

人工生境条件下几种红树植物的净初级生产力比较研究*

彭友贵^{1,2} 陈桂珠^{1**} 武鹏飞¹ 缪绅裕³ 殷敏¹ 余忠明⁴

(¹ 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; ² 西南林学院, 昆明 650224; ³ 广州大学生物与化学工程学院, 广州 510032;

⁴ 深圳海上田园旅游发展有限公司, 深圳 518104)

【摘要】 选择3种红树植物海桑(*Sonneratia caseolaris*)、秋茄(*Kandelia candel*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*), 每种分别按45%、30%和15%的面积比例种植于滩涂海水养殖塘。种植后连续2年对红树植物进行生态监测。结果表明, 海桑增高457.0 cm, 基径增加86.1 mm, 成活率92.9%; 桐花树高、基径分别增长26.1 cm和36.5 mm, 成活率93.9%; 秋茄成活率44.7%, 增高20.4 cm、基径增加26.4 mm, 说明在不受自然潮汐影响的人工生境条件下, 海桑和桐花树对环境的适应能力强, 生长较好, 秋茄的生长适应性较差。据不同时期树高、基径与干、枝、叶、根的生物量, 求得植物各器官生物量与树高、基径的回归方程, 分析了3种红树植物的生物量与净初级生产力。海桑单位面积生物量5 597.8 g·m⁻², 桐花树962.5 g·m⁻², 秋茄66.0 g·m⁻²。生物量在植物各器官的分配按大小排序, 海桑为树干>树枝>树根>树叶; 桐花树为树叶>树枝>树干>树根; 秋茄为树干>树根>树叶>树枝。单位面积净初级生产力海桑为7 051.5 g·m⁻², 桐花树1 105.8 g·m⁻², 秋茄93.0 g·m⁻²。高生产力伴随高归还量, 凋落物归还量占净初级生产力的比重为海桑20.5%、桐花树15.4%、秋茄7.6%。

关键词 红树林 生物量 净初级生产力

文章编号 1001-9332(2005)08-1383-06 **中图分类号** Q948.12; S931.3 **文献标识码** A

Net primary productivity of several mangrove species under controlled habitats. PENG Yougui^{1,2}, CHEN Guizhu¹, WU Pengfei¹, MIAO Shenyu³, YIN Min¹, SHE Zhongming⁴ (¹ School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; ² Southwest Forestry College, Kunming 650224, China; ³ School of Biology and Chemistry Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510032, China; ⁴ Shenzhen Waterlands Tourism Development Ltd., Shenzhen 518104, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2005, 16(8): 1383~1388.

Three mangrove species *Sonneratia caseolaris*, *Kandelia candel* and *Aegiceras corniculatum* were planted in different fishponds in April 2002 with three planting—breeding area proportions of 45:55, 30:70 and 15:85, respectively, and the growth of test mangrove plants were surveyed during 2 years after planting. The results showed that *S. caseolaris* and *A. corniculatum* could grow well in the coupling system, while *K. candel* could not. The survival percentage of *S. caseolaris*, *K. candel* and *A. corniculatum* was 92.9%, 93.9% and 44.7%, respectively. During the 2 years, the height of *S. caseolaris* increased 457.0 cm, and its basal diameter increased from 12.6 mm to 98.7 mm. *A. corniculatum* had an increment of 26.1 cm in height and 36.5 mm in basal diameter, while *K. candel* only had an increment of 20.4 cm in height and 26.4 mm in basal diameter. Based on the height, basal diameter, and biomass of trunk, branch, leaf and root, regressive equations of the four organs' biomass were obtained, and the whole biomass of standing trees in the coupling system was calculated. The average biomass of *S. caseolaris* was 5 597.8 g·m⁻² in April 2004, being increased 5 559.5 g·m⁻² in 2 years. At the same period, the standing biomass of *A. corniculatum* and *K. candel* was 962.5 g·m⁻² and 66.0 g·m⁻², with an increase of 932.7 g·m⁻² and 57.0 g·m⁻², respectively. The biomass of plant organs was in the order of stem > branch > root > leaf for *S. caseolaris*, leaf > branch > stem > root for *A. corniculatum*, and stem > root > leaf > branch for *K. candel*. The litter fall production of mangrove plants in 2 years was 1 149.2 g·m⁻², 170.8 g·m⁻² and 7.1 g·m⁻² for *S. caseolaris*, *A. corniculatum* and *K. candel*, respectively. Leaf litter took up more than half of the whole litter fall. From April 2002 to April 2004, the net primary production of *S. caseolaris*, *A. corniculatum* and *K. candel* was 7 048.9 g·m⁻², 1 105.9 g·m⁻² and 93.0 g·m⁻², respectively. The litter fall production occupied 20.5% of the net primary production for *S. caseolaris*, 15.4% for *A. corniculatum*, and 7.6% for *K. candel*, which meant that high productivity was accompanied by high return rate.

