

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20170309001

http://www.yykxjz.cn/

许永辉, 崔正国, 曲克明, 王艳艳, 王加鹏, 李悦悦, 胡清静. 不同耐盐植物人工湿地净化养殖外排水效果. 渔业科学进展, 2018, 39(3): 80–88

Xu YH, Cui ZG, Qu KM, Wang YY, Wang JP, Li YY, Hu QJ. Purification efficiency of mariculture wastewater in constructed wetlands with two salt-tolerant plants. Progress in Fishery Sciences, 2018, 39(3): 80–88

## 不同耐盐植物人工湿地净化养殖外排水效果\*

许永辉<sup>1,2</sup> 崔正国<sup>2①</sup> 曲克明<sup>2</sup> 王艳艳<sup>2,4</sup>  
王加鹏<sup>2,3</sup> 李悦悦<sup>2,4</sup> 胡清静<sup>2</sup>

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 2. 农业部海洋渔业可持续发展重点实验室  
山东省渔业资源与生态环境重点实验室 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;  
3. 江苏省东辛农场水产养殖公司 连云港 222002; 4. 中国海洋大学 青岛 266100)

**摘要** 为了探究不同耐盐植物对海水养殖外排水的去污效果, 选取了芦苇(*Phragmites australis*)与互花米草(*Spartina alterniflora*)为湿地植物, 细沙、蛭石和珊瑚石为基质, 构建了 2 套复合垂直流人工湿地系统。对比分析了 2 种挺水植物的耐盐性及对海水养殖外排水中氨氮(NH<sub>4</sub>-N)、亚硝态氮(NO<sub>2</sub>-N)、硝态氮(NO<sub>3</sub>-N)、高锰酸钾指数(COD<sub>Mn</sub>)和磷的净化效果。结果显示, 芦苇耐盐度最高为 20, 而互花米草在盐度 35 以下均能正常生长, 芦苇和互花米草湿地系统对 NH<sub>4</sub>-N 的平均去除率分别为(85.48±0.50)%和(95.01±1.18)%, 对 COD<sub>Mn</sub> 平均去除率分别为(57.74±4.40)%和(72.84±2.64)%。互花米草湿地系统对 NH<sub>4</sub>-N 和 COD<sub>Mn</sub> 的平均去除率高于芦苇湿地, 分别高 9.53%和 15.01%, 差异性显著( $P<0.05$ )。互花米草和芦苇湿地系统对磷酸盐和总磷(TP)的去除率为 40.00%~50.00%, 差异性不显著( $P>0.05$ )。研究表明, 在高盐胁迫下, 互花米草生长状况和对无机氮(DIN)和 COD<sub>Mn</sub> 的去除效果均优于芦苇, 2 种植物对磷酸盐和 TP 的去除率差异不明显。

**关键词** 人工湿地; 耐盐植物; 氮磷去除率

**中图分类号** S949 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2018)03-0080-09

人工湿地因具有运行成本低和去污效率高及生态效益显著等优点(王加鹏等, 2014), 已被成功应用于城市污水和工业废水的处理, 主要用于净化生活污水、农业废水和工业废水等低盐水体(高锋等, 2012; 陈家长等, 2007; Lin *et al*, 2003), 而对高盐度的废水处理则较为少见。人工湿地利用基质、微生物和植物相互作用来去除水体污染物, 其中, 植物是人工湿地

的重要组成部分, 在污水净化过程中起着重要的作用(Liu *et al*, 2012; Stefanakis *et al*, 2012; Dunne *et al*, 2005)。研究表明, 植物不仅自身摄取湿地系统中氮磷等污染物, 而且还为湿地微生物(氨化细菌、亚硝化细菌、硝化细菌和厌氧氨氧化细菌等)提供生存环境, 促进氮磷等污染物的迁移转化等(张洪刚等, 2006)。

由于盐胁迫效应, 大多数植物对海水的高盐胁迫

\* 中国水产科学研究院基本科研业务费(2016HY-ZD04)、山东省重点研发计划(2016ZDJS06A07)、国家自然科学基金(31101906)和青岛市博士后研究人员应用研究项目(Q51201610)共同资助[This work was supported by Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2016HY-ZD04), the Major Research and Development Project of Shandong Province (2016ZDJS06A07), National Natural Science Foundation of China (31101906), and Postdoctoral applied research project of Qingdao (Q51201610)]. 许永辉, E-mail: yonghuixu2010@163.com

① 通讯作者: 崔正国, 副研究员, E-mail: cuizg@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2017-03-09, 收修改稿日期: 2017-03-23

适应能力差,因此,选择适合的耐盐植物是人工湿地处理高盐度水产养殖外排水的关键。王静等(2009)研究表明,芦苇(*Phragmites australis*)和互花米草(*Spartina alterniflora*)耐盐性较高,能在较高盐度环境条件下生长,可作为人工湿地净化海水养殖外排水的植物。本研究选用耐盐性较强的芦苇和互花米草为湿地植物,对比分析这2种挺水植物在人工湿地系统中对污染物去除效果的差异,以期为人工湿地系统中高效耐盐植物的筛选提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 耐盐植物的筛选

人工湿地植物的选择一般依据如下原则:适应当地气候条件,耐污净化能力强,抗病害能力强,根系发达、茎叶繁茂,观赏价值、经济价值较高(梁雪等,2012;吴建强等,2005)。

对于海水人工湿地系统,植物选择要遵循耐盐性较强的原则。我国主要的耐盐植物有芦苇、碱蓬(*Suaeda glauca*)、碱蒿(*Artemisia anethifolia*)、盐角草(*Salicornia* spp.)及大米草(*Spartina anglica*)等(尚克春等,2014)。一般而言,挺水植物、浮水植物和沉水植物中,挺水植物因根系发达、茎叶繁茂,净化水质能力较强。互花米草和芦苇均为禾本科挺水植物,二者均具有较强的耐盐和净水能力,基于本实验室前期的筛选结果,选取芦苇和互花米草为实验植物。

