forest Ecology and Management*, 1989, 27(2): 117-127.
- [24] TAMAI S, IAMPA P. Establishment and growth of mangrove seedling in mangrove forests of southern Thailand [J]. *Ecological Research*, 1988, 3(3): 227-238.
- [25] FROMARD F, PUIG H, MOUGIN E, et al. Structure, above-ground biomass and dynamics of mangrove ecosystems: new data from French Guiana [J]. *Oecologia*, 1998, 115(1/2): 39-53.
- [26] COMLEY B, MCGUINNESS K. Above- and below-ground biomass, and allometry, of four common northern Australian mangroves [J]. *Australian Journal of Botany*, 2005, 53(5): 431-436.
- [27] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. (第三版). 北京: 中国农业出版社, 2005.
- [28] DONATO D C, KAUFFMAN J B, MURDIYARSO D, et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(5): 293-297.
- [29] ADAME M F, KAUFFMAN J B, MEDINA I, et al. Carbon Stocks of Tropical Coastal Wetlands within the Karstic Landscape of the Mexican Caribbean [J]. *Plos One*, 2013, 8(2): e56569. doi: 10.1371/journal.pone.0056569
- [30] 缪绅裕, 陈桂珠, 陈正桃, 等. 广东湛江保护区红树林种群生物量及其分布格局 [J]. *广西植物*, 1998(01): 20-24.
- [31] BORMANN F H, LIKENS G E. Pattern and process in a forested ecosystem [M]. New York: Springer, 1979: 253
- [32] CHEN L, WANG W, ZHANG Y, et al. Recent progresses in mangrove conservation, restoration and research in China [J]. *Journal of Plant Ecology-UK*, 2009, 2(2): 45-54.
- [33] KATHIRESAN K, BINGHAM B L. Biology of mangroves and mangrove ecosystems [J]. *Advances in Marine Biology*, 2001, 40: 81-251.