Key words Mangrove, Biomass, Net primary productivity.

1 引 言

随着人类对水产品需求的不断增长, 水产养殖

* 国家“863”计划资助项目(2003AA627030)。

** 通讯联系人. E-mail: chenguizhu@yeah.net

2004-09-04 收稿, 2005-02-02 接受。

业发展迅速,1984年以来年均递增11%^[5],成为世界粮食经济发展最快的部分^[12].在水产养殖业快速发展的同时,许多问题也逐渐显露并日益突出,其中养殖水环境污染已成为制约水产养殖业持续健康发展的最严重问题^[10,24],水产养殖所产生的营养盐污染又是引起河流、湖泊、近岸海域富营养化和诱发赤潮的重要因素^[33].因此,如何净化养殖水体、改善养殖水环境、保证养殖系统的生态安全、减轻养殖废水排放造成的环境污染成为全球广泛关注和研究的热点,其中生物净化技术研究特别是利用经济价值高的植物对污染水域进行净化修复是亟待研究的重要课题^[17,23,28].

红树林是生长在热带、亚热带海岸潮间带的木本植物群落.大量研究^[2-4,7,8,12,19,27,30]表明,红树林具有显著的水质净化效果,发达的根系能吸收水中的氮、磷及重金属,过滤陆地径流和内陆带出的污染物;同时为鱼、虾、蟹、贝类等海洋动物提供栖息、繁殖、觅食的理想生境和食物来源^[13].国外利用自然红树林沼泽发展水产养殖显示出良好效益^[1,29].但在水产养殖系统中人工引入红树植物,其净化作用未见报道.本研究通过人工构建红树林滩涂海水种植-养殖系统,进行系统中红树植物生态监测,了解红树植物的生长适应性与净初级生产力,揭示其在幼龄阶段的生长特性,为进一步研究红树植物对养殖水体的净化效应提供依据和研究基础.

2 研究地区与研究方法

2.1 自然概况

研究地位于深圳市宝安区沙井镇深圳海上田园旅游区的养殖区(113°45'53" E, 22°43'14.4" N).该地区濒临珠江口东海岸,滩涂资源丰富,从东北向西南每隔2~3 km有一条河涌流入大海,成片鱼塘分布于河涌之间.属南亚热带海洋季风气候,全年温和暖湿,雨量充沛,年均气温24℃,多年平均降雨量1875 mm.

2.2 研究方法

2.2.1 种植-养殖系统的构建 选取位于2、3号涌之间同一水平面的34.0 hm²连片平整鱼塘,鱼塘与河涌由围堤相隔,涨潮时(平均高潮位珠基2.40 m,平均低潮位珠基1.04 m)海水进入河涌,并通过水闸控制流入或流出鱼塘.鱼塘被分隔设置为9个试验塘(图1),试验塘中构筑红树林种植岛,种植岛高0.8 m,种植岛面积占试验塘面积的比例为45%、30%和15%各3个.每个试验塘种植一种红树植物,分别为华南红树优势种秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和速生种海桑(*Sonneratia caseolaris*).2002年3月于种植岛内种植,规格1 m×1 m.4月开闸进水,各塘水位一致,淹至红树植物种植岛泥面.养殖期间,水位保持不变.

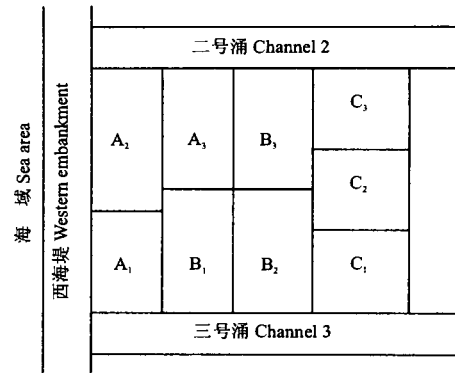


图1 红树林滩涂海水种植-养殖系统示意图

Fig. 1 Sketch map of mangrove planting-aquaculture system.

A:海桑 *S. caseolaris* (1)45%, 3.3 hm²; 2)30%, 3.7 hm²; 3)15%, 3.3 hm²; B:秋茄 *K. candel* (1)45%, 3.7 hm²; 2)30%, 4.3 hm²; 3)15%, 4.0 hm²; C:桐花树 *A. corniculatum* (1)45%, 4.0 hm²; 2)30%, 3.3 hm²; 3)15%, 4.4 hm².

