

人工湿地污水处理系统 3 种红树植物生理生态特性

靖元孝^{1,2}, 任延丽², 陈桂珠^{1*}

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275; 2. 华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

摘要:研究了淡水条件下潜流型人工湿地污水处理系统中红树植物海桑、桐花树和木榄的生理生态特性。一年后, 海桑、桐花树和木榄株高增长量分别为 134.32 cm 和 21 cm, 基径增长量分别为 18.2、14.3 mm 和 12.9 mm, 生物量增长量分别为 747、113 g/株和 55 g/株, 表明海桑生长最快, 桐花树次之, 木榄最慢。从 2004 年 1 月至 12 月, 海桑、桐花树和木榄各项生理指标的平均值分别为: 叶片总叶绿素含量 1.91、1.26、0.91 mg/gFW, 叶绿素 a 含量 1.44、0.93、0.64 mg/gFW, 叶绿素 b 含量 0.5、0.34、0.17 mg/gFW, 净光合速率 9.67、6.39、3.57 $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 蒸腾速率 54、38、24 $\text{mmolH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 气孔导度 285、222、110 $\text{mmolH}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 电解质渗出率 10.2、12.9、13.5% 和 SOD 活性 447、396、386 U/g FW。结果表明光合作用和水分代谢海桑 > 桐花树 > 木榄, 植物受伤害程度海桑 < 桐花树 ≈ 木榄。另外, 3 种红树植物全年的生理生态特征的变化规律基本相似, 4~10 月份生长较快, 大部分生理指标维持高水平, 1~3 月份和 11~12 月份由于温度较低, 生长比较慢, 大部分生理指标处于较低水平。综合比较一年来人工湿地中 3 种红树植物的各项生理生态特征, 结果显示海桑好于桐花树, 桐花树好于木榄。

关键词:红树林; 潜流型人工湿地; 海桑; 桐花树; 木榄; 淡水

文章编号:1000-0933(2005)07-1612-08 **中图分类号:**Q142 **文献标识码:**A

Studies of eco-physiological characteristics of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system

JING Yuan-Xiao^{1,2}, REN Yan-Li², CHEN Gui-Zhu^{1*} (1. School of Environmental Science and Engineering, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China; 2. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1612~1619.

Abstract: Mangroves are diverse communities of tropical to subtropical trees and shrubs growing in the intertidal zone. Pollution eco-physiology and purifying effect of mangrove under seawater condition have been widely investigated. Only few studies related to mangrove wetlands under freshwater condition have been conducted. The objective of this study is to investigate the eco-physiological characteristics of three mangrove species, i. e. *Sonneratia caseolaris* (Sc), *Aegiceras corniculatum* (Ac) and *Bruguiera gymnorrhiza* (Bg) in subsurface flow constructed wetland sewage treatment system under freshwater condition.

The experiment was conducted in South China Normal University, Guangdong Province of China, from January to December 2004. One-year seedlings of mangroves were obtained from Futian Nature Reserve, Shenzhen Bay. The constructed wetland, with 2 m in length, 2 m in width and 0.6 m in depth, was planted with mangrove at a density of 30 plants per wetland bed. Wetland systems received sewage once a week. Plant height, basal diameter, biomass, SOD activity were measured once a month, while chlorophyll content, photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance, electrolyte leakage were measured once a week.

基金项目:国家“863”计划资助项目(2001AA627030)

收稿日期:2005-01-23; **修订日期:**2005-06-20

作者简介:靖元孝(1963~), 男, 湖北人, 副教授, 博士, 主要从事植物资源与环境保护研究。现在华南师范大学生命科学学院。E-mail: jingyx@senu.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence. E-mail: Chenguizhu@yeah.net

Foundation item: Chinese “863” Research Program (No. 2001AA627030)

Received date: 2005-01-23; **Accepted date:** 2005-06-20

Biography: JING Yuan-Xiao, Ph. D., Associate professor, mainly engaged in plant resource and environmental protection. E-mail: jingyx@senu.edu.cn

The results showed that growth rate of the three species are different. Stem height increment of Sc, Ac and Bg were 134, 32 and 21 cm, respectively. Basal diameter increment was 18.2, 14.3, 12.9 mm, respectively. Biomass increment were 747, 113, 55 g/plant, respectively. The growth rate of three species was in the order of $Sc > Ac > Bg$. Average value of physiological characteristics of the three mangrove species were obtain according to the values of all treatment months. Total chlorophyll content of Sc, Ac and Bg were 1.91, 1.26, 0.91 mg/gFW, respectively. Chlorophyll a content were 1.44, 0.93, 0.64 mg/gFW, while chlorophyll b content were 0.5, 0.34, 0.17 mg/gFW, respectively. Net photosynthetic rate were 9.67, 6.39, 3.57 $\mu\text{molCO}_2/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, and transpiration rate were 54, 38, 24 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. stomatal conductance were 285, 222, 110 $\text{mmol H}_2\text{O}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. Electrolyte leakage were 10.2, 12.9, 13.5%. SOD activities were 447, 396, 386 U/g FW. The results indicated that photosynthesis and water metabolism showed a sequence of $Sc > Ac > Bg$, and Sc had a better resistance to sewage stress. The changes of eco-physiological characteristics of the three mangrove species during one year were similar. All of the three mangrove species maintained high growth rate and physiological characteristics from April to October, but had low growth rate and physiological characteristics from January to March and from November to December.

