

红树植物人工湿地对生活污水的净化效果

靖元孝<sup>1 3</sup> 李晓菊<sup>1</sup> 杨丹菁<sup>2</sup> 陈桂珠<sup>3,\*</sup>

(1. 华南师范大学生命科学学院 广州 510631 ; 2. 广州市环境保护科学研究所 广州 510620 ;  
3. 中山大学环境科学与工程学院 广州 510275 )

**摘要** 研究了潜流型海桑 (*Sonneratia caseolaris*) 人工湿地、桐花树 (*Aegiceras corniculatum*) 人工湿地和木榄 (*Bruguiera gymnorrhiza*) 人工湿地对生活污水的净化效果。一年来, 3 种红树植物人工湿地对 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的平均去除率分别达到 83%、71%、41%、55%、50% 和 84% 以上。人工湿地各处理周期之间, BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 去除率波动较小, 而 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 去除率波动较大。3 种红树植物人工湿地对各种污染物的净化效果存在一定的差异。海桑人工湿地和桐花树人工湿地对 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TP、TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率明显高于木榄人工湿地, 而海桑人工湿地和桐花树人工湿地相比较, 除 TP 外, BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率没有显著差异。人工湿地单一处理周期内, 去除率随水力停留时间 (HRT) 的延长而增加。BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 在 HRT 为 1d 和 2d 的去除率分别为 HRT 为 3d 去除率的 54% ~ 65% 和 73% ~ 84%, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在 HRT 为 1d 和 2d 的去除率分别达到了 HRT 为 3d 的 70% ~ 81% 和 85% ~ 94%, 而 TP 在 HRT 为 1d 和 2d 的去除率分别只有 HRT 为 3d 的 39% ~ 50% 和 65% ~ 74%。另外, 红树植物人工湿地与风车草 (*Cyperus alternifolius*) 人工湿地相比, 前者的 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TP、TN 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率明显小于后者 ( $P < 0.05$ )。总体上看, 3 种红树植物人工湿地对生活污水的净化效果呈现海桑人工湿地 ≈ 桐花树人工湿地 > 木榄人工湿地。

**关键词** 红树植物 ; 人工湿地 ; 生活污水 ; 海桑 ; 桐花树 ; 木榄

文章编号 : 1000-0933 (2007) 06-2365-10 中图分类号 : Q142 , Q948 , X171 文献标识码 : A

Purifying effect of mangrove constructed wetlands on domestic sewage

JING Yuan-Xiao<sup>1 3</sup> , LI Xiao-Ju<sup>1</sup> , YANG Dan-Jing<sup>2</sup> , CHEN Gui-Zhu<sup>3,\*</sup>

1 College of Life Science , South China Normal University , Guangzhou 510631 , China  
2 Guangzhou Research Institute of Environmental Protection , Guangzhou 510620 , China  
3 School of Environmental Science and Engineering , ZhongShan University , Guangzhou 510275 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 ( 6 ) 2365 ~ 2374.

**Abstract** : The objective of this study was to investigate the purifying efficiency of domestic sewage in constructed wetlands planted with three mangrove species , *Sonneratia caseolaris* (Sc) , *Aegiceras corniculatum* (Ac) and *Bruguiera gymnorrhiza* (Bg). Experiment was conducted in South China Normal University , Guangdong Province of China , from January 2005 to December 2005. One-year seedlings of mangroves obtained from Futian Nature Reserve , Shenzhen Bay were grown in small constructed wetlands (surface area : 4 m<sup>2</sup>) at a density of 30 plants per wetland. Water samples were collected three times a month and analyzed for COD<sub>Cr</sub> , BOD<sub>5</sub> , NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N , NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N , total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP). Results indicated that mangrove wetlands were capable of removing pollutants from domestic sewage. Average removal rates of

基金项目 广东省攻关资助项目 (No : 99M05304G 2005B33302014 )  
收稿日期 2006-05-09 ; 修订日期 2007-03-26  
作者简介 靖元孝 (1963 ~ ) 男 , 湖北武汉人 , 博士 , 教授 , 主要从事植物资源与环境保护研究. E-mail : jingyx@senu.edu.cn  
\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail : Chenguizhu@yeah.net  
**Foundation item** The project was financially supported by Guangdong key problems project (No. 99M05304G 2005B33302014 )  
**Received date** 2006-05-09 ; **Accepted date** 2007-03-26  
**Biography** JING Yuan-xiao , Ph. D. , Professor , mainly engaged in plant resource and environmental protection. E-mail : jingyx@senu.edu.cn

BOD<sub>5</sub> , COD<sub>Cr</sub> , TP , TN , NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N were greater than 83% ,71% ,41% ,55% ,50% and 84% respectively. Removal rates of BOD<sub>5</sub> and COD<sub>Cr</sub> were relatively steady and removal rates of all forms of nutrients fluctuated wildly over time. Purifying effects to pollutants were different among three mangrove species. Removal rates in Sc and Ac wetlands were significantly higher than those in Bg wetland. However , except TP , no significant difference in removal rates was found between Sc and Ac wetlands. Removal rate increased with hydraulic retention time (HRT ). Removal rates of BOD<sub>5</sub> , COD<sub>Cr</sub> ,TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in 1d and 2d of HRT accounted for 54%—65% and 73% ~84% of removal rates in 3d of HRT , respectively. Removal rates of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N in 1d and 2d of HRT accounted for 70%—81% and 85%—94% of removal rates in 3d of HRT , respectively. However , removal rates of TP in 1d and 2d of HRT only accounted for 39%—50% and 65%—74% of removal rates in 3d of HRT , respectively. Moreover , removal rates of BOD<sub>5</sub> , COD<sub>Cr</sub> , TP , TN and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N in the mangrove wetlands were evidently lower than those in *Cyperus alternifolius* wetlands. Generally , pollutant removal rate showed a sequence of Sc wetland ≈ Ac wetland > Bg wetland.

