

红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究

刘永, 张诗涵, 肖雅元, 吴鹏, 王腾, 李纯厚

引用本文:

刘永, 张诗涵, 肖雅元, 吴鹏, 王腾, 李纯厚. 红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1788–1799.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1478>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同处理梯度污水对细菌群落和酶活性的影响

吴晓斐, 何源, 黄治平, 张丹丹, 郑宏艳, 丁健

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2026–2035 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0155>

洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子

梁启斌, 侯磊, 李能发, 陈鑫, 王克勤

农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1585–1593 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1324>

水生植物对不同氮磷水平养殖尾水的综合净化能力比较

冯优, 陈庆锋, 李金业, 郭贝贝, 刘婷, 李磊

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2397–2408 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0816>

同步硝化反硝化菌(*Alcaligenes faecalis* WT14)养殖污水脱氮效果研究

陈均利, 张树楠, 戴桂金, 张苗苗, 吴金水, 刘锋

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1811–1817 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0325>

不同质量浓度硝态氮在潮白河模拟河床中去除效果研究

王西涵, 王莹, 刘云, 杨丽虎, 梁琼, 张茜茜, 王浚亦

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 144–152 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0635>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘永, 张诗涵, 肖雅元, 等. 红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1788–1799.

LIU Y, ZHANG S H, XIAO Y Y, et al. Efficiency of mangrove wetlands in nitrogen and phosphorus removal from wastewater[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(8): 1788–1799.



开放科学 OSID

红树林人工湿地的脱氮除磷效果研究

刘永^{1,3}, 张诗涵^{1,2}, 肖雅元^{1,3}, 吴鹏^{1,3}, 王腾^{1,3}, 李纯厚^{1,3*}

(1. 农业农村部南海渔业资源开发利用重点实验室, 广东珠江口生态系统野外科学观测研究站, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广州 510300; 2. 上海海洋大学, 上海 201306; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州), 广州 511458)

摘要:为探究红树林人工湿地对海水池塘尾水中氮(N)、磷(P)元素的净化作用,选择秋茄(*Kandelia candel*)、桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、红海榄(*Rhizophora stylosa*) 3种红树植物构建人工湿地系统。在试验进行的一个月内,以海水池塘养殖尾水中的N、P为参考,浇灌5、10、15倍和25倍N、P浓度的人工海水,序时收集出水口水样,分别测定不同形态的N、P营养盐含量。研究显示,在N、P浓度升高时,人工湿地系统对氨态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)的去除率下降,15倍浓度处理下秋茄对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果显著高于红海榄和桐花树($P<0.05$),红树植物处理组能使系统中硝态氮($\text{NO}_3^+\text{-N}$)浓度保持稳定,同时对水体中的亚硝态氮($\text{NO}_2^+\text{-N}$)始终有良好的去除效果。试验开始后的0~3 d,系统中磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)浓度显著下降,表现出对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 良好的去除效果。综合来看,红树林人工湿地对海水池塘养殖尾水中N、P的去除效果较好,可作为海水池塘养殖尾水达标排放的修复技术应用推广。

关键词:红树林;人工湿地;氮;磷;尾水净化

中图分类号:X714 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)08-1788-12 doi:10.11654/jaes.2021-1478

Efficiency of mangrove wetlands in nitrogen and phosphorus removal from wastewater

LIU Yong^{1,3}, ZHANG Shihan^{1,2}, XIAO Yayuan^{1,3}, WU Peng^{1,3}, WANG Teng^{1,3}, LI Chunhou^{1,3*}

(1. Key Laboratory of South China Sea Fishery Resources Exploitation & Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Observation and Research Station of Pearl River Estuary Ecosystem of Guangdong Province, South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Science, Guangzhou 510300, China; 2. Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Guangzhou), Guangzhou 511458, China)

Abstract: To assess the efficiency of mangrove wetlands in pollutant removal from mariculture pond wastewater, artificial wetland systems were constructed using seedlings of *Kandelia candel*, *Aegiceras corniculatum*, and *Rhizophora stylosa*. Artificial wastewater with different concentrations of nitrogen and phosphorus was loaded daily (5, 10, 15 times, and 25 times) in the constructed mangrove wetlands. The results showed that the removal rate of ammonia-nitrogen decreased with increasing nutrient concentration, and the removal efficiencies of *K. candel* were significantly higher than those of *R. stylosa* and *A. corniculatum* ($P<0.05$) under 15 times concentration treatment. All three mangrove seedlings showed a good removal efficiency of nitrite-nitrogen after a month of treatment with the constructed wetlands. However, the concentration of nitrate-nitrogen was relatively stable in the mangrove plant treatment system. Furthermore, phosphate concentrations

收稿日期:2021-12-23 录用日期:2022-02-21

作者简介:刘永(1982—),男,湖南湘潭人,博士,副研究员,主要从事渔业生态环境研究。E-mail:liuyong@scsfri.ac.cn

*通信作者:李纯厚 E-mail:chunhou@scsfri.ac.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2019YFD0901204);中国水产科学研究院南海水产研究所中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2017YB11,2021SD04);广东省基础与应用基础研究基金项目(2022A1515010896);广东省科技计划项目(2019B121201001);中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2020TD16)

Project supported: The National Key Research and Development Program of China (2019YFD0901204); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, SCSFRI, CAFS (2017YB11, 2021SD04); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2022A1515010896); Science and Technology Planning Project of Guangdong Province (2019B121201001); Central Public-interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD16)

decreased rapidly even after three days of treatment in the mangrove wetland systems. Overall, mangrove constructed wetlands, which exhibited a good removal efficiency of nitrogen and phosphorus from the wastewater of aquaculture ponds, can be widely applied in mariculture.

Keywords: mangrove; constructed wetland; nitrogen; phosphorus; wastewater purification

我国的水产品生产规模位居世界第一,并且是世界上唯一水产养殖规模超捕捞规模的国家^[1]。随着海水养殖业的快速发展,如果盲目扩大规模和投入,将会导致海水池塘养殖过程中放养密度不合理,养殖残饵或排泄物超过环境承载力等问题,养殖环境将不断恶化,生态负面效应将日益突出^[2-3]。含有大量N、P等营养元素的养殖尾水如果未经净化任意排放,将导致自身水体及邻近水域的富营养化等污染问题,同时会通过水环境问题的反馈作用极大限制海水养殖业的绿色健康发展^[4-5]。

近年来,我国高度重视产业发展带来的生态环境问题,走渔业生态优先发展道路,推进“绿色、生态”水产养殖迫在眉睫。2019年,国家十部委联合发布的《关于加快推进水产养殖业绿色发展的若干意见》指出,“养殖尾水生态净化”与“达标排放”等问题日益受重视,是推动水产养殖业绿色发展的重点和关键点。同时指出,应用生物净化、人工湿地等技术,可以有效推动养殖尾水资源化利用或达标排放^[6]。

当前,海水养殖尾水的净化处理主要有物理、化学和生物3种方法。物理方法包括过滤、沉淀、吸附、水体交换、机械增氧等,多应用于小型养殖池塘的污染处理(如高位虾塘的水体净化)^[7];化学处理方法包括氧化、混凝和离子交换等,短期内效果较好,但成本高且容易造成二次污染^[8];生物修复方法是利用生态系统中各种生物间的互利、协作和共生关系,直接或间接地调控和修复环境,具有成本低、效果好等特点,主要包括动物修复^[9-10]、微生物修复^[11]、植物修复^[12]和生物修复体系技术^[13-14]4个类型。生物修复体系技术中的人工湿地(Constructed wetland)修复技术因具有低成本、高生态效益的综合优势而被广泛应用^[10]。