In conclusion, three mangrove species, i.e. *Sonneratia caseolaris*, *Aegiceras corniculatum* and *Bruguiera gymnorhiza* are adaptable of subsurface flow constructed wetland sewage treatment system under freshwater condition. According to the eco-physiological characteristics, Sc was better than Ac, and Ac was better than Bg.

Key words: mangrove; subsurface flow constructed wetland; *Sonneratia caseolaris*; *Aegiceras corniculatum*; *Bruguiera gymnorhiza*; freshwater

红树林是生长于热带和亚热带海岸和河口潮间带的木本植物群落,由于红树林湿地系统处于淡水和海水的交互地带,污染物和有毒物质存留在泥滩中,红树林湿地系统可通过物理作用、化学作用及生物作用对各种污染物进行处理,起到净化作用^[1]。一部分学者从红树林湿地系统的污染生理生态入手,研究污染物对红树林湿地系统中红树植物的生理生态特性的影响,其中对重金属污染^[2~4]、石油污染^[5~7]及其它污水^[8~13]的研究比较广泛。一部分学者则重点研究红树林湿地系统的去污效果,包括天然红树林湿地^[14~16]、人工红树林湿地^[17,18]和模拟红树林湿地^[19,20]对各种污染物的去除效果。但是,目前不论是自然红树林湿地系统、人工红树林湿地系统还是温室模拟红树林湿地系统的研究大多是在咸水并有潮汐变化的条件下进行的,而在淡水条件下的研究比较少。本文研究了淡水且没有潮汐变化的人工湿地生活污水处理系统中 3 种红树植物的生理生态特性,旨在进一步拓展红树植物在淡水自然湿地和人工湿地的应用。

1 试验材料和方法

1.1 试验材料

本研究采用 3 种红树植物,分别为海桑(*Sonneratia caseolaris*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)和木榄(*Bruguiera gymnorhiza*)。3 种植物为 1 年生幼苗,来自深圳福田自然保护区育苗基地。

1.2 红树林人工湿地的构建

试验基地位于华南师范大学校内生物试验场。湿地水池尺寸为 $2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.6\text{m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),每个湿地滤床深度为 0.6m,填料由下至上分别为:粗砾石(粒径 10mm)、细砾石(粒径 5mm),每种填料的厚度均为 30cm。试验分别设海桑、桐花树和木榄人工湿地 3 个组,每组 3 个湿地池重复,每个湿地池种植红树植物 30 株。

湿地系统采用潜流湿地构建方式,生活污水在进入人工湿地前,先进入蓄水池中沉淀、过滤,进行调蓄后进入人工湿地池。污水通过布设在湿地床上部基质中的布水管流入,缓慢向下渗透,处理后的水从湿地池底部排出。污水来自本校行政学院生活污水,污水 COD_Cr 约 210mg/L、 BOD_5 约 95 mg/L、总氮 15 mg/L、总磷 3.5 mg/L,每周定期灌水 1 次。2003 年 10 月至 12 月灌自来水,2004 年 1 月开始灌污水。

另外在深圳福田自然保护区育苗基地选取 3 种红树植物各 60 株作为对照,比较人工湿地污水处理系统和潮间带自然湿地 3 种红树植物的生长状况。

1.3 指标测定及其测定方法

各项指标测定从 2004 年 1 月开始,到 2004 年 12 月结束。

1.3.1 生长状况、生物量及相对生长速率测定 试验前随机抽取同期种植的海桑、桐花树和木榄标准苗 21 株,逐株测定株高和基径,并将植株各部分(根、茎、叶)在 105°C 烘干至恒重,分别记录其干质量,并计算总生物量。根据植物生长相关法,苗木的基径(D)、株高(H)与生物量(B)之间存在下列相关关系:

$$\lg B = \lg a + b \cdot \lg(D^2 H)。$$

试验开始后,每月于当月最后一天测定各个湿地池中 30 株植物的株高和基径。

相对生长速率(R)的计算:

$$R = (\ln B_2 - \ln B_1) / (T_2 - T_1)$$

式中, R 代表相对生长速率, B_1 和 B_2 分别是时间 T_1 和 T_2 时的植株干重。

1.3.2 生理指标测定

(1)叶绿素 a 、 b 及总量的测定 采取植物第 3 对叶,按照 Lichtenthaler 和 Wellburn^[21]的方法每周测定 1 次。

(2)净光合速率、蒸腾速率、气孔导度测定 每种红树植物分别挑选 3 片生长状况良好、光照适中的叶片进行标记,利用美国制造的 Li-cor 6200 光合作用测定仪进行测定,每周选择晴朗的一天分别于 8:00、10:00、12:00、14:00 和 16:00 测定。