**Key Words :** mangrove ; constructed wetland ; domestic sewage ; *Sonneratia caseolaris* ; *Aegiceras corniculatum* ; *Bruguiera gymnorhiza*

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<sup>[1]</sup>。不少学者展开了红树林湿地系统去污效果的研究 ,包括天然红树林湿地<sup>[2~4]</sup>和人工红树林湿地<sup>[5~8]</sup>对各种污染物的去除效果。研究表明红树林湿地系统对重金属<sup>[7]</sup>、有机物<sup>[2,5,9]</sup>、氮和磷<sup>[6,8,10~12]</sup>以及悬浮物<sup>[3,5,13]</sup>均有一定的净化效果。但是 ,目前有关红树林湿地系统去污作用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<sup>[14]</sup>。作者在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 3 种红树植物的生理生态特性的基础上<sup>[15,16]</sup> ,本文进一步研究其对生活污水的净化效果 ,一方面进一步拓展红树植物在人工湿地的应用 ,另一方面为人工湿地提供更多的植物选择。

1 实验材料和方法

1.1 试验材料

实验采用 3 种红树植物 ,紫金牛科的桐花树 (*Aegiceras corniculatum*)、红树科的木榄 (*Bruguiera gymnorhiza*) 以及海桑科的海桑 (*Sonneratia caseolaris*)。另外 ,选用吸污能力强的风车草 (*Cyperus alternifolius*)作为对照组植物<sup>[17~21]</sup>。3 种红树植物均为 1 年生幼苗 ,从深圳福田红树林自然保护区育苗基地购回 ,于 2003 年 10 月 15 日正式种植 ,到 2005 年本研究开始时海桑、桐花树和木榄的平均株高分别为 235cm、87cm 和 79cm。

1.2 红树林人工湿地的构建

人工湿地建在华南师范大学校园东南部 ,试验池尺寸为 2m × 2m × 0.6m。系统采用潜流湿地 ,每个湿地池高 0.6m ,填料分别为 (由下至上) :粗砾石 (粒径为 20mm)、细砾石 (粒径为 10mm) ,每种填料的厚度均为 30cm。海桑、桐花树和木榄的种植密度分别为每个湿地池 15 株、30 株和 30 株。每种红树植物人工湿地池均设 3 个重复 ,另设 3 个风车草人工湿地池为对照。

生活污水来自华南师范大学学生宿舍 ,污水 COD<sub>Cr</sub> :90 ~ 270mg/L、BOD<sub>5</sub> :40 ~ 80 mg/L、总氮 :20 ~ 45 mg/L、总磷 :1.5 ~ 5.5mg/L、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N :15 ~ 36mg/L。用水泵从化粪池出水口抽取污水 ,至蓄水池中沉淀、过滤 ,进行调蓄后进入各湿地池中进行处理。湿地床中沿对角线埋入直径为 20mm 的 PVC 管 ,管壁有小孔 ,使湿地池中的水可以进入其中 ,方便出水采集。实验于 2005 年 1 ~ 12 月进行 ,由于受学生暑假影响 ,8 月份实验暂停。湿地每周灌污水 1 次 ,污水通过湿地床上部基质中的布水管流入 ,处理后的水从湿地池底部排出。

1.2.1 水样采集与分析方法

每月分别于上旬、中旬和下旬各采集水样分析一次。考虑到降雨对污水的稀释作用 ,尽量避免在降雨期

间进行水样采集和分析。在采集处理后水样前 ,如果湿地因蒸发和蒸腾作用导致湿地水量减少 ,可补充自来水 ,保持湿地水量平衡 ,同时计算补充自来水中无机物和有机物的含量。

进水样采集 :用水泵将污水抽入蓄水池 ,经过沉淀 ,混合后 ,用采水器在蓄水池中沿对角线布设 3 点采水 ,于 16L 桶中充分混合 ,用虹吸法将污水转移到 1L 的采样瓶中。

处理后水样采集 :污水在湿地停留 3d 后 ,用橡皮管插入湿地床中的 PVC 管中 ,橡皮管插入深度分别为 10、30、50cm ,用虹吸法将水吸出 ,将 3 种不同位置、不同深度的水样于 16L 的桶中充分混合 ,然后再用橡皮管虹吸转入 1L 的采样瓶中。

水质分析项目包括 DO、COD<sub>Cr</sub>、BOD<sub>5</sub>、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、TN、TP ,方法如下 :DO 采用碘量法 ;BOD<sub>5</sub> 采用稀释接种法 ;NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用纳氏试剂分光光度法 ;NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用镉柱还原法 ;NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 采用 N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法 ;TN 采用过硫酸钾-紫外分光光度法 ;TP 采用钼锑抗分光光度法<sup>[22]</sup>。

1.3 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 ,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 人工湿地溶解氧浓度变化

各人工湿地池进水及出水溶解氧浓度变化见图 1。由于污水来自学生宿舍下水道 ,未经任何稀释处理 ,进水溶解氧浓度较低 ,最高浓度在 5 月份 ,为 3.64 mg/L ,其余时间溶解氧浓度为 1mg/L 左右 ,甚至出现溶解氧为 0 的时候。不同处理周期中出水溶解氧浓度因受天气 (主要是降雨)影响而波动较大。自 4 月中下旬 ,广州进入雨季 ,所以 4~6 月份的出水溶解氧浓度一般高于 1mg/L ,在 9 月份又有一个降雨期 ,溶解氧浓度再次出现一个高峰 ,其余时间除风车草湿地较高 ,平均达到 1.73mg/L 之外 ,其余湿地出水溶解氧含量一般较低 ,平均值不超过 1mg/L。

2.2 红树植物人工湿地对污染物的去除效果

2.2.1 人工湿地对 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 的去除效果

人工湿地 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 浓度变化及去除效果见图 2。BOD<sub>5</sub> 进水浓度介于 40~80 mg/L 之间 ,经人工湿地处理后 ,除 1~3 月份 ,由于气温较低 ,出水浓度略高之外 ,其余时间出水浓度均低于 10 mg/L。COD<sub>Cr</sub> 进水浓度介于 90~270mg/L 之间 ,经人工湿地处理后 ,各湿地 COD<sub>Cr</sub> 显著下降 ,出水 COD<sub>Cr</sub> 值最低达到 7.82mg/L。综合全年数据看来 ,各人工湿地对 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 的平均去除率分别达到 85% 和 71% 以上 ,且各处理周期之间波动较小 ,说明人工湿地对有机物的处理效果好并且比较稳定 ,受外界环境影响不大。