植物耐盐性比较实验,在5、10、15、20、25、30和35盐度条件下,对比2种植物的生长状况,实验周期为14 d。

### 1.2 实验装置

2套海水复合垂直流人工湿地系统,人工湿地系统剖面见图1,构建材料为亚克力。湿地系统由下、上向流池串联而成,规格为50 cm×50 cm×75 cm,进水口高于出水口10 cm,下、上向流池均设3排具孔水管用于进出水,系统底部设排污口。下、上向流池基质填充深度均为55 cm,由上至下依次为细沙层、蛭石层和珊瑚石层,基质的粒径及填充厚度见图1。

### 1.3 实验方法

实验海水养殖外排水由人工模拟而成,主要成分为饵料、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 、 $\text{NaHCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ 、葡萄糖和海水。主要水质指标为磷酸盐浓度为0.40~0.50 mg/L,总磷(Total phosphorus, TP)浓度为0.70~

0.80 mg/L,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 浓度为7.00~8.00 mg/L,  $\text{NH}_4\text{-N}$ 浓度为0.37~0.40 mg/L。实验期间,出水温度为 $(28.60 \pm 0.71)^\circ\text{C}$ , pH为 $7.60 \pm 0.04$ , DO为 $(5.32 \pm 0.45)$  mg/L,芦苇系统盐度为 $20.21 \pm 0.73$ ,互花米草系统盐度为 $30.71 \pm 0.37$ ,种植密度均为60株/ $\text{m}^2$ 。2套人工湿地系统构建完成后,进行操作条件的优化,直至系统运行一定时间至稳定,期间对2种植物进行盐度驯化,驯化完成后进行去污实验。

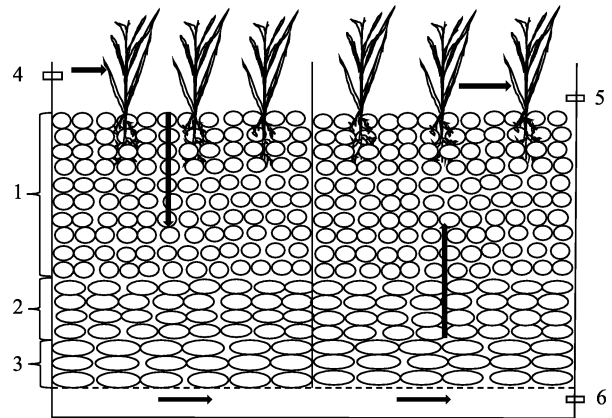


图1 复合垂直流人工湿地系统剖面

Fig.1 Profile of integrated vertical flow constructed wetland

1: 细沙(粒径: 0~2 mm, 填充厚度: 30 cm);

2: 蛭石(粒径: 1~4 mm, 填充厚度: 15 cm);

3: 珊瑚石(粒径: 20~50 mm, 填充厚度: 10 cm);

4: 进水口; 5: 出水口; 6: 反冲洗口

1: Fine sand (Grain diameter: 0~2 mm, Thickness: 30 cm);

2: Vermiculite (Grain diameter: 1~4 mm, Thickness: 15 cm);

3: Corallite (Grain diameter: 20~50 mm, Thickness: 10 cm);

4: Water inlet; 5: Water outlet; 6: Backwashing outfall

实验进水方式为循环连续进水,由下向流池4号进水口均匀洒入人工湿地,经人工湿地系统上、下向流池净化处理后,经上行池5号出水口收集于贮水单元中,再由水泵经4号口输送回人工湿地系统,实现海水养殖外排水的循环处理;水力停留时间约2 h。人工湿地系统运行2个月,系统达到稳定后开始实验,实验为期14 d。每天09:00从2种人工湿地系统5号出水口收集水样,每个水样500 ml,测量 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、磷酸盐和TP浓度,并用Excel 2016计算污染物的去除率。植物株高和干重测量方法:在实验前后分别采集长势相同的2种挺水植物,每种植物采集10株。

### 1.4 测定方法与数据处理

根据《海洋监测规范》(GB17378.4-2007)测定水质指标,其中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 采用次溴酸盐氧化法, $\text{NO}_2\text{-N}$

采用萘乙二胺分光光度法,  $\text{NO}_3\text{-N}$  采用锌镉还原法, 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, 磷酸盐采用磷钼蓝分光光度法, TP 采用过硫酸钾氧化法,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  采用碱性高锰酸钾法(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2008)。植物的株高和干重分别采用钢尺测量和  $105^\circ\text{C}$  条件下烘至恒重后测量。盐度、温度、pH 与 DO 等水质指标采用 YSI 多参数水质分析仪。

### 1.5 统计分析

数据结果采用 Excel 和 OriginPro 2015 分析作图,  $t$  检验分析 2 种植物湿地去除率之间的差异显著性 (SPSS 20.0)。实验结果为平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)。

## 2 结果

### 2.1 芦苇、互花米草耐盐性和生长状况

植物耐盐性比较显示, 芦苇在盐度为 20 以下生长良好, 盐度超过 20 则会出现不同程度的枯萎和死亡; 互花米草在不同盐度下均生长良好(表 1)。实验前后, 2 种人工湿地植物的株高和干重见表 2。从表 2 可以看出, 芦苇和互花米草株高分别增加 0.73 cm 和 2.93 cm, 干重分别增加 0.06 g 和 0.40 g。在盐胁迫条件下, 互花米草的生长状况要明显好于芦苇。

### 2.2 2种植物人工湿地对无机氮的净化效果

从图 2a 可以看出, 2 种植物湿地系统的  $\text{NH}_4\text{-N}$

表 1 不同盐度下芦苇和互花米草的生长状况

Tab.1 The growth performance of *P. australis* and *S. alterniflora* under different salinity