(3)SOD 活性测定 取植物的叶片 0.5g,于液氮中迅速研磨至粉末状,加 6ml 预冷的 50mmol/L pH7.8 的磷酸缓冲液(含质量百分比浓度为 4% 的 PVPP 和 0.3% 的 Triton X-100),10000r/min 离心 20min,上清液即为酶液,4℃ 保存备用,活性参照林植芳等^[22]的方法每月测定 1 次。

(4)质膜透性测定 用电导仪法^[23]每周测定叶片的电导率,电解质的相对渗出率($\%$)= $(R/R_1) \times 100$

1.4 数据处理

采用 SPSS 统计软件计算各个指标的平均值和标准差,如果 3 个物种之间存在显著差异,采用 Student-Newman-Keuls 多项比较法检验差异的显著性。

2 结果及分析

2.1 生长状况

2.1.1 人工湿地污水处理系统红树植物生长状况

(1)株高、基径生长量 根据每月测定的株高和基径,计算株高和基径的年增量和月增量(表 1、图 1)。

表 1 结果表明海桑、桐花树和木榄株高年增量分别为 134、32 和 21cm,1a 后株高分别为种植时的 2.3、1.6 和 1.4 倍。株高年增量海桑>桐花树>木榄,而且差异显著。海桑、桐花树和木榄基径年增量分别为 18.2、14.3 和 12.9mm,1a 后基径分别为种植时的 2.1、2.2 和 2.1 倍。基径年增量海桑>桐花树≈木榄。

图 1 表明,海桑 3~12 月份高生长较快,株高月增量维持较高水平,1~2 月份温度低高生长几乎停止;桐花树和木榄全年高生长比较缓慢,株高月增量非常小。径生长方面,3 种红树植物 4~10 月份均较快,基径月增量显著,1~3 月份和 11~12 月份温度较低径生长比较慢,基径月增量较小。

表 1 人工湿地污水处理系统红树植物株高、基径年增量

Table 1 Yearly increment of height and basal diameter of mangroves in constructed wetland sewage treatment system

种类 Species	株高 Height (cm)			基径 Basal diameter(mm)		
	实验前	实验后	年增量	实验前	实验后	年增量
	Before experiment	After experiment	Yearly increment	Before experiment	After experiment	Yearly increment
海桑 <i>S. caseolaris</i>	101±8	235±15	134±12 ^a	16.0±1.3	34.2±3.6	18.2±1.6 ^a
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	55±4	87±8	32±3 ^b	11.9±0.9	26.2±2.3	14.3±1.5 ^b
木榄 <i>B. gymnorhiza</i>	58±3	79±7	21±2 ^c	11.5±1.0	24.4±2.5	12.9±0.9 ^b

表中数值为 45 个样本的平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性 Values are means±SE for 45 samples, the different letter in the same list indicated significant difference at $p=0.05$ level

(2)生物量 为了估算生物量,建立了 3 种红树植物生物量与株高和基径的回归方程(表 2),考虑到海桑生长 1 年后植物形态发生较大变化,分别建立了实验开始和结束时的回归方程。根据回归方程分别算出 3 种红树植物实验开始和结束的生物量(表 3)。

表 2 生物量对数式回归方程

Table 2 Linear regression equation of biomass

种类 Species	对数式回归方程 Linear regression equation	相关系数 R	显著性 p
海桑 <i>S. caseolaris</i>	$\lg B = -0.5771 + 0.8894 \lg(D^2H)$	0.918	<0.01
	$\lg B = -0.3971 + 0.9574 \lg(D^2H)^*$	0.954	<0.01
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	$\lg B = -0.096 + 0.8068 \lg(D^2H)$	0.902	<0.01
木榄 <i>B. gymnorhiza</i>	$\lg B = 0.4298 + 0.5616 \lg(D^2H)$	0.736	<0.01

* 实验结束时的回归方程 Regression equation after experiment

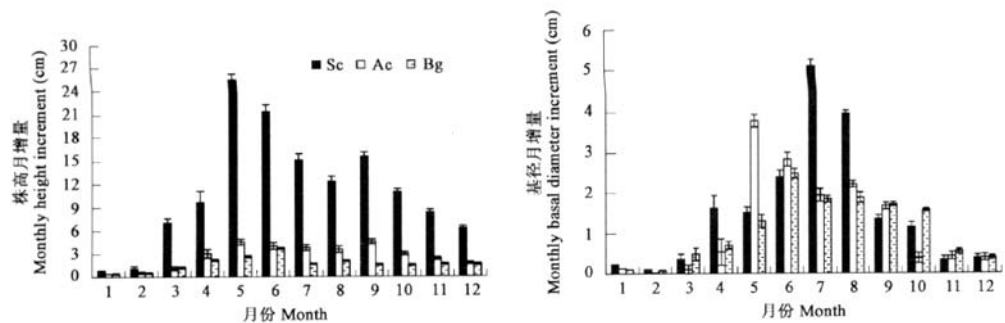


图 1 人工湿地污水处理系统海桑、桐花树和木榄株高、基径月增量(数值为 45 个样本的平均值±标准差)