红树林是热带亚热带海岸带的典型生态系统之一,红树植物具有强大的根系,目前已被广泛应用于生活污水中生源要素(N和P)、重金属、多环芳烃等持久性污染物的生物修复^[12,14]。红树植物具有一定的耐盐性,因此适宜对具有一定盐度的海水池塘养殖尾水进行修复。本研究聚焦红树林人工湿地,以华南地区常见的红树植物——桐花树(*Aegiceras corniculatum*)、秋茄(*Kandelia candel*)和红海榄(*Rhizophora sty-*

losa)为研究对象,设置N和P的不同浓度废水开展室内模拟试验,研究红树林人工湿地对养殖尾水中N、P的去除效果,为应用红树林人工湿地开展海水池塘养殖尾水净化提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 试验植物

在广州市番禺区海鸥岛红树林区苗圃采集6~8月龄的桐花树(*A. corniculatum*)、秋茄(*K. candel*)和红海榄(*R. stylosa*)幼苗,在实验室人工气候箱中适应性培育3个月后,选取大小相近、生长状况良好的树苗进行试验。

1.1.2 供试基质

试验采用沙质培养,供试基质采自广州市花都区某河道。基质采集并运送至基地后,用大量清水冲洗5次,再用纯净水浸泡48 h(尽量消除试验沙携带的营养物质对试验产生的干扰),沥水后自然风干,过80目筛,备用。

1.1.3 供试试剂

试验处理、植物浇灌所需试剂均为分析纯及以上等级。试验浇灌用人工海水使用海宝牌生态海水盐配制,盐度为20‰;氨态氮(NH_4^+-N)系列溶液成分分析标准物质(GBW08631-GBW08633)、硝态氮(NO_3^--N)系列溶液成分分析标准物质(GBW08634-GBW08637)、亚硝态氮(NO_2^--N)系列溶液成分分析标准物质(GBW08638-GBW08641)和磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$)溶液标准物质(GBW08623)采购于自然资源部第二海洋研究所。

1.1.4 试验仪器

试验仪器包括爱拓PAL-06S海水盐度计、力辰LC-MSH-PRO磁力搅拌器、良平JA10003电子天平、禾木5110-500游标卡尺、东南RDZ-1000D-4人工气候箱、DGX-9073电热恒温鼓风干燥箱、密理博WP6122050真空泵、岛津UV-2550紫外分光光度计、Lachat QuikChem 8500S2流动注射分析仪。

1.2 试验方法

1.2.1 试验装置

试验用湿地系统由底部装有出水阀、尺寸规格为

30 cm×30 cm×35 cm(长×宽×高)的PE种植箱构成,每个种植箱内种植4株红树植物苗,每棵植物根部用根际袋套住,用过80目网筛的沙作为基质填充20 cm深(图1)。试验分为4组,包括桐花树组、秋茄组、红海榄组和空白组(不种植红树植物),每组设置4个平行处理。

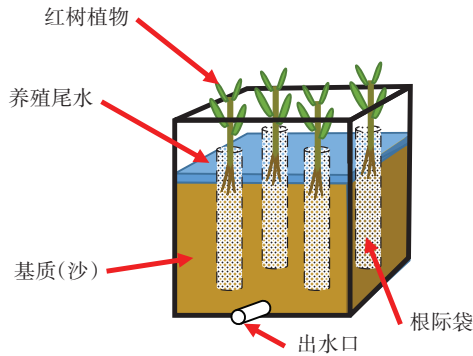


图1 试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of the experiment

1.2.2 试验处理

为研究红树林人工湿地系统对养殖尾水中N和P营养元素的去除效果,试验以海水池塘养殖尾水的N和P浓度为参考($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均浓度分别为4.53、0.50、0.80 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和0.33 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$),平均盐度为20‰^[15]。经预处理试验后,分别设置5、10、15、25倍4个浓度组开展脱氮除磷试验(表1)。同时设置只浇灌营养液的对照组(CK),以对植物生长指标进行比较。

试验初始,向每个种植箱分别浇灌5 L不同N和P浓度的人工尾水(盐度设定为20‰),使水位保持略高于基质,并在种植箱外对水位标记刻度,每2 d用营养液对种植箱水位进行补充,使水位保持于刻度线处。室内试验周期为30 d,试验温度和相对湿度范围分别设置为25~32 ℃和70%~90%。

1.2.3 营养液配制

以稀释至20‰的人工海水为溶剂,配制10%浓

度的植物浇灌用营养液: CaCl_2 4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 KCl 6 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 MgSO_4 10 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 H_3BO_4 46 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 ZnSO_4 1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 CuSO_4 0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 MnSO_4 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 H_2MoO_4 0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 Fe(II)-EDTA 50 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。试验期间,营养液中不再添加N和P,用HCl或NaOH调整pH在6.5左右^[16]。

1.3 指标测定

试验过程中,分别在第3、6、9、14、19、24、29天于种植箱的出水口采集150 mL水样,用Whatman玻璃微纤维滤膜(47 mm, GF/B)过滤后,收集滤液,使用流动注射分析仪(Flow-injector analyser, FIA)对滤液中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 等营养盐浓度进行测定^[17]。总无机氮(DIN)浓度为 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度之和。试验结束后收获植物,用大量自来水冲洗根、茎、叶,再用蒸馏水充分淋洗,用滤纸吸干植物表面水分,植物的茎高和直径分别采用直尺和游标卡尺进行测量^[16]。

1.4 数据处理与分析

试验数据用平均值±标准差(mean±SD)表示。使用SPSS 22.0软件分析,在95%的置信区间下进行One-way ANOVA分析和LSD差异显著检验。不同处理组间的差异显著性采用配对样本进行评价。采用Excel和Origin 2021进行分析与绘图。

数据处理中去除率计算公式为:

去除率=(营养盐初浓度-营养盐终浓度)/营养盐初浓度×100%

2 结果与分析

2.1 红树植物的生长状况

对各组3种红树植物的株高增量进行分析,结果表明(图2):不同N和P浓度的人工尾水处理30 d后,各处理组的桐花树、秋茄和红海榄均能正常生长,其中桐花树的生长状况最佳;桐花树和秋茄株高增量在15倍浓度处理下达到最高值,红海榄株高增量在25倍浓度处理下达最高值;在各浓度处理下,3种红树

表1 人工尾水中的N和P浓度设置($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

Table 1 Concentration of nitrogen and phosphorus in different treatments by artificial sewage ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

营养盐 Nitrogen and phosphorus	5倍组 5 times concentration	10倍组 10 times concentration	15倍组 15 times concentration	25倍组 25 times concentration
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	22.75	45.50	69.95	113.25
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	2.50	5.00	7.50	12.50
$\text{NO}_2^-\text{-N}$	4.00	8.00	12.99	20.00
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	1.65	3.30	4.95	8.25