植物 Plant	盐度 Salinity						
	5	10	15	20	25	30	35
芦苇 <i>P. australis</i>	++	+	+	+	-	-	-
互花米草 <i>S. alterniflora</i>	++	++	++	++	++	++	++

++: 正常生长; +: 生长慢; -: 基本不生长

++: Normal growth; +: Slow growth; -: Poor growth

表 2 芦苇、互花米草的株高和干重

Tab.2 The plant height and dry weight of *P. australis* and *S. alterniflora*

植物 Plant	实验前 Before test		实验后 After test	
	株高 Plant height (cm)	干重 Dry weight (g)	株高 Plant height (cm)	干重 Dry weight (g)
芦苇 <i>P. australis</i>	38.01 $\pm$ 5.43	4.92 $\pm$ 0.91	39.74 $\pm$ 1.40	4.98 $\pm$ 1.24
互花米草 <i>S. alterniflora</i>	38.12 $\pm$ 2.23	5.13 $\pm$ 1.25	41.05 $\pm$ 2.61	5.53 $\pm$ 1.46

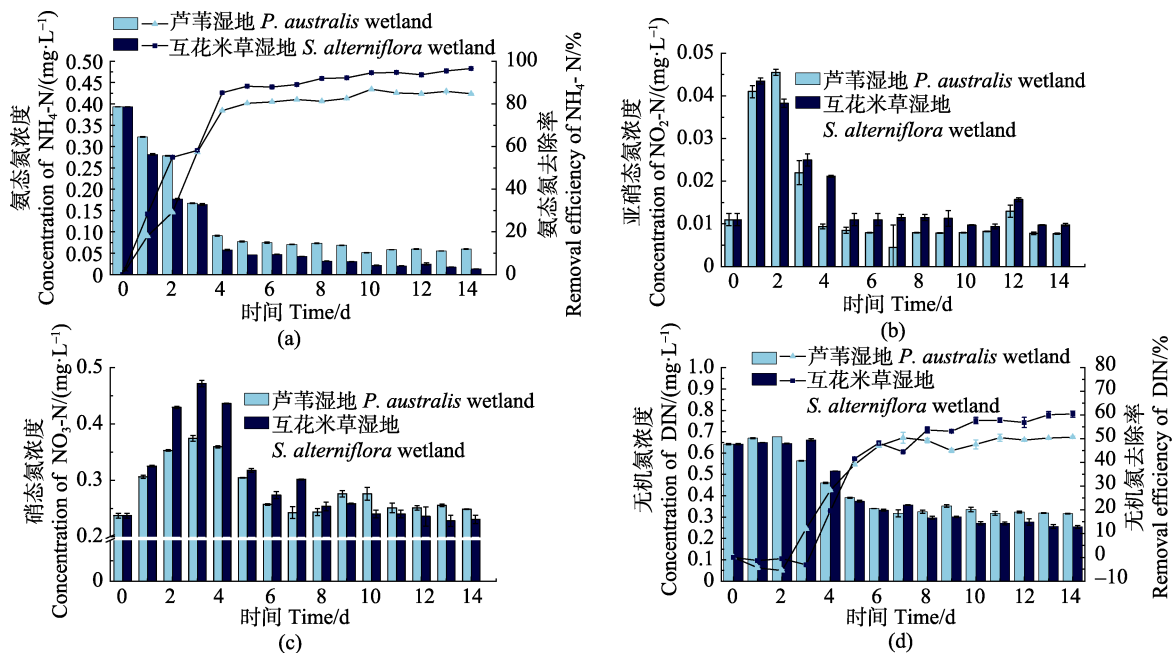


图 2 2 种人工湿地无机氮的浓度和去除率

Fig.2 The concentration and removal efficiency of inorganic nitrogen of the two constructed wetland

浓度在实验初期均大幅降低, 系统运行到第 4 天,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度及去除率均趋于稳定, 最后达到动态平衡。互花米草湿地系统运行至第 3 天后的  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除率达到 84.00% 以上; 芦苇湿地系统运行至第 6 天去除率达到约 80.00%。 $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度达到动态平衡后, 芦苇和互花米草湿地系统中的  $\text{NH}_4\text{-N}$  平均浓度分别为 0.06、0.02 mg/L, 去除率分别为  $(85.48\pm 0.50)\%$ 、 $(95.01\pm 1.18)\%$ 。2 种植物湿地系统对  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除率的差异性显著 ( $P < 0.05$ ) (表 3), 互花米草湿地系统对  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除率较芦苇高约 9.53%。

根据图 2b、图 2c 可知, 2 种植物湿地系统中  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度呈先升高后降低趋势,  $\text{NO}_2\text{-N}$  作为中间产物变化幅度较小, 在 0.01~0.04 mg/L 之间波动;  $\text{NO}_3\text{-N}$  在实验周期的前 4 d 大幅升高, 而后下降至实验初期水平。互花米草湿地系统的  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度升高较芦苇湿地快。互花米草湿地系统的  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度在实验前期达到最大值, 分别约为 0.05、0.37 mg/L; 芦苇湿地系统的  $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度分别在第 2 天和第 3 天达到最大值, 分别约为 0.04、0.47 mg/L。根据图 2d 可知, 2 种植物湿地系统在实验开始后, 人工湿地系统 DIN 呈先升高后降低趋势, 在处理 10 d 后趋于稳定。DIN 浓度稳定后, 芦苇和互花米草湿地系统的 DIN 分别为  $(0.32\pm 0.01)$ 、 $(0.26\pm 0.01)$  mg/L, DIN 去除率分别为

$(50.25\pm 0.80)\%$ 、 $(58.93\pm 1.96)\%$ 。互花米草系统的 DIN 去除率较芦苇系统高 8.65%, 差异显著 ( $P < 0.05$ ) (表 3)。