Fig. 1 Monthly increment of height and basal diameter of *S. caseolaris*(Sc), *A. corniculatum*(Ac) and *B. gymnorrhiza*(Bg) in constructed wetland sewage treatment system (Values are means±SE for 45 samples)

表 3 表明:海桑、桐花树和木榄的生物量年增量分别为 747、113g/株和 55g/株,1a 后生物量分别为种植时的 21.5、2 和 2.8 倍。海桑生长最快,桐花树次之,木榄最慢,而且差异显著。实验结束时海桑生物量是同期桐花树和木榄生物量的 5.6 倍和 9.1 倍,反映了海桑的速生高产、高生物量的特性。另外,相对生长速率也反映了海桑生长最快、桐花树次之、木榄最慢的生长特性。

2.1.2 人工湿地污水处理系统与深圳福田自然保护区红树植物生长状况比较 为了了解人工湿地污水处理系统与潮间带天然湿地红树植物的生长差异,对人工湿地污水处理系统与深圳福田自然保护区红树植物的生长状况进行了对比研究,结果见表 4。

表 4 表明实验开始时人工湿地污水处理系统和深圳福田自然保护区 3 种红树植物的株高、基径和生物量基本相同,1a 后,两种生境下 3 种红树植物的生长状况表现出一定的差异,前一生境海桑和桐花树的株高、基径和生物量稍低于后一生境,而前一生境木榄的生长状况则远远低于后一生境。人工湿地污水处理系统海桑、桐花树和木榄的生物量分别只有深圳福田自然保护区的 76%、83%和 43%。

2.2 叶绿素含量

根据 1~12 月叶绿素含量(图 2)计算叶绿素含量的平均值(表 5)。表 5 表明总叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 均呈现海桑>桐花树>木榄,而且差异显著。

图 2 表明,在 1 年的实验过程中,总叶绿素、叶绿素 a 和叶绿素 b 含量变化规律非常相似。3 种红树植物在 4~12 月份叶绿素含量维持高水平,1~3 月份由于温度下降,叶绿素含量降低。另外,桐花树 4~12 月份叶绿素含量均低于海桑,1~3 月份却高于海桑,主要是因为海桑为嗜热性植物种,1~3 月份其叶子受低温影响而受到较大伤害,而桐花树为抗低温广布种,受低温影响非常小。

表 3 人工湿地污水处理系统红树植物生物量及相对生长速率

Table 3 Biomass and relative growth rate of mangroves in constructed wetland sewage treatment system

种类 Species	生物量 biomass(g/plant)			相对生长速率 Relative growth rate (g/(g·a DW))
	实验前 Before experiment	实验后 After experiment	年增量 Yearly increment	
海桑 <i>S. caseolaris</i>	37±3	784±56	747±49 ^a	3.05±0.45 ^a
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	27±2	140±12	113±8 ^b	1.64±0.23 ^b
木榄 <i>B. gymnorrhiza</i>	31±3	86±8	55±6 ^c	1.02±0.15 ^c

表中数值为 45 株植物的平均值,同一列字母不同者表示在 5%水平具有显著差异性 Values are means±SE for 45 samples,the different letter in the same list indicated significant difference at $p=0.05$ level

2.3 净光合速率、蒸腾速率及气孔导度

根据 1~12 月份净光合速率、蒸腾速率及气孔导度数值(图 3)分别算出海桑、桐花树和木榄 3 项指标的平均值(表 6)。表 6 表明 3 种红树植物的净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均呈现海桑>桐花树>木榄,而且差异显著。表明光合作用和水分代谢海桑>桐花树>木榄。

表 4 人工湿地污水处理系统与深圳福田自然保护区红树植物的生长状况比较

Table 4 Comparison of mangrove growth between constructed wetland sewage treatment system and Futian Nature Reserve, Shenzhen		株高 Height (cm)		基径 Basal diameter(mm)		生物量 biomass(g/plant)	
种类 Species		实验前 Before experiment	实验后 After experiment	实验前 Before experiment	实验后 After experiment	实验前 Before experiment	实验后 After experiment
海桑 <i>S. caseolaris</i>	人工湿地污水处理系统 Constructed wetland sewage treatment system	101±8	235±15	16.0±1.3	34.2±3.6	37±3	784±56
	深圳福田自然保护区 Futian Nature Reserve, Shenzhen	100±6	258±1	15.8±1.1	38.5±3.7	36±2	1038±98
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	人工湿地污水处理系统 Constructed wetland sewage treatment system	55±4	87±8	11.9±0.9	26.2±2.3	27±2	140±12
	深圳福田自然保护区 Futian Nature Reserve, Shenzhen	56±3	95±8	11.7±0.7	28.3±1.9	27±2	169±15
木榄 <i>B. gymnorrhiza</i>	人工湿地污水处理系统 Constructed wetland sewage treatment system	58±3	79±7	11.5±1.0	24.4±2.5	31±3	86±8
	深圳福田自然保护区 Futian Nature Reserve, Shenzhen	57±2	153±9	11.6±1.1	37.2±3.4	31±2	198±17