植物中,桐花树的茎高增量最显著。

2.2 对不同浓度 NH₄⁺-N 的净化效果

在试验开始后的第3、6、9、14、19、24、29天,分别对滤出液中的NH₄⁺-N浓度进行分析测定,结果发现(表2和图3):在试验处理期间,3种红树植物处理组和空白组的人工尾水中NH₄⁺-N浓度显著下降,在5倍和10倍浓度处理下,红树植物处理组的NH₄⁺-N去除率显著高于空白组($P<0.05$),但在25倍浓度处理下,红树植物处理组与空白组对NH₄⁺-N去除率差异不显

著($P>0.05$);随着处理浓度的增大,各植物处理组对NH₄⁺-N的去除率呈现不同程度的下降;种植红树植物的处理组NH₄⁺-N去除率为62.3%~99.2%;在5倍浓度处理下,3种红树植物组在第9天对NH₄⁺-N的去除率达到80%,之后NH₄⁺-N浓度均维持在较低的水平;15倍浓度处理下,秋茄组的NH₄⁺-N浓度最低,净化效果最显著。

2.3 对不同浓度 NO₃⁻-N 的净化效果

在试验开始后的第3、6、9、14、19、24、29天,分别

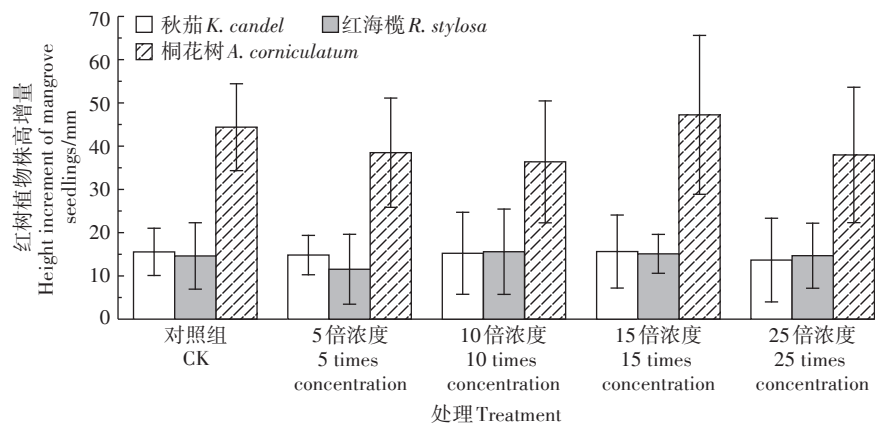


图2 不同浓度尾水处理下红树植物株高增量

Figure 2 The height increment of mangrove seedlings in different treatments by artificial sewage

表2 红树林人工湿地系统对海水养殖尾水中N和P的去除率(%)

Table 2 Removal rate of constructed mangrove wetland system on nitrogen and phosphorus from artificial sewage (%)

处理 Treatment		NH ₄ ⁺ -N	NO ₃ ⁻ -N	NO ₂ ⁻ -N	PO ₄ ³⁻ -P
5 倍组 5 times concentration	空白 Control	58.7±8.2b	N.A.	N.A.	97.9±0.1a
	秋茄 <i>K. candel</i>	97.7±0.4a	N.A.	98.4±1.6a	98.3±0.4a
	红海榄 <i>R. stylosa</i>	97.9±0.1a	N.A.	95.4±3.3a	98.7±0.4a
	桐花树 <i>A. corniculatum</i>	97.8±0.3a	N.A.	98.7±0.2a	98.5±0.5a
10 倍组 10 times concentration	空白 Control	67.8±2.2c	N.A.	N.A.	98.2±0.9a
	秋茄 <i>K. candel</i>	99.2±0.3a	N.A.	99.7±0.1a	98.2±0.1a
	红海榄 <i>R. stylosa</i>	95.5±0.4b	N.A.	94.2±1.9b	98.9±0.6a
	桐花树 <i>A. corniculatum</i>	95.8±0.8b	N.A.	99.6±0.2ab	99.0±0.3a
15 倍组 15 times concentration	空白 Control	89.0±7.1b	N.A.	N.A.	98.8±0.6a
	秋茄 <i>K. candel</i>	95.9±0.7a	22.9±10.6a	99.3±0.7a	99.1±0.1a
	红海榄 <i>R. stylosa</i>	73.8±2.9c	10.6±21.7a	85.8±11.6a	98.0±1.4a
	桐花树 <i>A. corniculatum</i>	62.3±6.8d	12.6±18.1a	98.7±0.5a	98.7±0.7a
25 倍组 25 times concentration	空白 Control	79.8±11.3a	N.A.	N.A.	98.2±0.5a
	秋茄 <i>K. candel</i>	81.2±0.8a	10.4±13.2b	86.0±3.9a	98.9±0.7a
	红海榄 <i>R. stylosa</i>	79.7±1.8a	43.9±10.7a	73.2±10.8a	99.2±0.5a
	桐花树 <i>A. corniculatum</i>	82.9±2.5a	38.9±9.5a	35.5±10.3b	97.8±1.3a

注:数据为平均值±标准差(n=4),同一处理浓度组不同字母代表不同试验组间差异显著($P<0.05$);N.A.代表试验后浓度高于初浓度,不适用于计算去除率。

Note: Data are shown as the mean ± standard deviation (n=4); different letters in the same column and same group are significantly different at $P<0.05$, as determined by the LSD test. N.A. indicates that the concentration after the experiment was higher than the initial concentration, which is not suitable for calculating the removal rate.