2.2.2 人工湿地对 TP 的去除效果

人工湿地 TP 浓度变化及净化效果见图 3。总磷的进水浓度介于 1.5~5.5mg/L 之间 ,经过人工湿地处理 ,出水浓度有所降低 ,平均出水浓度为 1.49mg/L ,最低出水浓度为 0.36mg/L。综合全年数据看来 ,各人工湿地对 TP 的平均去除率达到 41% 以上 ,各处理周期之间波动较大 ,1~2 月份温度较低 ,TP 去除率最低 ,6 月份气候适宜 ,植物生长旺盛 ,TP 去除率达到最大值。

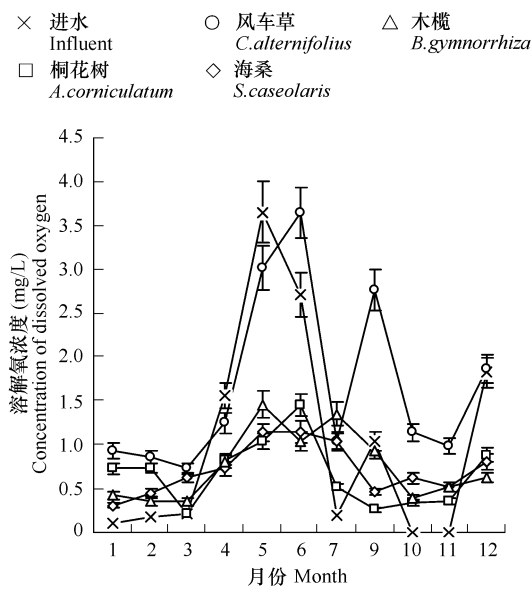


图 1 人工湿地溶解氧变化

Fig. 1 Variation of concentration of dissolved oxygen in constructed wetlands

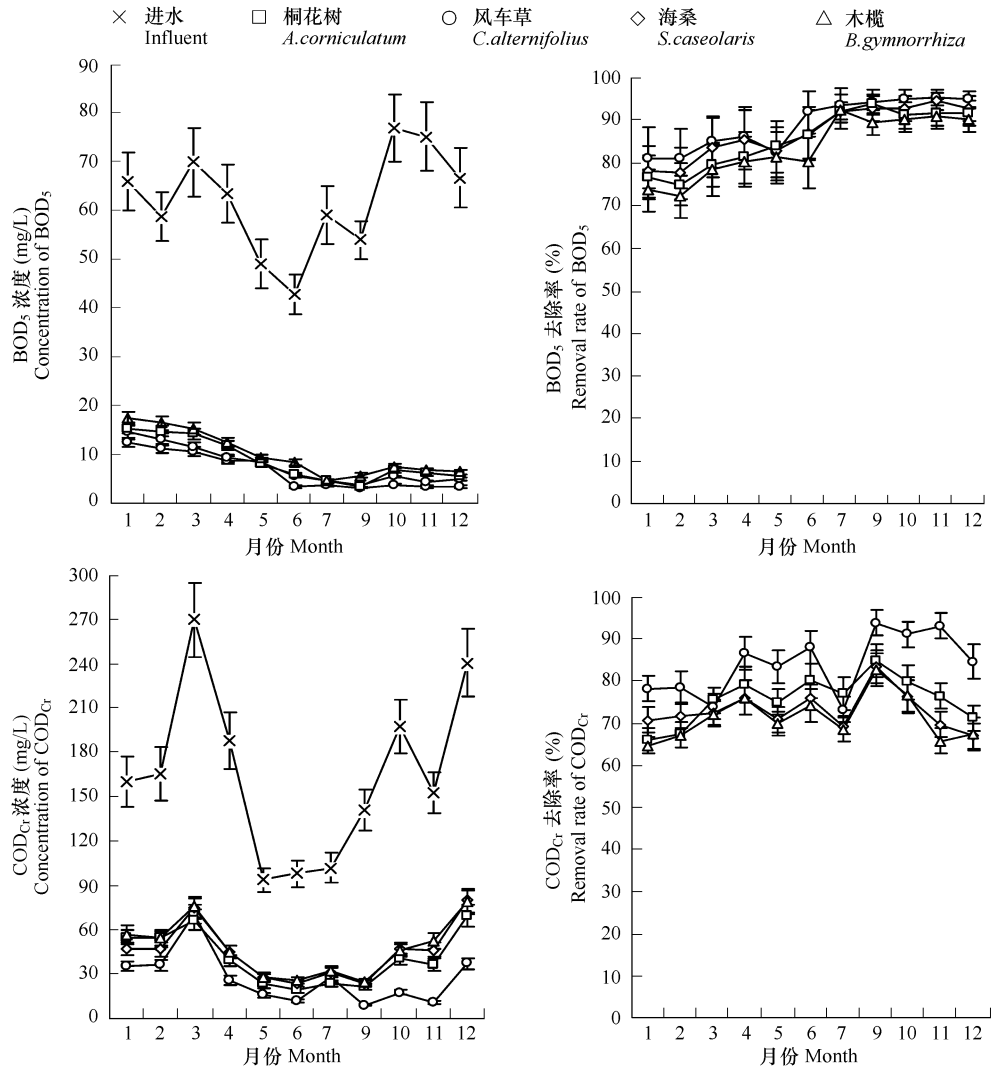


图2 人工湿地 BOD<sub>5</sub> 和 COD<sub>Cr</sub> 的浓度变化及去除效果

Fig. 2 Variation of the concentration and removal effect of BOD<sub>5</sub> and COD<sub>Cr</sub> in constructed wetlands