2.2.2 红树植物生长监测 在每个试验塘设置3个5 m×5 m的固定样方,每3个月监测一次红树植物的树高、基径、成活率等生长指标,估算各塘红树植物的平均高度、平均基径以及单位面积成活株数.

2.2.3 红树植物生物量测定 选取标准木进行全株各器官(干、枝、叶、根)生物量实测,建立各器官生物量与树高、基径的回归模型,将调查数据代入模型,估算不同时期单株、单位面积各器官生物量与总生物量.标准木于2003年4月和11月按径级分两次选取,每种树选12株,测树高、基径,连根挖出,分干、枝、叶、根按“分层切割法”^[18,21]测定各器官鲜重,随即取样105℃烘干至恒重,求出含水率,将各器官鲜重换算成干重.全株生物量为各器官生物量之和.种植时苗木生物量通过随机抽取同批苗木另建生物量与苗木高、基径的回归方程求得.

凋落物生物量采用收集网法测定^[25,31].每个试验塘设置3个凋落物收集网,网口面积1 m×1 m,深20 cm,孔径2 mm.收集网用竹竿固定在离泥面一定高度,并随植物生长不断调整,以保证凋落物收集完全.凋落物每月收集一次,按叶、枝、花果烘干至恒重.

2.2.4 净初级生产力计算 净初级生产力按下列公式计算^[9,21]:

$$P = \Delta B + L + G + S$$

式中, P 为净初级生产力, ΔB 为生长量, L 为凋落量, G 为动物采食量, S 为溢泌物质量.在本种植-养殖系统中, G 和 S 均很小且难以有效测定,故忽略不计. ΔB 可按下式求得:

$$\Delta B = B_2 - B_1 + B_d$$

式中, B_1 为期初生物量, B_2 为期末生物量, B_d 为监测期间枯死木生物量.

3 结果与分析

3.1 红树植物的生长适应性

从表1可以看出,种植2年后海桑和桐花树的

成活率较高,保持在 90% 以上,秋茄成活率不足 50%,说明在非自然潮汐环境下,秋茄的生长适应性差,特别是长期受到养殖海水浸淹时死亡率高。3 种红树植物的生长速度差别较大,海桑最快,桐花树次之,秋茄最慢。海桑的高生长是秋茄的 22.3 倍、桐花树的 17.5 倍,径生长分别为秋茄和桐花树的 3.3 倍和 2.4 倍。3 种红树植物表现出不同的生长季节特征(图 2)。海桑夏(5~7 月)、秋(8~10 月)季生长最旺,期间株高、基径增长量分别占各自增长总量的 77.9% 和 70.5%,两季生长速度基本相等。

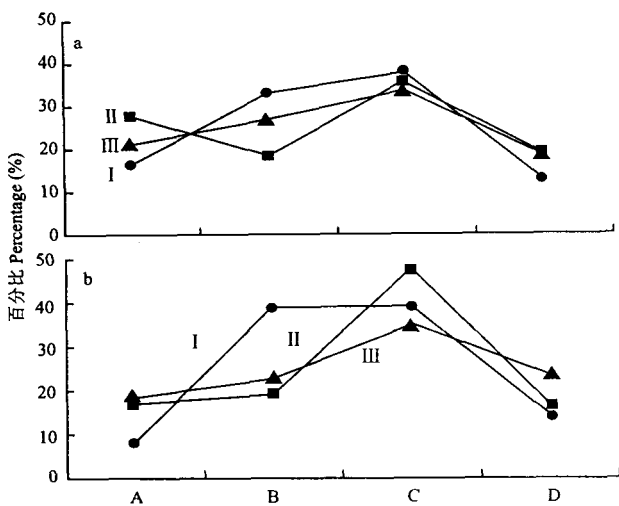


图 2 红树植物树高(a)、基径(b)季生长量占年生长总量的百分比
Fig.2 Percentage of seasonal growth of mangrove plants' height (a), basal diameter (b) to annual growth.
A: 春 Spring; B: 夏 Summer; C: 秋 Autumn; D: 冬 Winter; I. 海桑 *S. caseolaris*, II. 秋茄 *K. candel*, III. 桐花树 *A. corniculatum*. 下同
The same below.