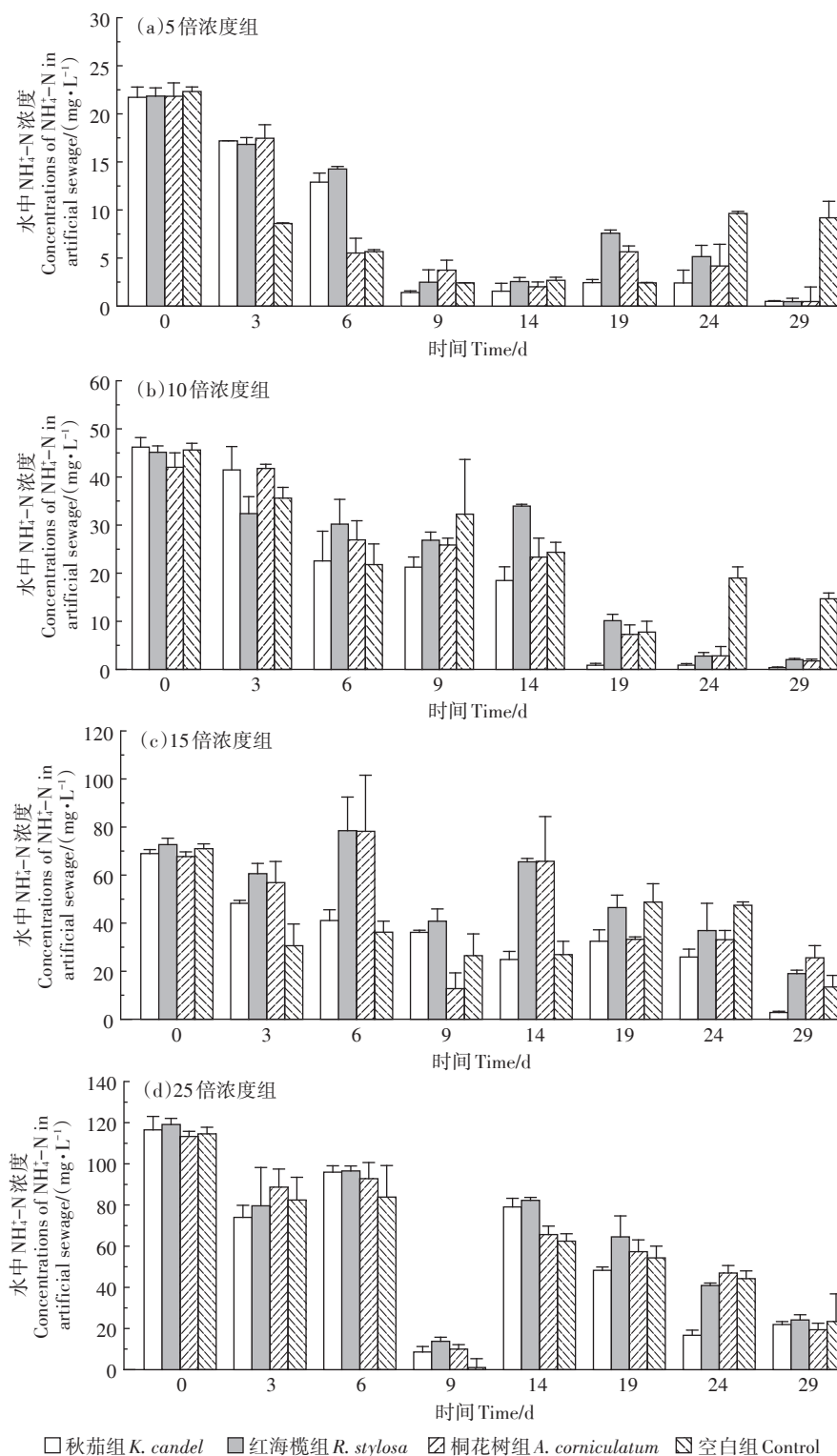


图3 红树植物对不同浓度 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果

Figure 3 Removal efficiency of constructed mangrove wetland system on different concentrations of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in artificial sewage

对滤出液中的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度进行分析,结果发现(表2和图4):试验前期 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度出现上升趋势,随着时间推移,在不同浓度处理下3种红树植物组中的

$\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著下降($P<0.05$);整个试验周期中,空白组中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈现不规则上升趋势;3种红树植物处理组的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度显著低于空白组($P<0.05$),其

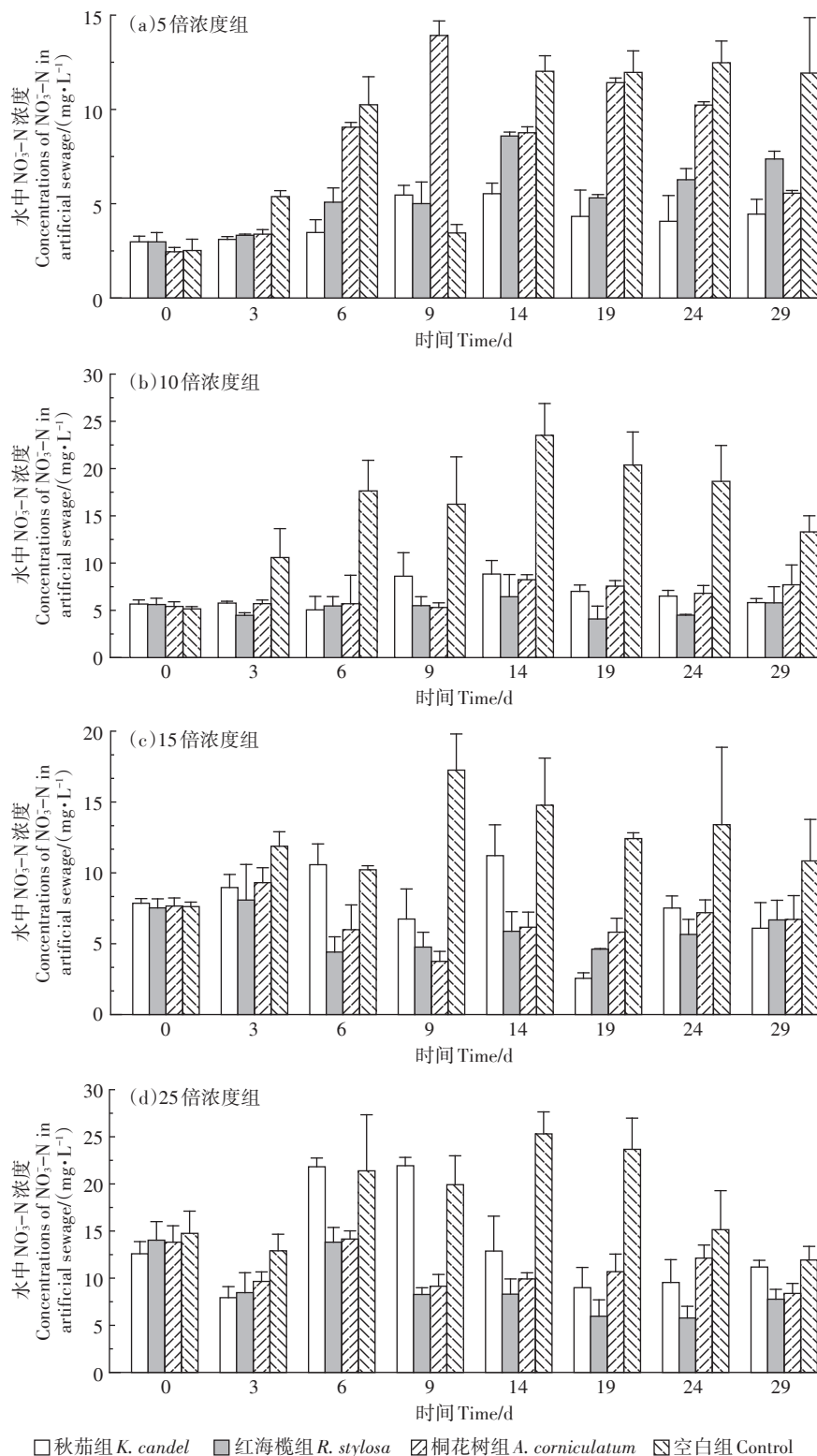


图4 红树植物对不同浓度 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的去除效果

Figure 4 Removal efficiency of constructed mangrove wetland system on different concentrations of $\text{NO}_3\text{-N}$ in artificial sewage

中10倍浓度组最为显著($P<0.05$)。

2.4 对不同浓度 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的净化效果

在试验开始后的第3、6、9、14、19、24、29天,对滤

出液中的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度进行分析,结果发现(表2和图5):试验期间,空白组人工尾水的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 浓度呈现升高趋势,并且维持在高于初始浓度的水平,而红树植