2.2.3 人工湿地对 TN 的净化效果

人工湿地 TN 浓度变化及净化效果见图 4。总氮的进水浓度介于 20 ~ 45mg/L 之间 ,平均进水浓度为 34. 82mg/L 经过人工湿地处理 ,出水中 TN 浓度显著降低 ,平均出水浓度为 13. 00mg/L ,最低出水浓度为 6. 44mg/L。综合全年数据看来 ,各人工湿地对 TN 的平均去除率达到 55% 以上 ,1 ~ 2 月份温度较低 ,TN 去除率偏低 ,平均去除率只有 38% 5 ~ 11 月份气候适宜 ,植物生长旺盛 ,TN 去除率维持在较高水平 ,平均去除率达到 60% 以上。

2.2.4 人工湿地对氨氮的净化效果

人工湿地 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 浓度变化及净化效果见图 5。氨氮在总氮所占的比例极高 ,氨氮的进水浓度介于 15 ~ 36mg/L 之间 ,平均进水浓度为 28. 86mg/L 经过人工湿地处理 ,出水中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 浓度有所降低 ,平均出水浓度为 10. 61mg/L。综合全年数据看来 ,各人工湿地对 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 的平均去除率达到 50% 以上 ,1 ~ 2 月份温度较低 ,NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 去除率偏低 ,3 ~ 4 月 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 的去除率逐渐升高 5 ~ 12 月 NH<sub>4</sub><sup>+</sup> -N 去除率维持在较高水平。

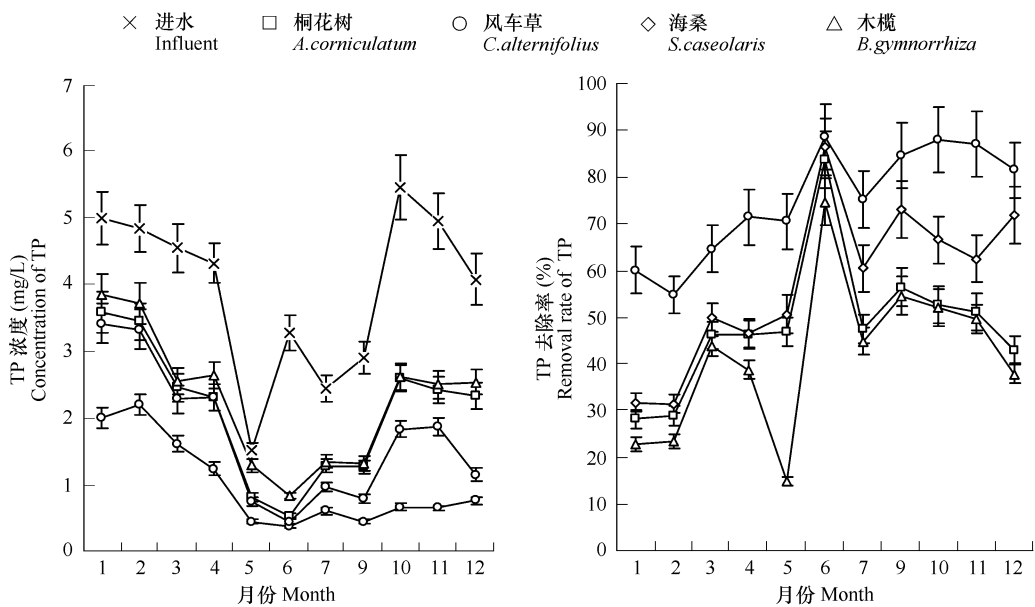


图3 人工湿地总磷的浓度变化及去除效果

Fig. 3 Variation of the concentration and removal effect of TP in constructed wetlands

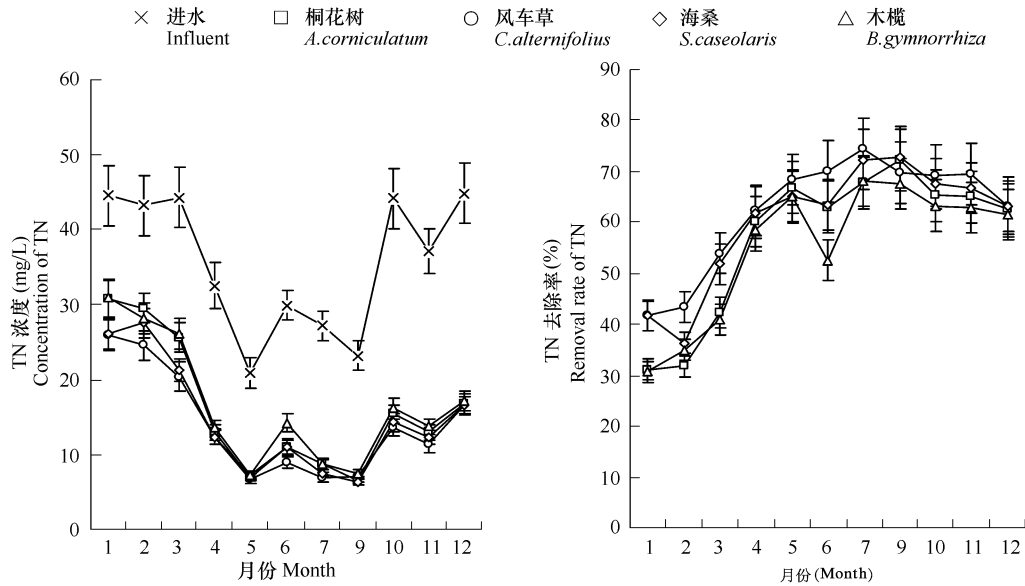


图4 人工湿地总氮的浓度变化及去除效果

Fig. 4 Variation of the concentration and removal effect of TN in constructed wetlands

2.2.5 人工湿地硝酸盐氮变化

图6 为人工湿地  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度变化情况 结果表明处理后各人工湿地出水浓度明显高于进水浓度。风车草、海桑、桐花树和木榄人工湿地全年的平均  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  出水浓度分别为 0.58、0.27、0.28mg/L 和 0.28mg/L ,其中风车草人工湿地  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度明显高于 3 种红树植物人工湿地 3 种红树植物处理组之间差异不显著。