秋茄和桐花树的树高、径生长以秋季最快,其他季节差异不显著。在春(2~4 月)、冬(11~翌年 1 月)季,海桑的相对生长速度低于秋茄和桐花树。三种红树植物生长的季节性差异可能是由其不同的耐寒性决定的。秋茄是红树林中最抗寒的树种,可分布至北纬 32°^[14],桐花树也是红树林中的耐寒树种,均适应研究区气候条件,冬季仍能生长。海桑属嗜热树种,在我国天然分布于海南文昌清澜港以南^[26],20 世纪 90 年代引种到广东。海桑对寒冷气候敏感,冬季气温低,生长受到抑制。

海桑是红树林中的速生丰产乔木树种,树高一般 10 m 左右^[26]。本研究基地种植的海桑 3 年生树高达到 558 cm,与深圳福田 5 年生和海南东寨港 6 年生树高相差不远(表 2)。比较本试验区与其他地区不同年龄阶段以及海桑成熟林的一般高度可以看出,幼龄阶段对海桑的高生长贡献最大,其中 3 年生

树高可达成熟龄时的一半,平均年增高 160~186 cm。

表 1 3 种红树植物的生长变化

Table 1 Changes in growth of three mangrove species (2002.04~2004.04)

种类 Species	成活率 Survival percentage (%)	高度 Height (cm)		基径 Basal diameter (mm)	
		平均 Average	增量 Increase	平均 Average	增量 Increase
海桑 <i>S. caseolaris</i>	92.9	558.0	457.0	98.7	86.1
秋茄 <i>K. candel</i>	44.7	55.2	20.4	31.2	26.4
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	93.9	109.9	26.1	46.3	36.5

表 2 不同地点和年龄阶段的海桑生长比较

Table 2 Comparison of growth among *S. caseolaris* of different ages

地点 Places	树龄 Age (yr)	平均树高 Av. height (cm)	树高年均增长 Annual increase (cm)	平均基径 Av. basal d. (mm)
本试验区 Coupling system	3	558	186	98.7
汕头新溪 ^[6] Xinxu, Shantou	3	480	160	170.0
深圳福田 ^[31] Futian, Shenzhen	5	660	132	185.8
海南东寨港 ^[6] Dongzhai Bay, Hainan	6	670	112	150.0
深圳福田 ^[32] Futian, Shenzhen	6.5	806	124	214.4

3.2 生物量回归分析

依据标准木的树高、基径、各器官生物量及总生物量的实测值计算,选择生物量与树高、基径的回归模型。经计算分析,选择回归模型为:

$$W = a(D^2H)^b$$

式中, W 为生物量(g); D 为基径(mm); H 为树高(cm); a 、 b 为参数。

利用该回归模型求得海桑、秋茄、桐花树苗木的总生物量(W_t)与苗高、基径的回归方程以及各器官生物量与树高、基径的回归方程(表 3)。回归方程的相关性极显著($P < 0.01$),表明按此计算的生物量能较好反映实际情况。

表 3 生物量回归方程

Table 3 Regressive equation of biomass

种类 Species	苗木/器官 Seedling/ organ	回归方程 Regressive equation	相关系数 Correlation coefficient
海桑 <i>S. caseolaris</i>	苗木 Seedling	$W_t = 0.001888(D^2H)^{1.0234}$	0.9998
	干 Trunk	$W_{tr} = 0.002948(D^2H)^{0.9011}$	0.9955
	枝 Branch	$W_{br} = 0.003189(D^2H)^{0.8505}$	0.9786
	叶 Leaf	$W_{lf} = 0.002773(D^2H)^{0.754}$	0.9081
秋茄 <i>K. candel</i>	根 Root	$W_{rt} = 0.028774(D^2H)^{0.6316}$	0.9655
	苗木 Seedling	$W_t = 0.138484(D^2H)^{0.6217}$	0.9977
	干 Trunk	$W_{tr} = 0.003857(D^2H)^{0.8945}$	0.9884
	枝 Branch	$W_{br} = 8.943 \times 10^{-6}(D^2H)^{1.3462}$	0.9472
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	叶 Leaf	$W_{lf} = 8.1658 \times 10^{-4}(D^2H)^{0.9444}$	0.9624
	根 Root	$W_{rt} = 5.9814 \times 10^{-4}(D^2H)^{1.0046}$	0.9116
	苗木 Seedling	$W_t = 0.021174(D^2H)^{0.8068}$	0.9969
	干 Trunk	$W_{tr} = 3.8592 \times 10^{-4}(D^2H)^{1.0791}$	0.9629
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	枝 Branch	$W_{br} = 3.35 \times 10^{-7}(D^2H)^{1.6587}$	0.9368
	叶 Leaf	$W_{lf} = 1.606 \times 10^{-6}(D^2H)^{1.5439}$	0.9283
	根 Root	$W_{rt} = 6.977 \times 10^{-6}(D^2H)^{1.3826}$	0.9729