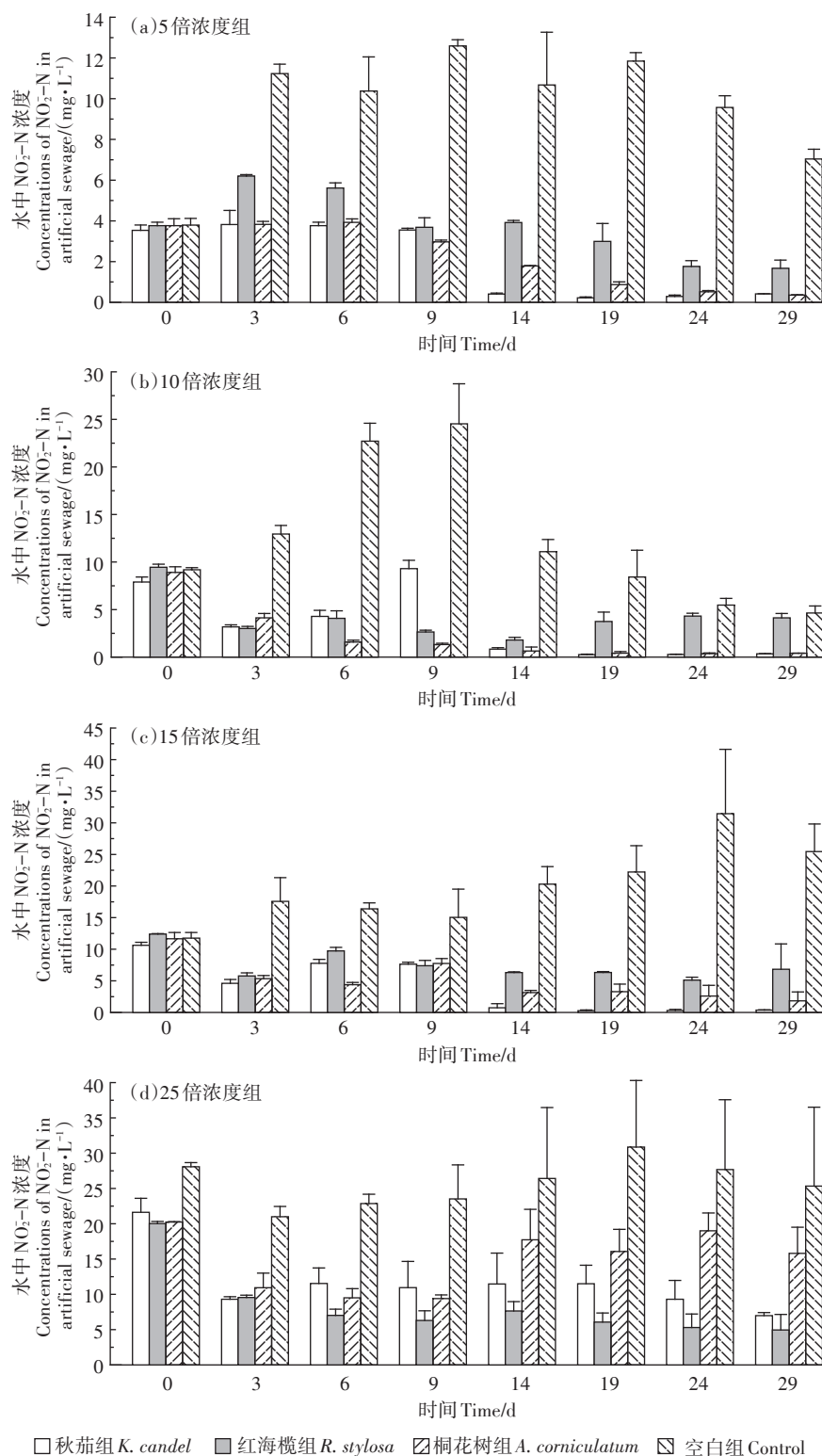


图5 红树植物对不同浓度 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除效果

Figure 5 Removal efficiency of constructed mangrove wetland system on different concentrations of $\text{NO}_2\text{-N}$ in artificial sewage

物组的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的浓度显著下降;在5倍和10倍浓度处理下,秋茄和桐花树对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除效果高于红海榄;在25倍组处理下,秋茄、红海榄对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的

去除效果高于桐花树($P<0.05$),秋茄、红海榄和桐花树对 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的去除率分别达到86.0%、73.2%和35.5%。

2.5 对不同浓度 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的净化效果

在试验开始后的第3、6、9、14、19、24、29天,分别对滤出液中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 进行分析,结果表明(表2和图

6):试验开始的前3 d内,各处理组中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度迅速下降,5倍和10倍浓度处理下,红树植物组在第3天后达到动态平衡,第29天各系统去除率均达到

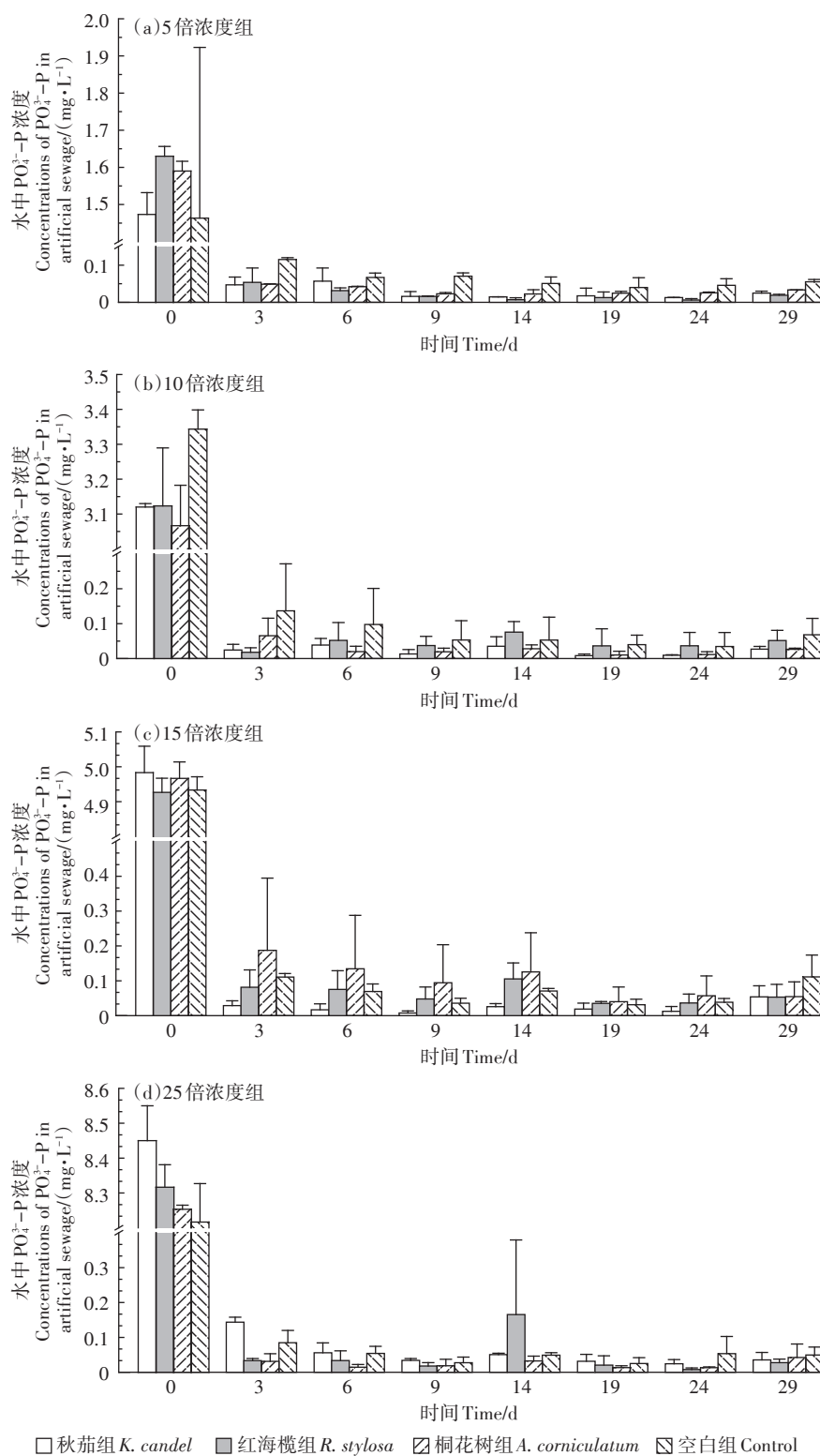


图6 红树植物对不同浓度 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除效果

Figure 6 Removal efficiency of constructed mangrove wetland system on different concentrations of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ in artificial sewage