表中数值为 45 株植物的平均值 Values are means±SE for 45 samples

表 5 人工湿地污水处理系统 3 种红树植物叶绿素含量

Table 5 Chlorophyll contents of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system			
种类 Species	总叶绿素(mg/gFW) Total chlorophyll	叶绿素 a(mg/gFW) Chlorophyll a	叶绿素 b(mg/gFW) Chlorophyll b
海桑 <i>S. caseolaris</i>	1.91±0.89 ^a	1.44±0.23 ^a	0.50±0.06 ^a
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	1.26±0.50 ^b	0.93±0.12 ^b	0.34±0.03 ^b
木榄 <i>B. gymnorrhiza</i>	0.91±0.34 ^c	0.64±0.08 ^c	0.17±0.02 ^c

数值为 12 月份的平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5%水平具有显著差异性 Values are means±SE for 12 months, the different letter in the same list indicated significant difference at $p=0.05$ level

表 6 人工湿地污水处理系统红树植物净光合速率、蒸腾速率和气孔导度

Table 6 Net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of mangroves in constructed wetland sewage treatment system			
种类 Species	净光合速率(μmolCO ₂ /(m ² ·s)) Net photosynthetic rate	蒸腾速率(mmolH ₂ O/(m ² ·s)) Transpiration rate	气孔导度(mmolH ₂ O/(m ² ·s)) Stomatal conductance
海桑 <i>S. caseolaris</i>	9.67±3.59 ^a	54±26 ^a	285±138 ^a
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	6.39±1.59 ^b	38±13 ^b	222±72 ^b
木榄 <i>B. gymnorrhiza</i>	3.57±0.63 ^c	24±12 ^c	110±75 ^c

数值为 12 月的平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5%水平具有显著差异性 Values are means±SE for 12 months, the different letter in the same list indicated significant difference at $p=0.05$ level

图 3 表明,在 1a 的实验过程中,净光合速率、蒸腾速率和气孔导度变化规律非常相似。3 种红树植物在 4~11 月份生理指标维持高水平,1~3 月份和 12 月份由于温度下降,3 项指标降低。另外,桐花树 4~12 月份 3 项生理指标均低于海桑,但 1~3 月份净光合速率与海桑持平,蒸腾速率和气孔导度高于海桑。主要是因为 1~3 月份海桑叶子受低温影响而受到较大伤害,而桐花树受影响非常小。

2.4 质膜透性和 SOD 活性

叶片组织电解质渗出率是植物抗性指标之一,可以反映植物受伤害的程度。SOD 是植物保护酶之一,已广泛应用于植物对逆境的反应机理的研究^[24]。

根据 1~12 月份数值分别算出海桑、桐花树和木榄电解质渗出率和 SOD 活性的平均值(表 7)。表 7 表明电解质渗出率呈现海桑<桐花树≈木榄,表明海桑受伤害程度较轻。SOD 活性 3 种红树植物差异不显著。

图 5 表明,海桑 1~12 月份电解质渗出率变化不大,桐花

表 7 人工湿地污水处理系统 3 种红树植物电解质渗出率和 SOD 活性

种类 Species	电解质渗出率(%) Electrolyte leakage	SOD 活性(Ug ⁻¹ FW) SOD activity
海桑 <i>S. caseolaris</i>	10.22±1.20 ^a	447±145 ^a
桐花树 <i>A. corniculatum</i>	12.88±2.81 ^b	396±135 ^a
木榄 <i>B. gymnorrhiza</i>	13.53±2.65 ^b	386±139 ^a

数值为 12 月份的平均值±标准差,同一列字母不同者表示在 5%水平具有显著差异性 Values are means±SE for 12 months, the different letter in the same list indicated significant difference at $p=0.05$ level