污水  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  浓度较高 ,人工湿地中的硝化细菌通过硝化作用产生较多的  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  ,导致湿地中  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度上升。芦苇人工湿地系统出水  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  浓度高于进水 ,而有植物系统中又高于无植物的对照 ,表明湿地植物的存在有利于硝化作用 [23] 。

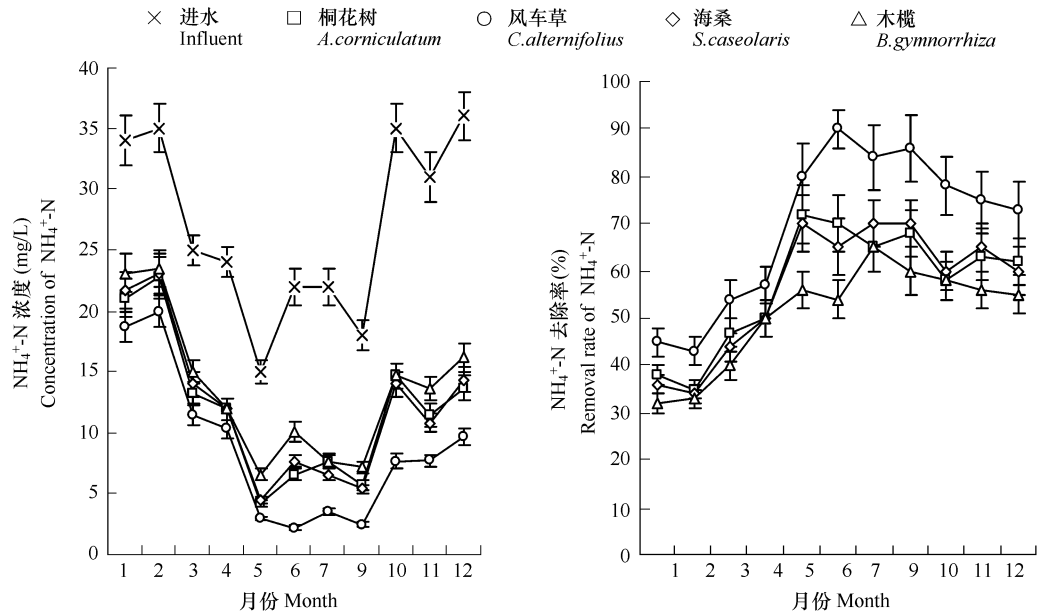


图5 人工湿地氨氮的浓度变化及去除效果

Fig. 5 Variation of the concentration and removal effect of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  in constructed wetlands

2.2.6 人工湿地对亚硝酸盐氮的净化效果

人工湿地中  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度变化及净化效果见图 7。亚硝酸盐氮的进水浓度很低,介于 0.09 ~ 0.4mg/L 之间,平均进水浓度只有 0.19mg/L,污水在人工湿地停留 3d 之后,出水中  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  浓度显著下降,平均出水浓度为 0.023mg/L。综合全年数据看来,各人工湿地对  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的平均去除率达到 84% 以上,不同的人工湿地的去除率的变化规律和数值大小非常接近。

2.2.7 不同人工湿地去除效果比较

根据 1 年的实验数据,计算不同人工湿地污水处理系统对污染物的去除率的平均值(表 1)。结果表明,风车草人工湿地与红树植物人工湿地相比,前者的  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除率明显大于后者 ( $P < 0.05$ ),而  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  的去除率没有差别。

3 种红树植物人工湿地中,  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  去除率没有显著差别,海桑人工湿地和桐花树人工湿地对  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TP、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率明显高于木榄人工湿地。在海桑和桐花树人工湿地比较方面,除 TP 去除率存在显著差异外,  $\text{BOD}_5$ 、 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 、TN 和  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  去除率没有显著差异。

总体上看,人工湿地对污染物的净化效果呈现风车草湿地 > 海桑湿地 ≈ 桐花树湿地 > 木榄湿地。

2.3 人工湿地水力停留时间与净化效果的关系

为了了解一个处理周期内不同的污水停留时间与各种污染物净化效果之间的关系,灌污后连续 3d 从各人工湿地池中采集水样进行分析,监测其中水质变化情况。

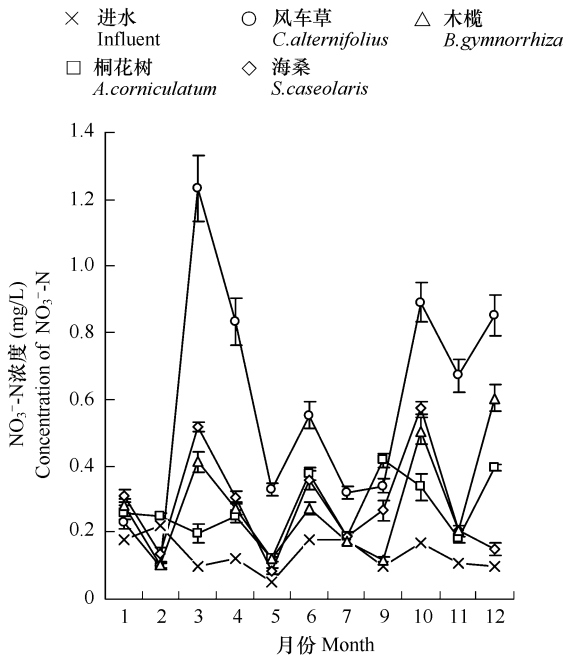


图6 人工湿地硝酸盐氮的浓度变化

Fig. 6 Variation of the concentration of  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  in constructed wetlands