97%以上;红树植物处理组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率高于空白组,各种红树植物组间对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率无显著差异($P>0.05$)。

3 讨论

3.1 人工湿地对水体N和P的净化效应

人工湿地由人工模拟自然湿地建造和控制,是由土壤-植物-底栖生物-微生物形成的生态系统,是通过过滤、吸附、沉淀、离子交换、植物吸收和微生物降解等途径实现污水高效净化处理的一种新型废水处理技术^[18]。在人工湿地处理技术中,污染物的净化主要通过植物吸收、微生物代谢降解、固体颗粒物沉淀、植物根部过滤和生源要素被土壤和基质吸附等途径完成^[19]。

应用红树林构建人工湿地生态系统净化人工污水的研究已有较长历史,且许多模拟试验取得了较为显著的研究成果。有研究者利用香港西径的红树林底泥和深圳福田红树林底泥与秋茄、白骨壤(*Avicennia marina*)和桐花树建造了两条180 m长的样带处理人工污水,结果发现,随着处理时间的延长,污水中总磷含量显著下降,在靠近出水口的位置,总有机碳、总氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 也都得到有效去除^[19];应用白骨壤对人工污水处理中也发现,N和P的去除效果较好^[20-21];在对人工污水处理时还发现,人工污水中的总氮、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 可有效促进秋茄、白骨壤和桐花树等红树植物地上部分的生长,同时也会被红树林人工湿地有效去除^[22]。以上说明水环境中的N和P元素可以被湿地植物有效吸收和利用,人工湿地对水体N和P具有较好的净化作用。

3.2 人工湿地对养殖尾水的生态净化作用

海水池塘养殖尾水中的N和P等元素可被湿地植物吸收利用,并且促进湿地植物的生长,一定浓度的N可有效促进湿地植物的茎、叶生长^[23-24]。在对木榄(*Bruguiera gymnorrhiza*)的研究中发现,N元素可以显著提高植物的耐盐性,且 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可显著促进其地上部分的生长^[25];在一定浓度范围内,增加 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 可显著提高白骨壤地上部分的生物量^[26];有研究还发现,N、P浓度的升高,可显著提高海榄雌属红树植物*Avicennia germinans*的叶片面积、数量,并有效促进其生长^[27]。在本研究中,试验开始前适应性生长阶段的营养液中的N水平较低,试验添加N元素后的前几天,植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收利用率较高,在处理第9天时 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 下降到较低水平,而较低的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度

和湿地的基质缺氧条件相互作用,可能会促进反硝化作用,使得 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度在这一拐点后有一定程度上升并维持在一个相对平衡的浓度水平。可见,在一定浓度范围内,通过增加N和P浓度,可以有效促进红树植物的吸收利用和生长。

有研究者通过设计的人工湿地系统处理海水养殖尾水,发现系统对N的去除在处理一个月后即有明显效果,在连续7个月的运行过程中, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到86%~98%、总无机氮的去除率达到95%~98%,出水口各形态N的含量均能满足养殖用水的要求^[28]。本研究也发现,3种红树植物对人工模拟的各浓度养殖尾水中的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率为62%~99%,试验3 d内,人工尾水中的 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率在80%以上。然而,在不同浓度的处理下,红树林人工湿地对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除具有一定的临界值。在15倍浓度处理组中,空白组对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率高于红海榄和桐花树,在25倍浓度处理组中,空白组对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率与3种红树植物组无显著差异,这说明红海榄和桐花树在15倍浓度处理下,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸收去除已达到饱和状态,秋茄在25倍浓度处理下达到饱和;在10、15、25倍浓度下,空白组对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的去除率与3种红树植物组虽无显著差异,但去除率均可达到95%以上。由此可见,构建人工湿地生态系统时,可通过湿地植物对N、P等营养元素的需求来达到净化养殖尾水的效果,但在实际应用过程中,为达到最佳去除效果,应考虑尾水中N、P浓度的临界值。

3.3 不同类型人工湿地对海水养殖尾水的生态净化比较

人工湿地技术具有较低的构建成本和较高的生态效益,因此被越来越广泛地应用于海水池塘养殖尾水的生态净化。应用不同种类湿地植物构建人工湿地对海水养殖尾水的处理效果已有广泛的研究工作基础^[29-34](表3)。在低盐(盐度0~5‰)环境下,芦苇(*Phragmites australis*)、美人蕉(*Canna indica*)、香蒲(*Typha latifolia*)等构建的人工湿地对N和P的净化效果良好,当盐度超过10‰时,其对N和P的吸收利用受到高盐度的限制,N和P的去除效果随盐度增加显著下降。然而,碱蓬(*Suaeda glauca*)与红树植物秋茄、白骨壤、桐花树和红海榄在10‰~20‰盐度的海水中表现出良好的净化效果,但当盐度高于30‰时,也会出现较明显的盐胁迫生理响应^[31,35-36]。本研究选取的3种红树植物均为多年生木本植物,应用其构建人工湿地处理尾水过程中,凋落物相对比盐生草本植

物少,N和P的重新释放率相对较低^[31,36]。在相同的红树植物处理下,不同生长阶段的植物,对N和P的净化效能具有一定的差异(表3),这可能与植物生长过程中对N和P的吸收利用效率直接相关。

本研究也发现,红树植物对水体中N和P的去除率随着处理浓度的上升而显著下降,处理效率会出现一定程度的饱和。N素特别是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 是海水养殖过程中最容易产生的有毒害作用的物质,必须重点控制^[33]。在适宜的盐度条件下,大多数湿地植物系统对养殖尾水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率在90%以上,具有较好的净化效果^[37]。结合本研究的试验结果,3种红树植物处理N和P的临界值为10倍浓度,其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率分别为

95.5%~99.2%、94.2%~99.7%和98%以上,其中秋茄的效果最佳,其对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平均去除率分别为99.2%、99.7%和98.2%,即使处理10倍浓度的养殖尾水,净化后仍可达标排放。本研究构建的红树林人工湿地处理了5 L盐度为20‰的10倍养殖尾水,采用44棵 $\cdot\text{m}^{-2}$ (在30 cm $\times$ 30 cm面积中种植4棵)密度种植一年苗龄的秋茄,若构建100 m²的表面流人工湿地,1个月左右可使55.56 t海水池塘养殖尾水实现达标排放,具有一定的示范价值。然而,若要进一步提高净化效率,还应在红树植物种类搭配、苗龄选择、基质类型选择等方面深入研究。由此可见,开展红树植物人工湿地对海水池塘养殖尾水脱氮除磷具有一定的应用前景。