由图 3 可知, 2 种植物人工湿地  $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$  和  $\text{NO}_3\text{-N}$  的 DIN 占比变化趋势相似。在实验初期,  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度占比约为 41.00%, 随着实验时间的增加  $\text{NH}_4\text{-N}$  占比逐渐降低, 至浓度稳定时, 芦苇系统  $\text{NH}_4\text{-N}$  占比最低为 13.00%, 互花米草系统约为 3.00%。 $\text{NO}_2\text{-N}$  作为中间产物在实验初期升高, 随后降低至稳定水平。 $\text{NO}_3\text{-N}$  占比随处理时间的增加达到稳定状态后, 芦苇和互花米草湿地系统中  $\text{NO}_3\text{-N}$  占比分别约为 84.00% 和 90.00%。

### 2.3 2 种植物人工湿地对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、磷酸盐和总磷的净化效果

由图 4a、图 4d 可知, 人工模拟海水养殖外排水经湿地系统处理 24 h 后,  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  浓度下降至较低浓度后保持动态平衡。芦苇湿地系统  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  出水浓度为  $(3.21\pm 0.33)$  mg/L, 平均去除率为  $(57.74\pm 4.40)\%$ ; 互花米草湿地系统  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  出水浓度为  $(2.04\pm 0.19)$  mg/L, 平均去除率为  $(72.84\pm 2.64)\%$ 。互花米草湿地系统的  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  平均去除率比芦苇高约 15.01%。

由图 4b、图 4c 和图 4d 可知, 人工湿地对磷的去除在 24 h 后达到动态平衡后, 芦苇湿地系统磷酸盐浓度为  $(0.30\pm 0.01)$  mg/L, 平均去除率为  $(34.69\pm$

表 3 2 种人工湿地对污染物净化效果比较

Tab.3 Comparison of pollutant removal efficiencies of the two constructed wetland (%)

项目 Item	氨氮去除率 Removal efficiency of $\text{NH}_4\text{-N}$	无机氮去除率 Removal efficiency of DIN	$\text{COD}_{\text{Mn}}$ 去除率 Removal efficiency of $\text{COD}_{\text{Mn}}$	磷酸盐去除率 Removal efficiency of Phosphate	总磷去除率 Removal efficiency of TP
芦苇 <i>P. australis</i>	$85.48\pm 0.50$	$50.25\pm 0.80$	$57.74\pm 4.42$	$34.69\pm 2.36$	$49.77\pm 0.54$
互花米草 <i>S. alterniflora</i>	$95.01\pm 1.18$	$58.85\pm 1.97$	$72.84\pm 2.64$	$41.52\pm 3.84$	$52.41\pm 1.27$
<i>P</i>	0.04	0.08	0.001	0.07	0.07