3.3 红树植物的生物量及其分配

各试验塘红树植物单位种植面积生物量以海桑最高, 种植2年后平均达到 $5\,597.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 比种植时的 $38.3\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 增长了145倍; 桐花树次之, 达到 $962.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 增长了31倍; 秋茄最少, 只有 $66.0\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$, 仅为种植时的7.3倍。

生物量在植物各器官的分配依树种不同差异较大(表4)。海桑各器官生物量的分配顺序为: 树干 > 树枝 > 树根 > 树叶, 其中树干生物量占总生物量一半以上; 秋茄各器官生物量的分配顺序为: 树干 > 树根 > 树叶 > 树枝; 而桐花树生物量的分配则以叶为最

表4 红树植物各器官生物量及所占比例(2004.04)

树种 Species	项目 Items	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	总生物量 Total biomass
海桑	生物量 Biomass	3220.3	1588.5	309.0	480.1	5597.8
<i>S. caseolaris</i>	%	57.5	28.4	5.5	8.6	100
秋茄	生物量 Biomass	29.9	9.8	10.9	15.5	66.0
<i>K. candell</i>	%	45.2	14.8	16.6	23.4	100
桐花树	生物量 Biomass	228.1	258.8	299.2	176.4	962.5
<i>A. corniculatum</i>	%	23.7	26.9	31.1	18.3	100

表5 红树植物各器官生物量的分配比较

Table 5 Comparison of biomass distribution among organs of mangrove trees in different places (%)

种类 Species	地点 Places	树龄 Age (yr)	密度 Density ($\text{ind}\cdot\text{hm}^{-2}$)	树干 Trunk	树枝 Branch	树叶 Leaf	树根 Root	其他 Others
海桑	深圳福田 ^[31]	5	776	29.9	34.8	4.3	27.2	3.8
<i>S. caseolaris</i>	Futian, Shenzhen							
秋茄	福建九龙江口 ^[15]	20	20800	43.5	10.0	3.6	42.6	0.3
<i>K. candell</i>	Jiulongjiang Estuary, Fujian							
	广东湛江 ^[20]	5	3900	40.4	8.2	7.9	41.3	2.2
	Zhanjiang, Guangdong							
	深圳福田 ^[31]	6	5050	28.3	20.7	8.4	42.1	0.8
	Futian, Shenzhen							
桐花树	广东湛江 ^[20]	5	20000	47.0	11.6	5.1	36.3	0
<i>A. corniculatum</i>	Zhanjiang, Guangdong							
	广西龙门岛群 ^[22]	5	220000	68.1	18.4	13.5	-	-
	Longmen islets, Guangxi							

* 深圳福田海桑林的种群密度包括无瓣海桑 Density of the community in Futian, Shenzhen City included *S. caseolaris* and *S. apetala*.

3.4 凋落物生物量

凋落物生物量是衡量生态系统物质循环的重要指标。本系统红树植物3月份种植, 7月份开始有凋落物产生。种植2年后单位种植面积凋落物生物量累计为海桑 $1\,449.2\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、秋茄 $7.1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 、桐花树 $170.8\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。海桑的单位面积凋落物生物量分别是秋茄的203倍和桐花树的8.5倍。这与3种红树植物的留存生物量相一致, 说明高生长量伴随高归还量。从凋落物的组成来看, 均以叶为主, 落叶占海桑凋落物总量的88.2%, 落枝占7.3%, 另4.5%为落花、落果; 而桐花树的落花、落果占凋落物总量的比重较大, 达到28.1%, 其余为落叶。秋茄的凋落物为落叶。

多, 余下依次为树枝、树干和树根, 各器官生物量的分配差异较小, 最大与最小仅差12.8%。

本种植-养殖系统红树植物生物量分配与前人的研究结果不尽一致(表5), 其中海桑、桐花树的研究结果不同, 可能与群落密度有较大关系。当群落密度超过植株自由生长所需空间时, 在一定程度上会促进个体向上生长, 抑制侧向生长, 即树干高生长快于树枝和径生长。本系统海桑的种植密度大, 现存单位面积株数是深圳福田的12倍, 与之相比, 本系统海桑的树干生物量比重较大, 而树枝生物量则相对较少。桐花树是高1~4m的灌木或小乔木, 自然分布的桐花树多为丛生, 密度较大。广东湛江、广西龙门岛群的桐花树天然林密度是本系统的2~22倍, 其树干生物量所占比重比本系统的大, 而本系统的枝叶生物量高。另外, 本系统桐花树为人工种植于滩涂养殖塘, 较好的养分条件促进其生长快速, 枝叶繁茂, 也是其枝叶生物量高的原因之一。秋茄生物量分配的差异, 是受生境还是其他因素影响, 有待于进一步观察研究。此外, 在不同生长阶段植物生物量在各器官的分配也会发生变化。