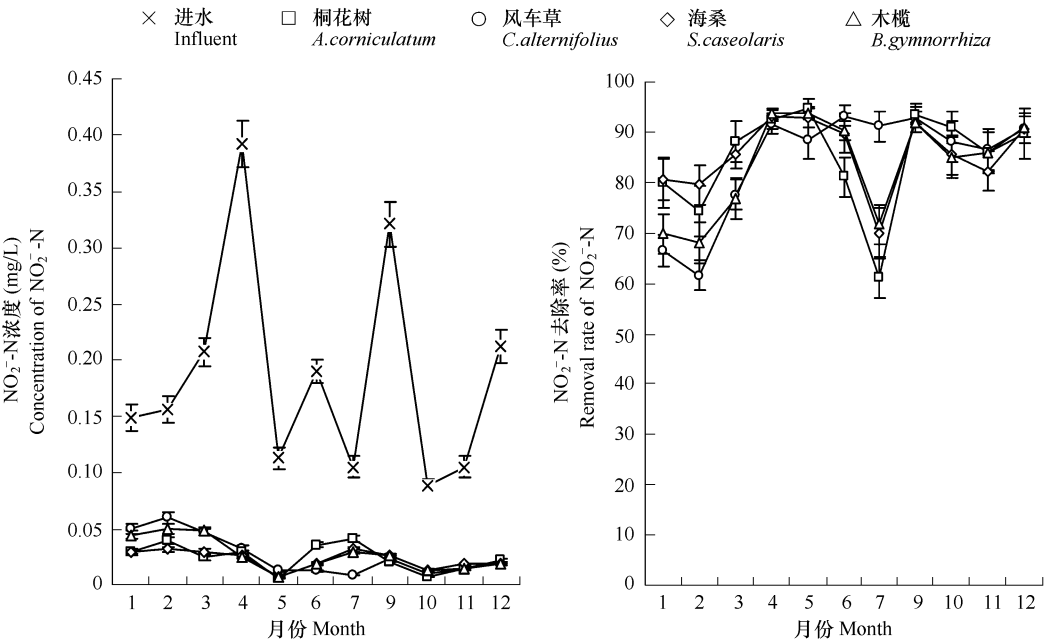


图7 人工湿地亚硝酸盐氮的浓度变化及去除效果

Fig. 7 Variation of the concentration and removal effect of NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N in constructed wetlands

表1 不同人工湿地去除效果比较

Table 1 Comparison of removal effect of different constructed wetlands

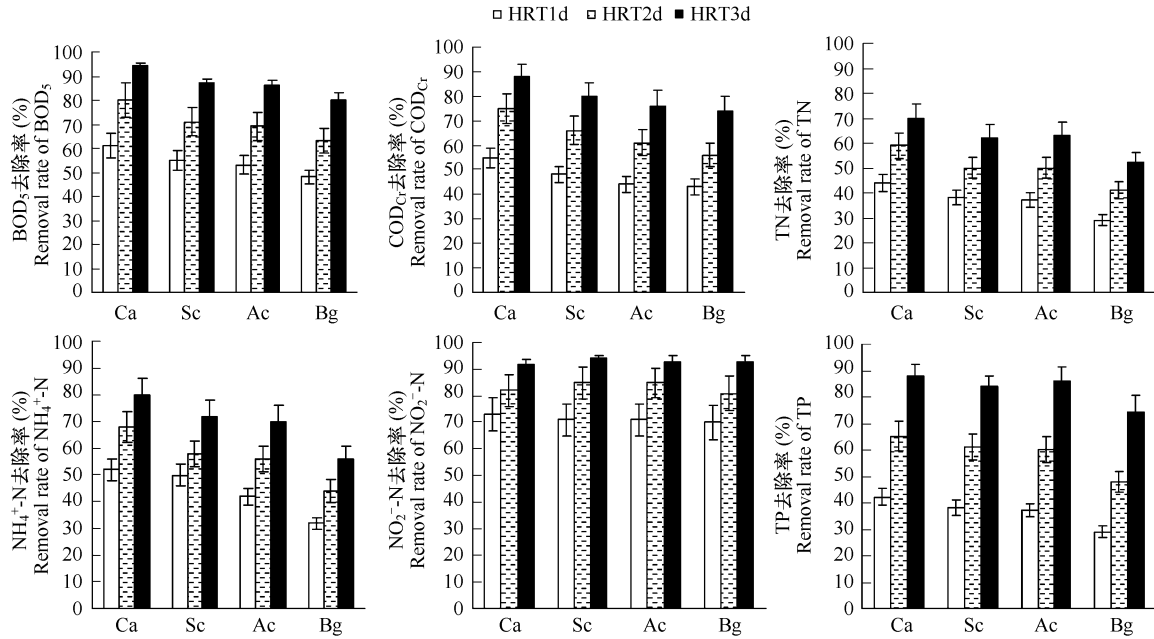
湿地类型 Wetland type	去除率 (%)Removal rate					
	BOD <sub>5</sub>	COD <sub>Cr</sub>	TN	TP	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N
风车草人工湿地 <i>C. alternifolius</i> constructed wetland	90.49 ± 7.30a	83.96 ± 7.33a	62.29 ± 11.18a	74.98 ± 11.83a	69.55 ± 16.81a	85.89 ± 12.28a
海桑人工湿地 <i>S. caseolaris</i> constructed wetland	87.61 ± 6.67b	73.00 ± 4.59b	60.21 ± 11.98ab	57.28 ± 17.19b	56.73 ± 13.57b	87.01 ± 8.72a
桐花树人工湿地 <i>A. corniculatum</i> constructed wetland	86.83 ± 7.02b	75.58 ± 5.65b	57.02 ± 14.6bc	48.19 ± 14.67c	57.09 ± 12.79b	85.06 ± 10.47a
木榄人工湿地 <i>B. gymnorrhiza</i> constructed wetland	83.58 ± 7.51c	71.34 ± 5.53c	55.04 ± 13.45c	41.51 ± 16.93d	50.82 ± 10.99c	84.45 ± 11.01a

数值为 11 个月的平均值 ± 标准差 , 同一组内同一列字母不同者表示在 5% 水平具有显著差异性 Values were means ± SD for 11 months , the different letter in the same list and in the same group indicated significant difference at *P* =0.05 level