树 10~12 月份、木榄 1~3 月份及 12 月份电解质渗出率偏高。

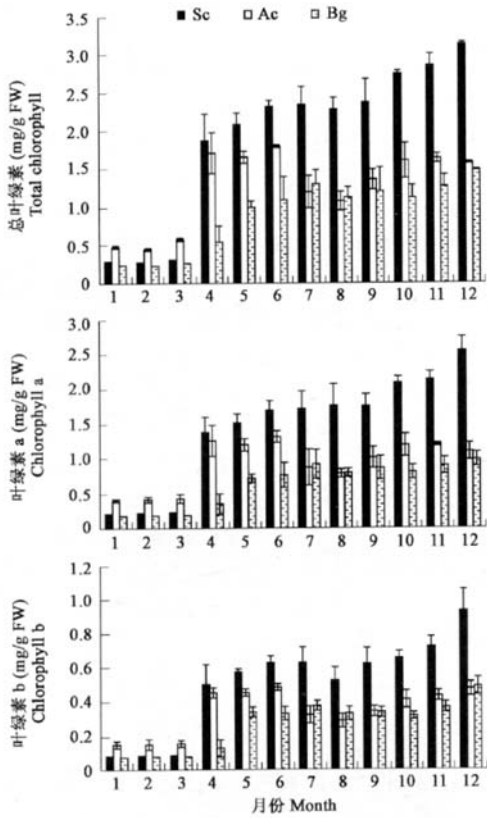


图 2 人工湿地污水处理系统海桑、桐花树和木榄叶绿素含量月变化(数值为 n 次取样的平均值 $\pm$ 标准差, $n=12$)
Fig. 2 Monthly change of chlorophyll contents of *S. caseolaris* (Sc), *A. corniculatum* (Ac) and *B. gymnorhiza* (Bg) in constructed wetland sewage treatment system (Values are means $\pm$ SE for n times of sampling, $n=12$)

3 讨论

3.1 人工湿地中 3 种红树植物生理生态特性总体评价

本研究结果显示 3 种红树植物海桑、桐花树和木榄能较好地适应淡水且没有潮汐变化的潜流型人工湿地生活污水处理系统,海桑和桐花树的株高年增量、基径年增量和生物量年增量与深圳海上田园风光旅游区滩涂海水种植—养殖系统中海桑和桐花树相似^①。在 1a 的生长过程中,3 种植物 4~10 月份均维持正常生长状况,各项生理指标均维持较高水平,而在 1~3 月份和 12 月份期间,由于温度较低,3 种植物的生长均受到不同程度的影响,生理指标维持较低水平。总体上看,不论是植物的生长速度、生物量积累还是叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、电解质渗出率均呈现海桑优于桐花树、桐花树优于木榄的趋势。Lin^[25]认为海水不是红树林生长的必要条件,红树林可生长

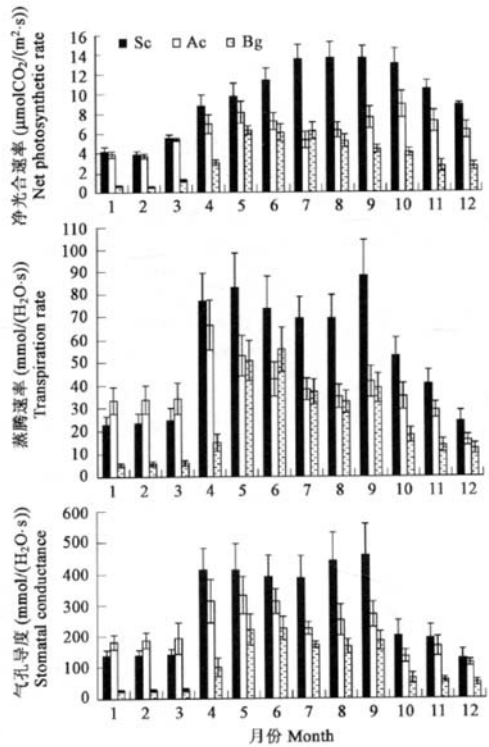


图 3 人工湿地污水处理系统海桑、桐花树和木榄净光合速率、蒸腾速率及气孔导度月变化(数值为 n 次取样的平均值 $\pm$ 标准差, $n=12$)
Fig. 3 Monthly change of net photosynthetic rate, transpiration rate, stomatal conductance of *S. caseolaris* (Sc), *A. corniculatum* (Ac) and *B. gymnorhiza* (Bg) in constructed wetland sewage treatment system (Values are means $\pm$ SE for n times of sampling, $n=12$)

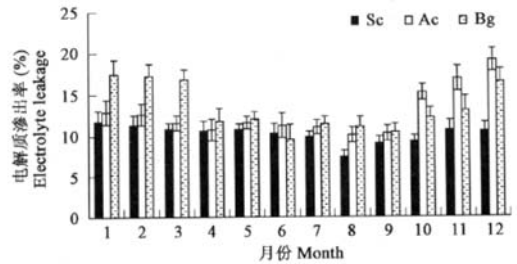


图 4 人工湿地污水处理系统海桑、桐花树和木榄电解质渗出率月变化(数值为 n 次取样的平均值 $\pm$ 标准差, $n=12$)
Fig. 4 Monthly change of electrolyte leakage of *S. caseolaris* (Sc), *A. corniculatum* (Ac) and *B. gymnorhiza* (Bg) in constructed wetland sewage treatment system (Values are means $\pm$ SE for n times of sampling, $n=12$)

① 殷敏. 滩涂海水种植-养殖系统红树林生态及其净化效应研究. 中山大学硕士论文, 2003. 34~44

在盐度不同的各种滩面上,从完全盐水到完全淡水都能生长。作者推测本研究的人工湿地污水处理系统为淡水系统,不存在盐分过分积累的环境胁迫,因此不需要通过潮汐变化来消除盐分的过分积累。