植物的不同生长特性与物候节律使凋落物的产生具有明显的季节性。在本系统中, 3种红树植物的凋落物季节变化差异较大(图3)。海桑凋落物为冬季最多, 春季次之, 夏季最少。这主要是因为受低温影响, 冬季树叶大量脱落, 许多嫩枝受冻枯死; 春季受冻枯死的叶、枝继续脱落, 且主要集中在2、3月份, 4月份的凋落物量只占春季凋落物总量的9.2%。秋茄的凋落物量为: 秋季 > 夏季 > 冬季 > 春季。这与郑逢中等^[34]对福建九龙江口20~30年生秋茄红树林凋落物的研究结果(夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季)不同, 可能是由于两地的气候差异; 或者本系统的秋茄尚处于幼龄阶段, 其变化规律与成熟林有别; 或者源于其他因素影响, 还有待于研究。桐花

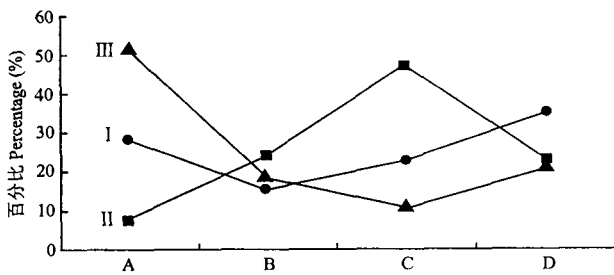


图3 红树植物季凋落量占年凋落总量的百分比

Fig.3 Percentage of seasonal production of mangrove litter fall to annual production.

树的凋落物量正好与秋茄相反:春季>冬季>夏季>秋季,其中春季凋落物量占了凋落物总量的51.2%,主要是因为2~3月份是桐花树的花季,落花占了春季凋落物总量的55%。

3.5 红树植物的净初级生产力

监测期间红树植物的净初级生产力见表6。海桑的单位面积净初级生产力最高,是桐花树的6.4倍、秋茄的75.8倍。海桑生产力高,其中凋落物归还量占的比重也较大,为20.5%;桐花树为15.4%;秋茄7.6%。海桑和秋茄的凋落物归还率分别比深圳福田5年生海桑^[31]和福建九龙江口20年生秋茄^[15]低16.4%和28.7%,说明随着林龄的增长,红树植物的归还速度加快,生长减缓。

表6 种植-养殖系统红树植物净初级生产力(2002.04~2004.04)
Table 6 Net primary production (NPP) of mangrove plants in planting-aquaculture system

项目 Item	海桑 <i>S. caseolaris</i>	秋茄 <i>K. candell</i>	桐花树 <i>A. corniculatum</i>
生长量 Biomass increase(g·m ⁻²)	5602.2	85.9	935.0
凋落量 Litter fall production (g·m ⁻²)	1449.2	7.1	170.8
单位面积净初级生产力 Unit NPP (g·m ⁻²)	7051.5	93.0	1105.8

4 结 论

4.1 滩涂海水种植-养殖人工系统中,水位不受潮汐变化影响,红树植物海桑和桐花树能适应环境正常生长,而秋茄生长适应性较差,成活率低。种植泥面的浸水深度和浸淹时间长短是影响红树植物生长的重要因素。

4.2 3种红树植物具有不同的生长特性。海桑生长最快,桐花树次之,秋茄最慢。海桑生长主要集中在夏、秋季,秋茄和桐花树以秋季生长最快,其他季节差异不显著。海桑的高生长在幼龄时期贡献最大,其中3年生树高即可达成熟林的一半。为保证海桑生长所需合理营养空间,种植密度应控制在1000~

1500株·hm⁻²。

4.3 回归模型 $W = a(D^2H)^b$ 反映红树植物生物量与树高、基径极显著相关。单位面积生物量为海桑>桐花树>秋茄。生物量在植物各器官的分配,海桑和秋茄以树干所占比重最大,桐花树以叶最多。