单个处理周期内 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 在不同的水力停留时间的去除率见图 8。从图可以看出 , 去除率随水力停留时间的延长而增加。其中 BOD<sub>5</sub>、COD<sub>Cr</sub>、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 处理 1d 后 , 污染物浓度迅速下降 , 去除率达到了第 3 天去除率的 54% ~ 65% , 第 2 天达到了第 3 天的 73% ~ 84% ; NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 处理 1d 后 , 浓度下降更快 , 去除率达到了第 3 天的 70% ~ 81% , 第 2 天达到了第 3 天的 85% ~ 94% , 而 TP 处理 1d 后 , 浓度下降稍慢 , 去除率只有第 3 天的 39% ~ 50% , 第 2 天也只有第 3 天的 65% ~ 74%。

2.4 讨论

(1) 3 种红树植物人工湿地净化效果表明 (表 1) , 海桑人工湿地和桐花树人工湿地净化效果较好 , 木榄人工湿地效果较差。其中海桑和桐花树人工湿地对无机污染物 (氮和磷) 的去除率高出木榄人工湿地较多 , 主要是因为人工湿地污水处理系统海桑和桐花树生长速率明显快于木榄 [15] , 而无机氮和磷的去除主要与湿地



Ca 风车草 *C.alternifolius*; Sc 海桑 *S.caseolaris*; Ac 桐花树 *A.corniculatum*; Bg 木榄 *B.gymnorrhiza*

图 8 去除率与水力停留时间 (HRT) 的关系

Fig. 8 Relationship between removal rate and hydraulic retention time (HRT)

植物的吸收利用有关。但是,海桑和桐花树人工湿地对有机污染物的去除率高出木榄人工湿地较少,主要是因为人工湿地对有机污染物的去除主要是依靠基质颗粒表面形成的生物膜的吸收、吸附及厌氧、好氧生物的新陈代谢作用得以去除,本实验不同的湿地基质之间存在的差异不大。另外,本研究表明海桑人工湿地对污染物的净化效果与桐花树人工湿地相当,这是因为虽然人工湿地海桑生长快于桐花树,但同时海桑的凋落物量也大,凋落物中含有丰富的氮磷等营养物质,重新归还到环境中,其中的营养物也会同时随凋落物的分解而重新进入水、土环境,对水环境质量有一定的影响,是潜在影响红树植物人工湿地净化效果的一个因素<sup>[15]</sup>。

(2)一般来说,在不同的运行条件下,人工湿地对有机物的去除效果比较稳定,但对氮和磷的去除效果容易受各种因素的影响而不稳定,所报道的数据往往变化范围比较大<sup>[24]</sup>。本实验结果表明,一年中污水各污染物浓度有较大的变化,同时不同季节温度变化较大,各种人工湿地对 TP、TN、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 的去除率的标准差都达到 10 以上(表 1),说明进水中氮和磷的浓度变化及气候变化对氮、磷的去除率有较大的影响;而有机物的去除率的标准差均在 8 以下,全年比较稳定,说明进水中有机物的浓度变化及气候变化对有机物的净化效果影响不大,在一定程度上也说明人工湿地表现出抗废水有机负荷冲击的特点。廖新伟等<sup>[20-21]</sup>在冬季、夏季进行的试验结果表明,在猪场废水进水浓度变化较大的情况下,人工湿地对有机物一直保持比较高而稳定的去除率,而对氮磷的去除率变化较大。

(3)本实验研究结果表明,红树林人工湿地对污染物的去除率随着水力停留时间的延长而增加。停留时间延长,去除率提高,这一规律主要因湿地系统对污染物的生物作用所致<sup>[25]</sup>。对有植物的人工湿地系统而言,停留时间长的系统由于污水可在湿地系统内部经历更长时间的停留净化,有着更好的净化效果<sup>[26]</sup>。廖新伟等<sup>[20-21]</sup>利用香根草和风车草人工湿地处理猪场废水的研究结果表明,污水停留时间延长,去除率提高,去除规律符合指数方程规律。构建人工湿地时,一方面要考虑净化效果,同时也要考虑净化效率。停留时间太短,达不到净化要求;停留时间太长,不能充分发挥湿地的净化效率。

(4)由于实验条件所限,本研究的人工湿地为定期人工灌水,湿地系统处于相对静止状态,与实际运行的潜流型人工湿地有一定差别,因此红树植物人工湿地对污染物的净化效果有待进一步研究。另外,红树植物属于多年生木本植物,它们的净化作用随着植物的生长可能发生变化,因此本研究只是反映了特定生长阶段



的净化效果,其长期的净化效果有待进一步研究。

References :

[1 ] Lin P. Mangrove vegetation. Beijing :Ocean Press ,1984.4 — 34.

[2 ] Wong Y S ,Tam N F Y ,Lan C Y. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility :a field trial. Hydrobiologia ,1997 ,352 :49 — 59.

[3 ] Halmar H ,Peter V R ,Eric L P , *et al.* Assessing sediment removal capacity of vegetated and non-vegetated settling ponds in prawn farms. Aquacult. Eng. ,2003 ,27 :295 — 314.

[4 ] Huang F L ,Xia B C ,Dai X. Bacteria ecology in planting-culturing system. Chin. J. Appl. Ecol. ,2004 ,15 ( 6 ) :1030 — 1034.

[5 ] Sansanayuth P ,Phadungchep A ,Ngammontha S , *et al.* Shrimp pond effluent pollution problems and treatment by constructed wetlands. Water Sci. Technol. ,1996 ,34 ( 1 ) :93 — 98.

[6 ] Boonsong K ,Piyatiratitivorakul S ,Patanaponpaiboon P. Potential use of mangrove plantation as constructed wetland for municipal wastewater treatment. Water Sci. Technol. ,2003 ,48 ( 5 ) :257 — 266.

[7 ] Chu H Y ,Chen N C. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater. Water Sci. Technol ,1998 ,38 ( 1 ) :361 — 368.

[8 ] 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. Mar. Pollut. Bull. ,2001 ,42 ( 6 ) :513 — 521.