表3 不同人工湿地植物对海水废水的处理效果

Table 3 Purification efficiency of constructed wetland with different plants on marine sewage

植物种类 Specy	TN		TP		$\text{NH}_4^+\text{-N}$		$\text{NO}_3^-\text{-N}$		$\text{NO}_2^-\text{-N}$		$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$		盐度 Salinity/ ‰	实验时间 Experiment time/d	植物年龄 Growth age of plants
	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%	浓度 Concentration/ (mg $\cdot\text{L}^{-1}$)	去除率 Removal rate/%			
芦苇 ^[32,34] <i>P. australis</i>	4.5	≈20	2.5	>90	1.5	>99	2.5	24.0					5	7	未注明
	11.0	≈20	4.0	83.4	5.5	>99	5.0	21.0							
	0.1~1.0	53.60			0.23~0.71	84.99	0.4~0.6	38.42	0.1	60.92			20	30	未注明
美人蕉 ^[34] <i>C. indica</i>	4.5	>90	2.5	>90	1.5	>99	2.5						5	7	未注明
	11.0	>90	4.0	>90	5.5	>99	5.0								
香蒲 ^[30] <i>T. latifolia</i>	4.5	≈50	2.5	>90	1.5	>99	2.5	≈50					5	7	未注明
	11.0	≈20	4.0	>90	5.5	>99	5.0	≈20							
碱蓬 ^[29] <i>S. glauca</i>	35.0	90.8	5.0	98.5	30.0	>90	10.0	>90					20	140	新萌发幼苗
		62.14	6.0	73.05	1.5	93.94							20	60	
白骨壤 ^[33] <i>A. marina</i>	26.7	77.19~ 84.66	4.5	82.88~ 87.14	21.6	91.63~ 97.98	0.11		0.02				20	18	幼苗
			2.68	91.42	0.89	>95			3.61				20	30	幼苗
桐花树 <i>A. corniculatum</i>					22.75	97.8	2.50		4.00	90.5	1.65	97.9	20	29	一年幼苗
					45.50	95.8	5.00		8.00	95.4	3.30	99.1			
					69.95	62.2	7.50	12.4	12.00	84.3	4.95	98.9			
					113.3	82.9	12.5	39.3	20.00	21.3	8.25	99.5			
秋茄 ^[31,33] <i>K. candel</i>			2.68	71.64	0.89	>95	0.11		3.61				20	30	幼苗
	1.46	52.56			1.44	63.89			0.31	61.23	0.14	36.4		60	大苗
					22.75	97.7	2.50		4.00	88.3	1.65	98.3	20	29	一年幼苗
					45.50	99.2	5.00		8.00	95.5	3.30	99.1			
					69.95	95.9	7.50	23.1	12.00	96.6	4.95	98.9			
					113.3	81.2	12.5	10.0	20.00	67.7	8.25	99.6			
红海榄 <i>R. stylosa</i>					22.75	97.8	2.50		4.00	55.6	1.65	98.8	20	29 d	一年幼苗
					45.50	95.5	5.00		8.00	56.2	3.30	98.3			
					69.95	73.8	7.50	11.1	12.00	44.8	4.95	98.9			
					113.3	79.7	12.5	43.8	20.00	75.3	8.25	99.7			

注:蓝色底纹中数值为本次试验所测数据。

Note: The values in the blue shading are the date measured in current study.

4 结论

(1)不同N和P浓度的人工尾水处理30 d,桐花树、秋茄、红海榄3种红树植物生长良好,其中桐花树的生长状况显著优于秋茄和红海榄。

(2)在一定浓度范围内,红树林人工湿地对养殖尾水中N和P具有较好的修复效果。3种红树植物中,秋茄的脱氮除磷效果最好。

(3)结合红树林植物对N、P的去除率和对盐度的适应能力,红树林人工湿地可作为海水池塘养殖尾水达标排放的应用技术推广至实际生产中。

参考文献:

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2021年中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021. Fisheries Bureau, Ministry of Agriculture and Rural Affairs. China fishery statistical yearbook (2021) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2021.
- [2] 王小平, 贾晓平, 周国君, 等. 大鹏湾南澳水域氮磷及溶解氧的分析研究[J]. 海洋通报, 1994, 13(1): 44-50. WANG X P, JIA X P, ZHOU G J, et al. Nitrogen, phosphorus and dissolved oxygen in Nan'ao waters of Dapeng Bay[J]. *Marine Science Bulletin*, 1994, 13(1): 44-50.
- [3] 何国民, 卢婉嫻, 刘豫广, 等. 海湾网箱渔场老化特征分析[J]. 中国水产科学, 1997, 4(5): 76-80. HE G M, LU W X, LIU Y G, et al. Analysing on the degradational characteristics of caged fish culture of a bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1997, 4(5): 76-80.
- [4] 李金亮, 陈雪芬, 赖秋明, 等. 凡纳滨对虾高位池养殖氮、磷收支研究及养殖效果分析[J]. 南方水产科学, 2010, 6(5): 13-20. LI J L, CHEN X F, LAI Q M, et al. Study on nitrogen and phosphorus budgets and production performance in higher-place pond of *Litopenaeus vannamei*[J]. *South China Fisheries Science*, 2010, 6(5): 13-20.
- [5] 鲍旭腾, 徐皓, 张建华, 等. 水产养殖面源污染控制的佳管理实践[J]. 南方水产科学, 2012, 8(3): 79-86. BAO X T, XU H, ZHANG J H, et al. Best management practices for controlling aquaculture non-point pollution[J]. *South China Fisheries Science*, 2012, 8(3): 79-86.
- [6] 陈家勇. 抓住机遇加快推进水产养殖业绿色发展[J]. 中国渔业质量与标准, 2019, 9(4): 1-4. CHEN J Y. Seize opportunities to accelerate the green development of aquaculture[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2019, 9(4): 1-4.
- [7] 王如定. 海水养殖对环境的污染及其防治[J]. 浙江海洋学院学报: 自然科学版, 2003, 22(1): 60-62. WANG R D. The environmental pollution by marine culture and its appropriate prevention and cure[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University: Natural Science*, 2003, 22(1): 60-62.
- [8] 周华, 孙建岐. 水产养殖业的水处理技术综述[J]. 渔业现代化, 2000(4): 27-29. ZHOU H, SUN J Q. Summary of water treatment technology in aquaculture industry[J]. *Fishery Modernization*, 2000(4): 27-29.
- [9] 阳承胜, 束文圣, 蓝崇钰. 矿业废弃地生态恢复的土壤生物肥力[J]. 生态科学, 2000, 19(3): 73-78. YANG C S, SHU W S, LAN C Y. Soil biological fertility for ecological restoration of mining wasteland[J]. *Ecological Science*, 2000, 19(3): 73-78.
- [10] 黄铭洪. 环境污染与生态恢复[M]. 北京: 科学出版社, 2003. HUANG M H. Environmental pollution and ecological restoration[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [11] RISER-ROBERTS E. Remediation of petroleum contaminated soil: Biological, physical, and chemical processes[M]. Boca Raton: Lewis Publications, 1998.
- [12] TAM N F Y, WONG Y S. Effectiveness of bacterial inoculum and mangrove plants on remediation of sediment contaminated with polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 57: 716-726.
- [13] HORNE A L. Phytoremediation by constructed wetlands[M]//Terry N, Banuelos G. Phytoremediation of contaminated soil and water, Boca Raton: Lewis Publications, 1999: 13-40.
- [14] LIU Y, TAM N F Y, YANG J X, et al. Mixed heavy metals tolerance and radial oxygen loss in mangrove seedlings[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58(12): 1843-1849.
- [15] 李奕雯, 曹煜成, 李卓佳, 等. 凡纳滨对虾海水高位池养殖后期水环境因子日变化状况[J]. 广东农业科学, 2011, 38(20): 108-111. LI Y W, CAO Y C, LI Z J, et al. Daily variation of water quality in the last period of intensive seawater shrimp farm[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(20): 108-111.
- [16] 赵北北, 刘永, 李纯厚, 等. 氮营养对两种红树植物根际去除柴油污染的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10): 1865-1872. ZHAO B B, LIU Y, LI C H, et al. Effects of nitrogen nutrition on diesel fuel removal by rhizosphere of two mangrove seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10): 1865-1872.
- [17] TÖRMÄNEN T, LINDROOS A-J, KITUNEN V, et al. Logging residue piles of Norway spruce, Scots pine and silver birch in a clear-cut: Effects on nitrous oxide emissions and soil percolate water nitrogen[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 738: 139743.
- [18] SUNDARAVADIVEL M, VIGNESWARAN S. Constructed wetland for wastewater treatment[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2001, 31(4): 351-409.
- [19] WONG Y S, TAM N F Y, LAN C Y. Mangrove wetlands as wastewater treatment facility: A field trial[J]. *Hydrobiologia*, 1997, 352(1/2/3): 49-59.
- [20] 陈桂葵, 陈桂珠. 锌在红树植物白骨壤-土壤系统中的分布与迁移[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7): 1505-1509. CHEN G K, CHEN G Z. Distribution and migration of zinc in *Avicennia marina* plant-soil system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7): 1505-1509.
- [21] 陈桂葵, 陈桂珠. 镉在白骨壤模拟湿地系统中的分布、迁移及净化效应[J]. 应用生态学报, 2005, 16(3): 550-554. CHEN G K, CHEN G Z. Distribution, migration and purification effect of cadmium in artificial *Avicennia marina* wetland system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(3): 550-554.
- [22] 陈桂珠, 陈桂葵, 谭凤仪, 等. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应[J]. 海洋环境科学, 2000, 19(4): 23-26. CHEN G Z, CHEN G K, TAN F Y, et al. Purifying effects of *Avicennia marina* simulated wetland system on sewage[J]. *Marine Environmental Science*, 2000, 19