4.4 单位面积净初级生产力海桑最高,桐花树次之,秋茄最低。高生产力伴随高归还量,凋落物归还量占净初级生产力的比重依次为海桑>桐花树>秋茄。随着树龄的增长,凋落物归还量比重增大。

参考文献

- 1 Body CE, Clay JW. 1998. Shrimp farming and environment. *Sci Amer*, 9:15~23(in Chinese)
- 2 Boto KG. 1992. Nutrients and mangroves. In: Connel DW, eds. Pollution in Tropical Aquatic Systems. London: CRC Press Inc. 129~145.
- 3 Chen G-Z(陈桂珠), Chen G-K(陈桂葵), Tan F-Y(谭凤仪), et al. 2000. Purifying effects of *Avicennia marina* simulated wetland system on sewage. *Mar Environ Sci* (海洋环境科学), 19(4): 23~26(in Chinese)
- 4 Chen G-Z(陈桂珠), Miao S-Y(缪绅裕), Huang Y-S(黄玉山), et al. 1996. Allocation, cycle and purified effects of nutrient pollutant N in artificial wastewater in simulated *Kandelia candel* wetland system. *Acta Sci Circ* (环境科学学报), 16(1): 44~50(in Chinese)
- 5 Chen Q-F(程启芬), Yu L-L(俞兰苓). 2001. Development trend of world aquaculture and aquatic feedstuff. *Feed Res* (饲料研究), 11:25~26(in Chinese)
- 6 Chen Y-H(陈远合), Zhan C-A(詹潮安), Cai Y-H(蔡乙辉), et al. 2004. Study on introduction of mangrove *Sonneratia caseolaris* in the seashore in Shantou. *Prot For Sci Technol* (防护林科技), 2: 18~21(in Chinese)
- 7 Chu HY, Chen NC, Yeung MC, et al. 1998. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater. *Wat Sci Technol*, 38(1): 361~368
- 8 Clough BF, Boto KG, Atiwill PM. 1983. Mangroves and sewage: A reevaluation. In: Teas HJ, ed. Biology and Ecology of Mangroves. Tasks for Vegetation Science Series, Vol.8. Lancaster: Dr. W. Junk Publishers. 151~162.
- 9 Coombs J, Hall DO, Long SP, et al. 1985. Trans. Qiu G-X(邱国雄), et al. 1986. Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis (2nd ed.). Beijing: Science Press. 1~20(in Chinese)
- 10 Cui Y(崔毅), Chen B-J(陈碧娟), Chen J-F(陈聚法). 2005. Evaluation on self-pollution of marine culture in the Yellow Sea and Bohai Sea. *Chin J A ppl Ecol* (应用生态学报), 16(1): 180~185(in Chinese)
- 11 Liao B-Y(廖宝文), Zheng D-Z(郑德璋), Li Y(李云), et al. 1999. Above-ground biomass and nutrient accumulation and distribution in different types of *Sonneratia caseolaris*-*Kandelia candel* mangrove plantations. *Chin J Appl Ecol* (应用生态学报), 10(1): 11~15(in Chinese)
- 12 Li K-M(李康民). 2002. Prospects of world aquaculture in following 10 years. *Sci Fish Farming* (科学养鱼), 2:18(in Chinese)
- 13 Li MS. 1997. Nutrient dynamics of a Futian mangrove forest in Shenzhen, South China. *Estuar Coast Shelf S*, 45:463~472
- 14 Lin P(林鹏). 1997. Mangrove Ecosystem in China. Beijing: Science Press. 115~340(in Chinese)
- 15 Lin P(林鹏), Fu Q(傅勤). 1995. Environmental Ecology and Economic Utilization of Mangroves in China. Beijing: Higher Education Press. 7~10(in Chinese)
- 16 Lin P(林鹏), Lu C-Y(卢昌义), Lin G-H(林光辉), et al. 1985. Study on mangrove ecosystem of Jiulongjiang River Estuary in China I. The biomass and productivity of *Kandelia candel* community. *J Xiamen Univ* (Nat Sci) (厦门大学学报·自然科学