3.2 低温对 3 种红树植物的影响

如上所述,低温对 3 种红树植物产生了较大的影响,但 3 种植物表现的抗寒能力有所不同。海桑 1~2 月受低温的影响,出现大量落叶和嫩梢枯死现象,生长几乎停止,叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率、气孔导度等指标比同期的桐花树低(图 3、图 4)。木榄也出现叶片轻微卷曲、少量嫩梢受伤害的现象,但受影响程度明显低于海桑,而桐花树叶片几乎没有受到影响。这是因为海桑属于嗜热树种,对低温比较敏感,而桐花树和木榄的抗寒能力较强^[26]。

3.3 人工湿地水位变化对 3 种红树植物的影响

本研究的人工湿地为定期人工灌水,水位会受到温度、光照及降雨量等环境因子的影响。4 月份气温适宜,海桑和桐花树恢复正常生长,各项生态生理生态指标较 1~3 月份株有明显上升,与 5~6 月份持平;而木榄 4 月份仍生长缓慢,叶片有轻微卷曲,叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等指标上升缓慢,与 5~6 月份有明显差异(图 2、图 3)。这主要是因为 4 月份以阴雨天为主、空气湿度大,人工湿地水分蒸腾、蒸发量少,导致湿地水位相对较高,植物被浅水浸淹,而木榄在自然界生长的潮位较高,对水渍比较敏感^[25,27]。7~8 月份,天气持续高温,光照强,人工湿地水分蒸腾、蒸发量大,由于没有及时补充水分,湿地水位下降,而桐花树在自然界生长的潮位较低,受潮水淹浸的时间更长^[25],对低水位较敏感,桐花树的生长受到影响,部分叶片枯黄,卷曲,径生长速度、叶绿素含量、净光合速率、蒸腾速率和气孔导度等生理生态指标较 5、6 月份有不同程度的降低(图 1~图 3)。海桑受水位变化的影响不大。以上分析表明,桐花树和木榄对人工湿地水位变化比较敏感,因此利用红树植物来构建人工湿地时,要注意调节水位,或者根据设计水位来选择植物品种。另外,本研究的湿地为潜流型人工湿地,水位在地表以下,即使降雨也只会导致短暂的轻度淹水(植物淹水深度小于 2cm),而表面流人工湿地和大量淡水天然湿地水位较深,植物长时间被水浸淹,因此必须进一步研究淡水条件下不同程度的淹水对红树植物的影响。叶勇等^[27,28]利用海水系统研究了木榄和秋茄对水渍和模拟海平面上升的反应。至于海桑、桐花树和木榄人工湿地对生活污水的净化效果有待进步研究。

References:

- [1] Lin P. Mangrove vegetation. Beijing: Ocean Press, 1984. 4~34.
- [2] Yim M W, Tam N F Y. Effects of wastewater-borne heavy metals on mangrove plants and soil microbial activities. *Marin Pollution Bulletin*, 1999, **39**(1-12): 179~186.
- [3] MacFarlane G R, Pulkownik A, Burchett M D. Accumulation and distribution of heavy metals in the grey mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh.: biological indication potential. *Environmental Pollution*, 2003, **123**(1): 139~151.
- [4] Chen X Y, Zen B H, Chen L H. Heavy metals contents in sediments, mangroves and bivalves from Ting Kok, Hong Kong. *China Environmental Science*, 2003, **23**(5): 480~484.
- [5] Proffitt C E, DeBilin D J. Are there cumulative effect in red mangrove from oil spills during seedling and sapling stages? *Ecological Applications*, 1998, **8**(1): 121~127.
- [6] Suprayogi B, Murray F. A field experiment of the physical and chemical effects of two oils on mangroves, *Environmental and experimental Botany*, 1999, **42**(3): 221~229.
- [7] Li M, Chen G Z. Effect of oil wastewater on some eco-physiological indexes of *Kandelia candel* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(3): 528~532.
- [8] Naidoo G, Chirkoot D. The effects of coal dust on photosynthetic performance of the mangrove, *Avicennia marina* in Richards Bay, South Africa. *Environmental Pollution*, 2004, **127**(3): 359~366.
- [9] Chen G Z, Miao S Y, Nora F Y T, et al. Effect of synthetic wastewater on eco-physiological indexes of *Kandelia candel* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1994, **5**(2): 221~224.
- [10] Miao S Y, Chen G Z. Effect of artificial wastewater on photosynthetic rates of *Kandelia candel* seedlings growing in greenhouse. *Research of Environmental Sciences*, 1997, **10**(3): 41~45.
- [11] Wong Y S, Tam N F Y, Chen G Z, et al. Response of *Aegiceras corniculatum* to synthetic sewage under simulated tidal conditions. *Hydrobiologia*, 1997, **352**: 89~96.
- [12] Chen G K, Chen G Z, Wong Y S, et al. Effect of artificial wastewater on some eco-physiological characteristics of *Avicennia marina* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, **10**(1): 95~98.
- [13] Ye Y, Tam N F Y, Lu C Y. Effects of livestock wastewater on seedlings of two mangrove species. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, (5): 766~770.
- [14] Wong Y S, Tam N F Y, et al. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility: a field trial. *Hydrobiologia*, 1997, **352**: 49~59.