- (4):23-26.
- [23] 章文龙, 曾从盛, 张林海, 等. 闽江河口湿地植物氮磷吸收效率的季节变化[J]. 应用生态学报, 2009, 20(6): 1317-1322. ZHANG W L, ZENG C S, ZHANG L H, et al. Seasonal dynamics of nitrogen- and phosphorus absorption efficiency of wetland plants in Minjiang River estuary[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(6): 1317-1322.
- [24] 石雷, 杨璇. 人工湿地植物量及其对净化效果影响的研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 28-33. SHI L, YANG X. Phytomass and its impact on the pollutant removal ability of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2010, 19(1): 28-33.
- [25] 刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠, 等. 秋茄(*Kandelia candel*)幼苗对多氯联苯污染的生理生态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(2): 746-754. LIU Y Y, SUN H B, CHEN G Z, et al. Eco-physiological responses of *Kandelia candel* seedlings to polychlorinated biphenyls (PCBs) treatment[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(2): 746-754.
- [26] NAIDOO G. Effects of salinity and nitrogen on growth and water relations in the mangrove, *Avicennia marina* (Forsk.) Vierh[J]. *New Phytologist*, 1987, 107(2): 317-325.
- [27] SIMPSON L T, FELLER I C, CHAPMAN S K. Effects of competition and nutrient enrichment on *Avicennia germinans* in the salt marsh-mangrove ecotone[J]. *Aquatic Botany*, 2013, 104(1): 55-59.
- [28] LIN Y F, JING S R, LEE D Y, et al. Performance of a constructed wetland treating intensive shrimp aquaculture wastewater under high hydraulic loading rate[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134: 411-421.
- [29] 胡健楠. 盐地碱蓬人工湿地去除海水养殖废水中氮磷污染物及其机制研究[D]. 济南: 山东大学, 2018. HU J N. Removal of nitrogen and phosphorus pollutant in aquaculture wastewater utilizing *Suaeda salsa* constructed constructed wetlands and its underlying molecular mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [30] 范真. 耐盐湿地植物的净水能力及腐烂分解研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2019. FAN Z. Study on water purification capacity and decay decomposition of plants in salt-tolerant wetland[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.
- [31] 虞丹君, 罗海忠, 徐志进, 等. 不同红树处理海水养殖尾水效果初探[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(7): 271-274. YU D J, LUO H Z, XU Z J, et al. Preliminary study on purification effects of marine aquaculture wastewater by different mangroves[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(7): 271-274.
- [32] 王艳艳, 崔正国, 曲克明, 等. 复合垂直流人工湿地对海水养殖外排水脱氮效率的研究[J]. 水处理技术, 2017, 43(3): 95-100. WANG Y Y, CUI Z G, QU K M, et al. Research on nitrogen removal rate of marine aquaculture wastewater by the integrated vertical-flow constructed wetlands[J]. *Technology of Water Treatment*, 2017, 43(3): 95-100.
- [33] 仇建标, 陈琛, 彭欣, 等. 红树林人工湿地-养殖耦合系统构建与净化效果[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(11): 2073-2077. QIU J B, CHEN C, PENG X, et al. Construction and purification effect of mangrove constructed wetlands-aquaculture coupling system[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(11): 2073-2077.
- [34] 黄娟, 王世和, 钟秋爽, 等. 植物生理生态特性对人工湿地脱氮效果的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 471-475. HUANG J, WANG S H, ZHONG Q S, et al. Influence of plant eco-physiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetlands[J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2009, 18(2): 471-475.
- [35] 许永辉, 崔正国, 曲克明, 等. 不同耐盐植物人工湿地净化养殖外排水效果[J]. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 80-88. XU Y H, CUI Z G, QU K M, et al. Purification efficiency of mariculture wastewater in constructed wetlands with two salt-tolerant plants[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(3): 80-88.
- [36] 黄铭意, 许丹, 李寻, 等. 人工湿地处理高盐废水研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 10-16. HUANG M Y, XU D, LI X, et al. Research progress of treatment high salinity wastewater by constructed wetlands[J]. *Industrial Water Treatment*, 2021, 41(3): 10-16.
- [37] 陈方圆, 古勇波, 白江珊, 等. 淹水和盐胁迫对湿地植物菰生长的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(5): 1484-1491. CHEN F Y, GU Y B, BAI J S, et al. Effects of flooding and salt stress on the growth of *Zizania latifolia*[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(5): 1484-1491.

(责任编辑: 李丹)