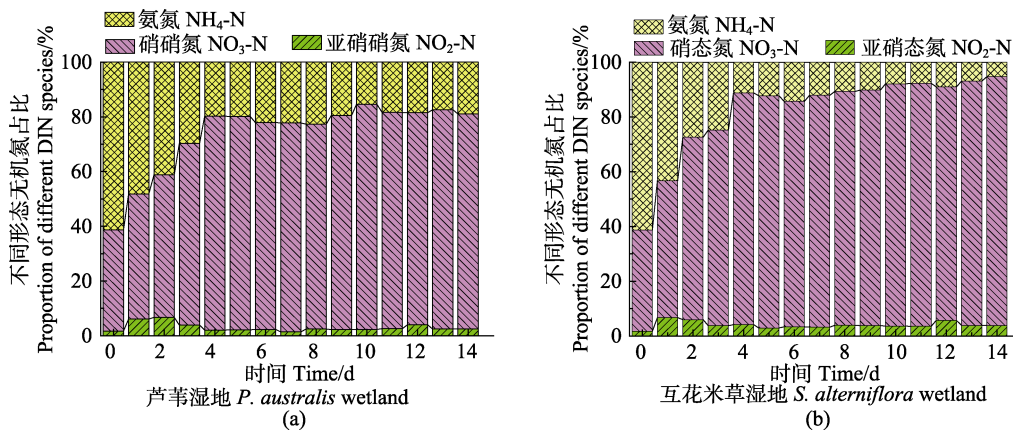


图 3 各无机氮所占比例

Fig.3 The proportion of different inorganic nitrogen species

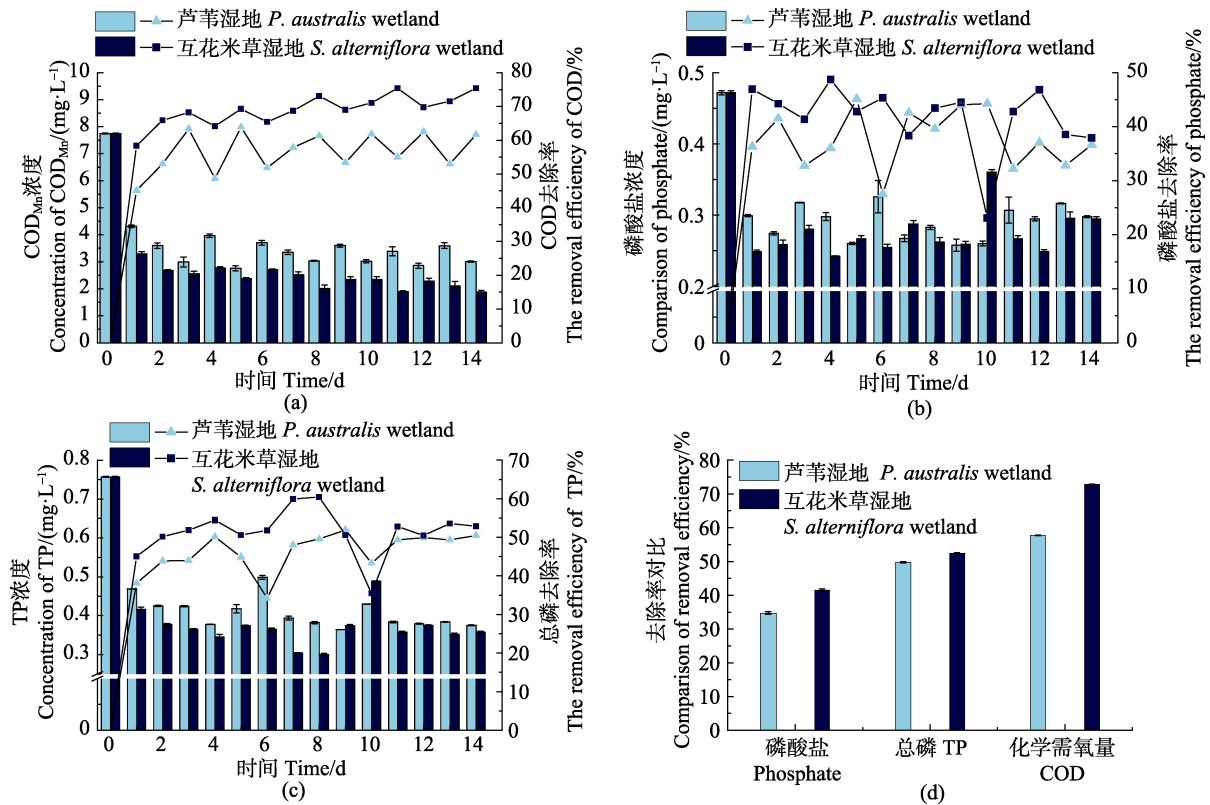


图 4 2 种人工湿地 COD<sub>Mn</sub>、磷酸盐和总磷的浓度和去除率变化

Fig.4 The concentration and removal efficiency of COD<sub>Mn</sub>, phosphate and TP of the two constructed wetland

2.36)%，TP 浓度为(0.38±0.01) mg/L，平均去除率为(49.77±0.54)%；互花米草湿地系统的磷酸盐浓度为(0.28±0.02) mg/L，平均去除率为(41.52±3.84)%，TP 浓度为(0.36±0.01) mg/L，平均去除率为(52.41±1.27)%。实验期间，2 种植物人工湿地的磷酸盐和 TP 均有突然升高现象。

### 3 讨论

#### 3.1 2 种植物人工湿地系统对无机氮的净化效果分析

卢少勇等(2006)研究表明，植物在人工湿地去污过程中起重要作用，一方面植物吸收 DIN 用于合成自身生长所需物质，另一方面植物向根区输送氧气并在根系表面形成好氧微区域，促进硝化细菌对氨的转化。另有研究表明，植株的抗逆性、生长状况、根系发达程度、根区泌氧能力以及根系分泌物等直接影响其净化污水能力(邓泓等, 2007; 刘志宽等, 2010)。本研究结果显示，芦苇株高和干重分别增加约 0.73 cm 和 0.06 g，而互花米草的株高和干重分别增加约 2.93 cm 和 0.40 g，后者株高较前者高 2.20 cm，干重较前者重 0.34 g (表 2)。互花米草在高盐度条件下，生长状况好于芦苇，与张爽等(2008)研究结果一致。互花米

草生长量高于芦苇可能与互花米草耐盐性较强以及在盐胁迫下光合作用强于芦苇有关。鲍芳等(2007)发现，互花米草对高盐度环境的适应能力较芦苇强，在生长过程中，互花米草的 SOD 和 POD 酶活性积累呈互补趋势，而 CAT 酶活性基本保持稳定，有利于应对盐胁迫环境；芦苇体内 SOD、POD 和 CAT 酶活性波动幅度大，说明其适应盐胁迫的能力较差。胡楚琦等(2015)发现，在盐胁迫环境下，互花米草的净光合速率( $P_n$ )值和光饱和点( $I_{sat}$ )均呈上升趋势，而芦苇的  $P_n$  值呈下降趋势， $I_{sat}$  值则无明显变化。肖燕等(2011)也发现，在生长季节互花米草的光合作用较芦苇强，净光合速率及生长量显著高于芦苇。由图 2a 可知，芦苇和互花米草植物湿地对 NH<sub>4</sub>-N 都具有较高的去除率，分别为(85.48±0.50)%和(95.01±1.18)%，互花米草湿地系统对 NH<sub>4</sub>-N 去除率较芦苇湿地高 9.53%，二者差异性显著( $P<0.05$ )，互花米草湿地对 NH<sub>4</sub>-N 的净化效率更高(图 2a 和表 3)。可能与互花米草更能适应盐胁迫环境(Lewis *et al*, 2002)， $P_n$  值和生长量均高于芦苇，对海水中 NH<sub>4</sub>-N 吸收量高有关。另外，黄娟等(2009)发现， $P_n$  与 NH<sub>4</sub>-N 去除率显著正相关。

根据图 2a 可知，互花米草湿地系统对 NH<sub>4</sub>-N 的去除速率和转化速率高于芦苇；在实验周期的前 5 d，

2种植物湿地的  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度均有升高,且互花米草湿地的上升速率较芦苇快;图2表明,在实验前4d,大部分  $\text{NH}_4\text{-N}$  通过硝化反应快速转化为  $\text{NO}_3\text{-N}$ ,这可能是由于互花米草根区、通气组织以及泌氧能力均较芦苇强有关。人工湿地中除氮的关键步骤是硝化和反硝化,硝化过程也是耗氧过程,溶氧与 DIN 的转化及脱氮效率有直接关系,适宜的溶氧(DO)能促进  $\text{NH}_4\text{-N}$  的转化。微生物在脱氮中起主导作用,湿地植物根区的径向泌氧作用(ROL)在输氧的同时也为好氧微生物提供适宜的微环境(周强等,2015;杜刚等,2013)。章振亚等(2012)研究表明,互花米草根区的细菌丰富度和多样性均高于芦苇。Chen等(2014)研究表明,水体氮的彻底去除是依靠反硝化作用或厌氧氨氧化作用将  $\text{NO}_3\text{-N}$  转化为  $\text{N}_2$  挥发出来实现,图2显示,  $\text{NO}_3\text{-N}$  浓度先升高后降低,可能是微生物通过反硝化作用等将  $\text{NO}_3\text{-N}$  转化为  $\text{N}_2$ ,进而挥发出来导致湿地系统所致。