- 版), 24(4):508~514(in Chinese)
- 17 Liu L-P(刘利平), Wang W(王武). 2002. Status and prospects of water treatment in aquaculture. *Fish Sci(水产科学)*, 21(2):35~37(in Chinese)
 - 18 Liu Y-C(刘玉萃), Wu M-Z(吴明作), Guo Z-M(郭宗民), et al. 1998. Biomass and net productivity of *Quercus variabilis* forest in Baotianman Natural Reserve. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 9(6):569~574(in Chinese)
 - 19 Miao S-Y(缪绅裕), Chen G-Z(陈桂珠), Huang Y-S(黄玉山), et al. 1999. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system. *Acta Ecol Sin(生态学报)*, 19(2):236~241(in Chinese)
 - 20 Miao S-Y(缪绅裕), Chen G-Z(陈桂珠), Chen Z-T(陈正桃), et al. 1998. Biomass and distributive patterns of mangrove populations in Zhanjiang Nature Reserves, Guangdong, China. *Guihaia(广西植物)*, 18(1):19~23(in Chinese)
 - 21 Mu CY. 1976. Trans. Jiang S(姜恕), et al. 1981. Methods of Determining the Production of Land Plant Communities. Beijing: Science Press. 1~4(in Chinese)
 - 22 Ning S-J(宁世江), Jiang Y-S(蒋运生), Deng Z-L(邓泽龙), et al. 1996. A preliminary study on biomass of *Aegiceras corniculatum* natural forest in Longmen islets of Guangxi. *Acta Phytoecol Sin(植物生态学报)*, 20(1):57~64(in Chinese)
 - 23 Quan W-M(全为民), Shen X-Q(沈新强), Yan L-J(严力蛟). 2003. Advances in research of biological purification of eutrophic water body [J]. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 14(11):2057~2061(in Chinese)
 - 24 Wang R-D(王如定). 2003. The environmental pollution by marine culture and its appropriate prevention and cure. *J Zhejiang Ocean Univ(Nat Sci)(浙江海洋学院学报·自然科学版)*, 22(1):60~62(in Chinese)
 - 25 Wang Y(王燕), Zhao S-D(赵士洞). 1999. Biomass and net productivity *Picea schrenkiana* var. *tianshanica* forest. *Chin J Appl Ecol(应用生态学报)*, 10(4):389~391(in Chinese)
 - 26 Wang B-S(王伯荪), Liao B-W(廖宝文), Wang Y-J(王勇军), et al. 2002. Mangrove Forest Ecosystem and Its Sustainable Development in Shenzhen Bay. Beijing: Science Press. 179~189(in Chinese)
 - 27 Wong YS, Tam NFY, Lan CY. 1997. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility: A field trial. *Hydrobiologia*, 352:49~59.
 - 28 Yang H-S(杨红生). 2001. Cleaner production: A new model for mariculture sustainable development. *J World Sci-Tech R D(世界科技研究与发展)*, 23(1):62~65(in Chinese)
 - 29 Yang Y-P(杨逸萍), Wang Z-H(王增焕), Sun J(孙建), et al. 1999. The variation law of aqueous chemical factors and the budgets of nitrogen in the intensive shrimp ponds. *Mar Sci(海洋科学)*, 1:15~17(in Chinese)
 - 30 Ye Y, Tam NFY, Wong YS. 2001. Livestock wastewater treatment by a mangrove pot-cultivation system and the effect of salinity on the nutrient removal efficiency. *Mar Pollut Bull*, 42(6):513~521.
 - 31 Zan Q-J(管启杰), Wang Y-J(王勇军), Liao B-Y(廖宝文), et al. 2001. Biomass and net productivity of *Sonneratia apetala*, *S. caseolaris* mangrove man-made forest. *J Wuhan Bot Res(武汉植物学研究)*, 19(5):391~396(in Chinese)
 - 32 Zan Q-J(管启杰), Wang Y-J(王勇军), Wang B-S(王伯荪). 2001. The ecological effects of *Sonneratia apetala*-*S. caseolaris* mangrove plantations in Futian, Shenzhen. *Acta Sci Nat Univ Sunyatseni(中山大学学报·自然科学版)*, 40(6):72~76(in Chinese)
 - 33 Zhao D-Z(赵冬至), Zhao L(赵玲), Zhang F-S(张丰收). 2003. Type of formation, distribution and temporal trend of red tides occurred in the China Sea. *Mar Environ Sci(海洋环境科学)*, 22(3):7~11(in Chinese)
 - 34 Zheng F-Z(郑逢中), Lu C-Y(卢昌义), Zheng W-J(郑文教), et al. 2000. Seasonal dynamics of litter fall and energy flow through leaf litter of *Kandelia candel* mangrove in Jiulongjiang Estuary, Fujian Province, China. *J Xiamen Univ(Nat Sci)(厦门大学学报·自然科学版)*, 39(5):693~698(in Chinese)

作者简介 彭友贵,男,1968生,副教授,博士研究生.主要从事环境生态与湿地保护研究. E-mail: pygui2000@163.com