- [15] Halmar H, Peter V R, *et al.* Assessing sediment removal capacity of vegetated and non-vegetated settling ponds in prawn farms. *Aquacultural Engineering*, 2003, **27**:295~314.
- [16] Huang F L, Xia B C, Dai X. Bacteria ecology in planting-culturing system. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(6):1030~1034.
- [17] Sansanayuth P, Phadungchep A, *et al.* Shrimp pond effluent pollution problems and treatment by constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 1996, **34**(11):93~98.
- [18] Boonsong K, Piyatiratitivorakul S, Patanaponpaiboon P. Potential use of mangrove plantation as constructed wetland for municipal wastewater treatment *Wat. Sci. Tech.*, 2003, **48**(5):257~266.
- [19] Chu H Y, Chen N C. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater. *Wat. Sci. Tech.*, 1998, **38**(1):361~368.
- [20] Ye Y, Tam N F Y, Wong Y S. Livestock wastewater treatment by a mangrove pot-cultivation system and the effect of salinity on the nutrient removal efficiency. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, **42**(6):513~521.
- [21] Lichtenhaler H K, Wellbum A R. Determinations of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extracts in different solvents. *Trans. Biochem. Soc.*, 1983, **11**:591~592.
- [22] Lin Z F, Li S S, Chang D L, *et al.* The changes of oxidation and peroxidation in postharvest litchi fruit. *Acta Bot. Sin.*, 1988, **30**(4):382~387.
- [23] Liu Z Q, Zhang S C. *Plant Stress-resistant Physiology*. Beijing: China Agriculture Press, 1994. 369~380.
- [24] Bowler C, Van Montagu M, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance. *Annu. Rev. Plant Mol. Biol.*, 1992, **43**:83~116.
- [25] Lin P. Mangrove Ecological System in China Beijing: Science Press, 1997. 14~19.
- [26] Yang S C, Lin P. Ecological studies on the resistance and adaptation to cold of some tidal mangrove species in China *Acta Phytocologica Sinica*, 1998, **22**(1) 60~67.
- [27] Ye Y, Lu C Y, Tan F Y. Studies on differences in growth and physiological responses to waterlogging between *Bruguiera gymnorrhiza* and *Kandelia candel*. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(10):1655~1661.
- [28] Ye Y, Lu C Y, Zheng F Z, *et al.* Effects of simulated sea level rise on the mangrove *Kandelia candel*. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, **24**(10):2238~2244.

参考文献:

- [1] 林鹏. 红树林. 北京:海洋出版社, 1984. 4~34.
- [4] 陈小勇, 曾宝强, 陈利华. 香港汀角红树植物、沉积物及双壳类动物重金属含量. *中国环境科学*, 2003, **23**(5):480~484.
- [7] 李玫, 陈桂珠. 含油废水对秋茄幼苗的几个生理生态指标的影响. *生态学报*, 2000, **20**(3):528~532.
- [9] 陈桂珠, 缪绅裕, 谭凤仪, 等. 人工合成污水对秋茄幼苗的几个生态生理学指标影响初报. *应用生态学报*, 1994, **5**(2):221~224.
- [10] 缪绅裕, 陈桂珠. 人工污水对温室中秋茄苗光合速率的影响. *环境科学研究*, 1997, **10**(3):41~45.
- [12] 陈桂葵, 陈桂珠, 黄玉山, 等. 人工污水对白骨壤幼苗生理生态特性的影响. *应用生态学报*, 1999, **10**(1):95~98.
- [13] 叶勇, 谭凤仪, 卢昌义. 牲畜废水对两种红树植物幼苗的影响. *应用生态学报*, 2003, **14**(5):766~770.
- [16] 黄凤莲, 夏北成, 戴欣, 等. 滩涂海水种植-养殖系统细菌生态学研究. *应用生态学报*, 2004, **15**(6):1030~1034.
- [22] 林植芳, 李双顺, 张东林, 等. 采后荔枝果实中氧化和过氧化作用的变化. *植物学报*, 1998, **30**(4):382~387.
- [23] 刘祖祺, 张石诚. 植物抗性生理学. 北京:中国农业出版社, 1994. 369~380.
- [25] 林鹏. 中国红树林生态系. 北京:科学出版社, 1997. 14~19.
- [26] 杨盛昌, 林鹏. 潮滩红树植物抗低温适应的生态学研究. *植物生态学报*, 1998, **22**(1) 60~67.
- [27] 叶勇, 卢昌义, 谭凤仪. 木榄和秋茄对水渍的生长与生理反应的比较研究. *生态学报*, 2001, **21**(10):1655~1661.
- [28] 叶勇, 卢昌义, 郑逢中, 等. 模拟海平面上升对红树植物秋茄的影响. *生态学报*, 2004, **24**(10):2238~2244.