[9 ] Li M ,Zhang J H ,Chen G Z. Effects of chemical industrial wastewater on mangrove wetlands. Chongqing Environmental Sciences ,2003 ,25 ( 6 ) :21 — 24.

[10 ] Chen G Z ,Miao S Y ,Wong Y S , *et al.* Allocation , cycle and purged effects of nutrient pollutant in artificial wastewater in simulated *Kandelia candel* wetland system. Acta Science Circumstantiae ,1996 ,16 ( 2 ) :44 — 50.

[11 ] Miao S Y ,Chen G Z ,Huang Y S. Allocation and circulation of phosphorus in artificial wastewater within a simulated mangrove wetland system. Acta Ecologica Sinica ,1999 ,19 ( 2 ) :236 — 241.

[12 ] Chen G K ,Chen G Z. Phosphorus cycling in a simulated wastewater-affected mangrove (*Avicennia marina* ) wetland system. Acta Ecologica Sinica ,2005 ,25 ( 3 ) :627 — 632.

[13 ] Robertson A I ,Phillips M J. Mangroves as filters of shrimp pond effluent :predictions and biogeochemical research needs. Hydrobiologia ,1995 ,295 :311 — 321.

[14 ] Ye Y ,Tan F Y ,Lu C Y. Removal of livestock wastewater nutrient by mangrove systems. Acta Scientiae Circumstantiae ,2001 ,21 ( 2 ) :224 — 228.

[15 ] Jing Y X ,Ren Y L ,Chen G Z. Studies of eco-physiological characteristics of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system. Acta Ecologica Sinica ,2005 ,25 ( 7 ) :1612 — 1619.

[16 ] Jing Y X ,Ren Y L ,Yang D J , *et al.* Studies on resistant physiological characteristics of three mangrove species in constructed wetland sewage treatment system. Chin. J. Appl. Ecol. ,2006 ,17 ( 8 ) :1544 — 1546.

[17 ] Kantawanichkul S ,Pilaila S ,Tanapiyawanich W. Wastewater treatment by tropical plants in vertical-flow constructed wetland. Water Sci. Technol. ,1999 ,40 ( 3 ) :173 — 178.

[18 ] Neralla S ,Weaver R W ,Varvel T W , *et al.* Phytoremediation and on-site treatment of septic effluents in sub-surface flow constructed wetland. Environ. Technol. ,1999 ,20 ( 11 ) :1139 — 1146.

[19 ] Ayaz S C ,Akca I. Treatment of wastewater by constructed wetland in small settlements. Water Sci. Technol. ,2000 ,41 ( 1 ) :69 — 72.

[20 ] Liao X D ,Luo S M. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm. Chin. J. Appl. Ecol. ,2002 ,13 ( 1 ) :113 — 117.

[21 ] Liao X D ,Luo S M. Effects of constructed wetlands on treating with nitrogen and phosphorus in wastewater from hogger. Chin. J. Appl. Ecol. ,2002 ,13 ( 6 ) :719 — 722.

[22 ] Environmental Protection Agency of Nation. The Monitoring and Analytical Methods for Water and Wastewater (Fourth edition ). Beijing :China Environment Science Press ,2002 ,200 — 285.

[23 ] Wu Z B ,Cheng S P ,He F , *et al.* Design and purification performance of vertical flow constructed wetland. Chin. J. Appl. Ecol. ,2002 ,13 ( 6 ) :

715—718.

[24] William J M , Alex J H , Robert W N. Nitrogen and phosphorus retention in wetlands-ecological approaches to solving excess nutrient problems. *Ecol. Eng.* ,2000 ,14 :1—7.

[25] Sievers D M. Performance of four constructed wetlands treating anaerobic swine lagoon effluents. *Amer. Soc. Agric. Engin.* ,1997 ,40 (3) :769—77.

[26] Wu Z B , Ren M X , Fu G P , *et al.* The influence of hydraulic characteristics on wastewater purifying efficiency in vertical flow constructed wtlands. *Environmental Science* ,2001 ,22 (5) :45—49.

参考文献：

[1] 林鹏. 红树林. 北京 :海洋出版社 ,1984. 4~34.

[4] 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.

[9] 李玫,章金鸿,陈桂珠. 化工废水对红树林湿地的影响. *重庆环境科学* ,2003 ,25 (6) :21~24.

[10] 陈桂珠,缪绅裕,黄玉山,等. 人工污水中的 N 在模拟秋茄湿地中的分配循环及其净化效果. *环境科学学报* ,1996 ,16 (2) :44~50.

[11] 缪绅裕,陈桂珠,黄玉山,等. 人工污水中的磷在模拟秋茄湿地系统中的分配与循环. *生态学报* ,1999 ,19 (2) :236~241.

[12] 陈桂葵,陈桂珠. 白骨壤模拟湿地系统中磷的分配循环及其净化效应. *生态学报* ,2005 ,25 (3) :627~632.

[14] 叶勇,谭凤仪,卢昌义. 红树林系统处理牲畜废水营养盐的研究. *环境科学学报* ,2001 ,21 (2) :224~228.

[15] 靖元孝,任延丽,陈桂珠,等. 人工湿地污水处理系统 3 种红树植物生理生态特性. *生态学报* ,2005 25 (7) :1612~1619.

[16] 靖元孝,任延丽,杨丹菁,等. 人工湿地污水处理系统三种红树植物抗性生理特性研究. *应用生态学报* ,2006 ,17 (8) :1544~1546.

[20] 廖新梯,骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究. *应用生态学报* ,2002 ,13 (1) :113~117.

[21] 廖新梯,骆世明. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究. *应用生态学报* ,2002 ,13 (6) :719~722.

[22] 国家环保局. 水和废水监测分析方法 (第四版). 北京 :中国环境科学出版社 ,2002 ,200~285.

[23] 吴振斌,成水平,贺锋,等. 垂直流人工湿地的设计及净化功能初探. *应用生态学报* ,2002 ,13 (6) :715~718.

[26] 吴振斌,任明迅,付贵萍,等. 垂直流人工湿地水力学特点对污水净化效果的影响. *环境科学* ,2001 ,22 (5) :45~49.