### 3.2 2种植物人工湿地对 $\text{COD}_{\text{Mn}}$ 、磷酸盐和 TP 的净化效果分析

植物在有机污染物去除过程中起重要作用,包括直接作用和间接作用。直接作用包括根系的拦截和吸收,间接作用主要包括根系分泌物对生化过程的影响与为微生物提供附着和生长空间。不同植物对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果存在差异(陈永华等,2014)。芦苇和互花米草湿地系统对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  平均去除率分别为(57.74±4.40)%和(72.84±2.64)%,后者比前者的去除率高15.01%,差异性显著( $P<0.05$ )(表3)。研究表明,溶解氧是有机污染物去除过程中决定性因素之一(吴海明等,2010),异养微生物在有机物去除过程中起主导作用(Cooper *et al.*, 1996)。2种植物人工湿地对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  净化效果的差异性可能与互花米草根区泌氧高于芦苇和根区微生物较多的共同作用有关,也可能是因为互花米草密布于基质的须根系较为发达,对有机物的截留作用大于芦苇。

植物在净化轻度污水的除磷过程中起重要作用。研究表明,不同植物的除磷能力存在差异(汪文强等,2016;陈志超等,2015;王敏等,2013;Abu-Ghararah *et al.*, 1991)。芦苇湿地系统和互花米草湿地系统的磷酸盐平均去除率分别为(34.69±2.36)%和(41.52±3.84)%,对 TP 平均去除率分别为(49.77±0.54)%和(52.41±1.27)%。互花米草湿地系统对磷酸盐和 TP 的去除率均较芦苇湿地高,但是二者差异性不显著( $P>0.05$ )(表3)。实验期间,2种植物湿地系统磷酸盐及 TP 浓度突然升高,可能是植物枯萎后把磷重新释放到水体中导致

(张家洋等,2013;李志杰等,2012),或者是基质对磷吸附过饱和和后释放所致。本研究表明,2种植物湿地对磷的去除在短时间内效果显著,对磷酸盐和 TP 的去除率分别约为40.00%和50.00%(图4)。

## 4 结论

(1)随着盐度的升高,2种植物的生长均受到不同程度的抑制,芦苇在盐度大于20时基本停止生长,互花米草则在盐度为35以下均能正常生长。互花米草较芦苇耐盐能力强,株高增长量和干重增加量均高于芦苇。

(2)在短期内,2种植物对人工湿地低污染的海水养殖外排水中  $\text{NH}_4\text{-N}$  的净化效果显著,去除率均在80.00%以上,分别为(85.48±0.50)%和(95.01±1.18)%。互花米草人工湿地对  $\text{NH}_4\text{-N}$  去除率较芦苇湿地高约9.53%,差异显著( $P<0.05$ )。同时,互花米草人工湿地能更好的促进  $\text{NH}_4\text{-N}$  转化为  $\text{NO}_2\text{-N}$ ,提高了  $\text{NH}_4\text{-N}$  转化效率。

(3)芦苇人工湿地和互花米草人工湿地对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  平均去除率分别为(57.74±4.42)%和(72.84±2.64)%,互花米草人工湿地系统对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的去除效果要优于芦苇人工系统,前者较后者高15.01%,差异性显著( $P<0.05$ )。2种植物人工湿地系统对磷酸盐和 TP 的去除率均在40.00%~50.00%范围内波动,差异性不显著( $P>0.05$ )。

## 参 考 文 献

- Abu-Ghararah ZH, Randall CW. The effect of organic-compounds on biological phosphorus removal. *Water and Technology*, 1991, 23(4-6): 585-594
- Bao F, Shi FC. Comparative study on physiological characteristics between an invasive plant *Spartina alterniflora* and indigenous plant *Phragmites communis*. *Bulletin of Botanical Research*, 2007, 27(4): 421-427 [鲍芳,石福臣.互花米草与芦苇耐盐生理特征的比较分析.植物研究,2007,27(4): 421-427]
- Chen JC, He YP, Meng SL, *et al.* Purification effect of free water surface constructed wetland on circular economy pattern of pond culture. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5): 1898-1904 [陈家长,何尧平,孟顺龙,等.表面流人工湿地在池塘养殖循环经济模式中的净化效能研究.农业环境科学学报,2007,26(5): 1898-1904]
- Chen Y, Wen Y, Zhou JW, *et al.* Effects of cattail biomass on sulfate removal and carbon sources competition in subsurface-flow constructed wetlands treating secondary effluent. *Water Research*, 2014, 59(4): 1-10

- Chen YH, WU XF, Hao J, *et al.* The adaptability and decontamination effect of four kinds of woody plants in constructed wetland environment. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(4): 916–924 [陈永华, 吴晓芙, 郝君, 等. 4 种木本植物在潜流人工湿地环境下的适应性与去污效果. *生态学报*, 2014, 34(4): 916–924]
- Chen ZC, Zhang ZY, Liu HQ, *et al.* Research on removal efficiency of phosphorus by four aquatic macrophytes and rule of phosphorus migration in systems. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2015, 38(1): 107–112 [陈志超, 张志勇, 刘海琴, 等. 4 种水生植物除磷效果及系统磷迁移规律研究. *南京农业大学学报*, 2015, 38(1): 107–112]
- Cooper PF, Job GD, Green MB, *et al.* Reed beds and constructed wetlands for wastewater treatment. Swindon, UK: WRC Publications, 1996, 184
- Deng H, Ye ZH, Huang MH. Characteristics of radial oxygen loss from root of wetland plants. *Journal of East China Normal University (Natural Science)*, 2007(6): 69–76 [邓泓, 叶志鸿, 黄铭洪. 湿地植物根系泌氧的特征. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2007(6): 69–76]
- Du G, Huang L, Gao X, *et al.* Number of microbe and relationship between it and removal of pollutants in constructed wetlands. *Wetland Science*, 2013, 11(1): 13–20 [杜刚, 黄磊, 高旭, 等. 人工湿地中微生物数量与污染物去除的关系. *湿地科学*, 2013, 11(1): 13–20]
- Dunne EJ, Culleton N, O'Donovan G, *et al.* Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soils in Southeast Ireland. *Water Research*, 2005, 39(18): 4355–4362
- Gao F, Yang ZH, Li C, *et al.* Effect of saline aquaculture wastewater treatment by constructed mangrove wetland. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(17): 192–198 [高锋, 杨朝晖, 李晨, 等. 秋茄人工湿地净化循环海水养殖废水效果. *农业工程学报*, 2012, 28(17): 192–198]
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. The specification of marine monitoring—Part 4: Seawater analysis (GB17378.4-2007), 2008 [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 海洋监测规范第 4 部分: 海水分析 (GB17378.4-2007), 2008]
- Hu CQ, Liu JK, Wang TH, *et al.* Influence of three types of salt stress on photosynthesis in *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2015, 39(1): 92–103 [胡楚琦, 刘金珂, 王天弘, 等. 三种盐胁迫对互花米草和芦苇光合作用的影响. *植物生态学报*, 2015, 39(1): 92–103]
- Huang J, Wang SH, Zhong QS, *et al.* Influence of plant eco-physiology characteristics on nitrogen removal effect in constructed wetlands. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(2): 471–475 [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. *生态环境学报*, 2009, 18(2): 471–475]
- Lewis MA, Weber DE. Effects of substrate salinity on early seedling survival and growth of *Scirpus robustus* Pursh and *Spartina alterniflora* Loisel. *Ecotoxicology*, 2002, 11(1): 19–26
- Li ZJ, Sun JM, Liu BS. Mechanisms of denitrification and dephosphorization by constructed wetland and its research progress. *Industrial Water Treatment*, 2012, 32(4): 1–5 [李志杰, 孙井梅, 刘宝山. 人工湿地脱氮除磷机理及其研究进展. *工业水处理*, 2012, 32(4): 1–5]
- Liang X, He F, Xu D, *et al.* Plant function and selection for constructed wetlands. *Journal of Hydroecology*, 2012, 33(1): 131–138 [梁雪, 贺锋, 徐栋, 等. 人工湿地植物的功能与选择. *水生态学杂志*, 2012, 33(1): 131–138]
- Lin Y, Jing SR, Lee DY. The potential use of constructed wetlands in a recirculating aquaculture system for shrimp culture. *Environmental Pollution*, 2003, 123(1): 107–113
- Liu X, Huang S, Tang T, *et al.* Growth characteristics and nutrient removal capability of plants in subsurface vertical flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 2012, 44(7): 189–198
- Liu ZK, Ma QL, Niu KK. Prospect on radial oxygen loss of wetland plants in the wetland. *Journal of Hainan Normal University (Natural Science)*, 2010, 23(1): 84–86, 92 [刘志宽, 马青兰, 牛快快. 湿地植物根系泌氧及其在湿地处理中的应用. *海南师范大学学报(自然科学版)*, 2010, 23(1): 84–86, 92]
- Lu SY, Jin XC, Yu G. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2670–2677 [卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的氮去除机理. *生态学报*, 2006, 26(8): 2670–2677]
- Shang KC, Liu XB, Chen XY. Screening of the salt tolerant plants for high salinity wastewater treatment by the artificial wetland. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2014, 31(1): 74–78 [尚克春, 刘宪斌, 陈晓英. 高盐废水人工湿地处理中耐盐植物的筛选. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(1): 74–78]
- Stefanakis AI, Tsihrintzis VA. Effects of loading, resting period, temperature, porous media, vegetation and aeration on performance of pilot-scale vertical flow constructed wetlands. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181–182: 416–430
- Wang J, Zhang YS, Qiu JQ, *et al.* Influence of seawater salinity on purification efficiency of subsurface-flow constructed wetland. *China Water and Wastewater*, 2009, 25(5): 9–11 [王静, 张雨山, 邱金泉, 等. 海水盐度对潜流人工湿地系统净化效果的影响. *中国给水排水*, 2009, 25(5): 9–11]
- Wang JP, Cui ZG, Zhou Q, *et al.* Removal effect of mariculture wastewater and analysis of microbial communities in constructed wetlands. *Progress in Fishery Science*, 2014, 35(6): 1–9 [王加鹏, 崔正国, 周强, 等. 人工湿地净化海

- 水养殖外排水效果与微生物群落分析. 渔业科学进展, 2014, 35(6): 1-9]
- Wang M, Tang JC, Wang F. Remediation effect of common aquatic plants on the combined water pollution of eutrophication and heavy metals. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2013, 24(2): 50-56 [王敏, 唐景春, 王斐. 常见水生植物对富营养化和重金属复合污染水体的修复效果研究. 水资源与水工程学报, 2013, 24(2): 50-56]
- Wang WQ, Wang ZF, Gao M. Efficiency of removing nitrogen and phosphorous and effects on extracellular enzyme activity in water body by five hydrophytes. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(10): 5440-5446 [汪文强, 王子芳, 高明. 5种水生植物的脱氮除磷效果及其对水体胞外酶活的影响. 环境工程学报, 2016, 10(10): 5440-5446]
- Wu HM, Zhang J, Li WJ, *et al.* Relationship between oxygen release from plants in constructed wetland and oxygen demand for pollutant degradation. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 1973-1977 [吴海明, 张建, 李伟江, 等. 人工湿地植物泌氧与污染物降解耗氧关系研究. 环境工程学报, 2010, 4(9): 1973-1977]
- Wu JQ, Ruan XH, Wang X. Selection and function of aquatic plants in constructed wetlands. *Water Resources Protection*, 2005, 21(1): 1-6 [吴建强, 阮晓红, 王雪. 人工湿地中水生植物的作用和选择. 水资源保护, 2005, 21(1): 1-6]
- Xiao Y, Tang JB, An SQ. Responses of growth and sexual reproduction of *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* to salinity stress. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2): 267-272 [肖燕, 汤俊兵, 安树青. 芦苇、互花米草的生长和繁殖对盐分胁迫的响应. 生态学杂志, 2011, 30(2): 267-272]
- Zhang HG, Hong JM. Functions of plants of constructed wetlands. *Wetland Science*, 2006, 4(2): 146-154 [张洪刚, 洪剑明. 人工湿地中植物的作用. 湿地科学, 2006, 4(2): 146-154]
- Zhang JY, Chen LL, Li H. The summary of hydrophytes on removal of nitrogen and phosphorus in eutrophic water. *Journal of Northwest Normal University (Natural Science)*, 2013, 49(1): 115-120 [张家洋, 陈丽丽, 李慧. 水生植物对富营养化水体除磷去氮的研究概述. 西北师范大学学报(自然科学版), 2013, 49(1): 115-120]
- Zhang S, Guo CJ, Su FL, *et al.* Effect of salinity on the growth of reed. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2008, 39(1): 65-68 [张爽, 郭成久, 苏芳莉, 等. 不同盐度水灌溉对芦苇生长的影响. 沈阳农业大学学报, 2008, 39(1): 65-68]
- Zhang ZY, Ding CL, Xiao M. The diversity of invasive plant *Spartina alterniflora* rhizosphere bacteria in a tidal salt marshes at Chongming Dongtan in the Yangtze River estuary. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(21): 6636-6646 [章振亚, 丁陈利, 肖明. 崇明东滩湿地不同潮汐带入侵植物互花米草根际细菌的多样性. 生态学报, 2012, 32(21): 6636-6646]
- Zhou Q, Cui ZG, Wang JP, *et al.* Substrate enzyme, microbe distribution and denitrification effects of the constructed sea water wetland. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(1): 10-17 [周强, 崔正国, 王加鹏, 等. 海水人工湿地脱氮效果与系统内基质酶、微生物分析. 渔业科学进展, 2015, 36(1): 10-17]

(编辑 马瑾艳)



## Purification Efficiency of Mariculture Wastewater in Constructed Wetlands with Two Salt-Tolerant Plants

XU Yonghui<sup>1,2</sup>, CUI Zhengguo<sup>2①</sup>, QU Keming<sup>2</sup>, WANG Yanyan<sup>2,4</sup>,  
WANG Jiapeng<sup>2,3</sup>, LI Yueyue<sup>2,4</sup>, HU Qingjing<sup>2</sup>

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-Environment, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 3. Jiangsu Dongxin Farms Aquaculture Company, Lianyungang 222002; 4. Ocean University of China, Qingdao 266100)

**Abstract** As an eco-friendly wastewater treatment method, constructed wetlands have been widely used in purifying aquaculture wastewater. However, due to the effects of salt stress of seawater, the feasibility of treating mariculture wastewater in constructed wetland with different plants needs further study. To investigate the water contaminant removal efficiency, two integrated vertical flow constructed wetlands (IVCW) were constructed. *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* were selected as the constructed wetland plants. The salinity tolerance of *P. australis* was significantly different from that of *S. alterniflora*. The content of ammonia nitrogen (NH<sub>4</sub>-N), nitrite nitrogen (NO<sub>2</sub>-N), nitrate nitrogen (NO<sub>3</sub>-N), phosphorus, total phosphorus (TP), and potassium permanganate index (COD<sub>Mn</sub>) were determined for 14 d. The two constructed wetland were filled with fine sand, vermiculite, and corallite. The results showed that the optimum salinity of *P. australis* was 20 and that of *S. alterniflora* was less than 35. The physical and chemical properties of the purified water were: temperature (28.60±0.71)°C, pH 7.60±0.04, and dissolved oxygen (DO) (5.32±0.45) mg/L. This demonstrated that the efficiency of *P. australis* wetland and *S. alterniflora* wetland in the removal of NH<sub>4</sub>-N and COD<sub>Mn</sub> was (85.48±0.50)% and (57.74±4.40)%; and (95.01±1.18)% and (72.84±2.64)%, respectively. The efficiency in the removal of phosphate and TP were 40.00%~50.00% by both the constructed wetlands. These results suggested that the salt tolerance of *S. alterniflora* was better than *P. australis*. There were significant differences in NH<sub>4</sub>-N and COD<sub>Mn</sub> between *P. australis* wetland and *S. alterniflora* wetland ( $P<0.05$ ). However, the difference between the wetlands was not significant for phosphate and TP ( $P>0.05$ ). In the short term, the efficiency of the removal of NH<sub>4</sub>-N and COD<sub>Mn</sub> from mariculture effluents by *S. alterniflora* wetland was better than by the *P. australis* wetland. Under high-salinity stress, *S. alterniflora* had strong salt tolerance and grew better in seawater, and had better purification efficiency than *P. australis*. However, the efficiency in the removal of phosphate and TP exhibited no significant difference between the two wetlands.

**Key words** Constructed wetland; Salt-tolerant plant; Removal efficiencies of nitrogen and phosphorus

① Corresponding author: CUI Zhengguo, E-mail: cuizg@ysfri.ac.cn