

高效净化氮磷污水的湿地水生植物筛选与组合*

韩潇源¹, 宋志文², 李培英³

(1: 中国海洋大学, 青岛 266100)

(2: 青岛理工大学, 青岛 266033)

(3: 国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要: 采用人工配制污水为实验用水进行室内水培实验, 研究 10 种人工湿地中常见水生植物对氨氮和总磷的同化吸收能力, 筛选出净化效果好的植物, 构建植物组合, 以单一植物为对照, 研究植物组合对于提高氨氮、总磷净化效果的作用. 结果表明: 不同植物对氨氮、总磷的去除能力差别较大. 千屈菜(*Lythrum salicaria*)、菖蒲(*Acorus calamus*)、美人蕉(*Cann indica*)、达香蒲(*Typha davidiana*)对氨氮净化效果较好, 初始浓度 29.69mg/L、15d 后, 去除率 96.6%、98.6%、87.7%、95.1%. 美人蕉、凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)、千屈菜、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)对 TP 净化效果较好, 初始浓度 4.44mg/L、15d 后, 去除率 99.0%、54.6%、69.9%、36.7%. 千屈菜与石菖蒲的组合能同时提高氨氮与总磷的净化效果; 美人蕉与千屈菜的组合、菖蒲与美人蕉的组合、菖蒲与千屈菜的组合、美人蕉与石菖蒲的组合能提高总磷的净化效果. 组合实验结果表明, 适当的水生植物组合能提高氨氮与总磷的净化效果.

关键词: 人工湿地; 水生植物; 筛选; 组合; 氮; 磷; 净化效果

Selection and assembly of macrophyte species in constructed wetland for purification of N and P in wastewater

HAN Xiaoyuan¹, SONG Zhiwen² & LI Peiying³

(1: *Ocean University of China, Qingdao 266100, P.R.China*)

(2: *Qingdao Technological University, Qingdao 266033, P.R.China*)

(3: *National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, P.R.China*)

Abstract: For selecting macrophyte species in constructed wetland, the abilities to remove $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in the artificial sewage of 10 macrophyte species were investigated by the manipulative indoor experiment. Macrophyte species which had stronger purification effect were selected, then, assemblies were designed to compare with the single ones. The results showed that the abilities of different macrophyte species to remove nitrogen and phosphorous contrast sharply with one another. *Lythrum salicaria*, *Acorus calamus*, *Cann indica*, *Typha davidiana* had stronger ability to remove $\text{NH}_4^+\text{-N}$, when treated for 15 days, with an original concentration of 29.69mg/L, the removal rates were 96.6%, 98.6%, 87.7%, 95.1% respectively. *Cann indica*, *Eichhornia crassipes*, *Lythrum salicaria*, *Acorus tatarinowii* had stronger ability to remove TP, when treated for 15 days, with an original concentration of 4.44mg/L, the removal rates were 99.0%, 54.6%, 69.9%, 36.7%, respectively. In respect of the removal rates of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP, the assembly of *Lythrum salicaria* and *Acorus tatarinowii* (54.2%, -32.6%) did better than *Lythrum salicaria*(28.7%, -41.5%), which indicated that the assembly could improve purification effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP simultaneously. The assembly of *Lythrum salicaria* and *Cann indica*, the assembly of *Acorus calamus* and *Cann indica*, the assembly of *Acorus calamus* and *Lythrum salicaria*, the assembly of *Cann indica* and *Acorus tatarinowii*, all the assemblies had stronger removal abilities of TP than the single ones. The results of the investigation into selection and assembly of aquatic macrophyte species suggested that, proper assemblies could improve the purification effect of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in wastewater in comparison with the single ones.

* 我国近海海洋综合调查与评价(908)专项项目(908-01-ZH2)和国家自然科学基金项目(30670399)联合资助. 2007-10-16 收稿; 2008-04-07 收修改稿. 韩潇源, 女, 1980 年生, 博士研究生; E-mail: xy_8025.han@yahoo.com.cn.

Keywords: Constructed wetland; macrophyte; selection; assembly; nitrogen; phosphorus; purification effect

随着江河湖泊等水体富营养化问题的日趋严重^[1], 污水的脱氮除磷日益受到人们的关注. 以水生植物为核心的污水处理和富营养化水体的修复治理^[2-3], 具有效果好、投资少、运行成本低、易管理、景观效果好及有利于重建和恢复生态系统等优点^[4-5], 已成为国内外环境领域的一个研究热点. 在近年来广泛应用于城市生活污水、农业面源污染及富营养化水体等^[6-10]的处理的人工湿地中, 水生植物占据着举足轻重的地位^[11], 植物可以通过自身组织吸收直接去除水体中的氮磷^[12-14]. 能否筛选到净化效果好、耐污能力强、适应当地环境、耐寒抗热、抗病虫能力强的植物, 将直接影响到人工湿地脱氮除磷性能发挥.

国内外学者已筛选出多种能有效去除水体中氮磷的植物, 如: 芦苇(*Phragmites*)^[15]、香蒲(*Typha*)^[16-17]、菖蒲(*Acorus*)^[18-19]、石菖蒲(*Acorus tatarinowii*)^[14]、美人蕉(*Canna indica*)^[16]和千屈菜(*Lythrum salicaria*)^[16]等. 多种植物的合理搭配能产生比单一物种更好的去污效果^[20]也是普遍认同的观点. 然而, 笔者发现, 实际应用中选用两种以上植物进行组合的人工湿地并不多见^[21], 有关本段中提及的植物种类搭配组合后的污水净化效果尚未见相关报道. 加强湿地植物的筛选和组合研究, 对于充分发挥植物在湿地中的净化作用、提高湿地的净化效能具有重要的意义.

本研究选取 10 种常见的湿地水生植物, 研究其对氨氮、总磷的同化吸收能力, 从中筛选出净化效果较好的植物, 在此基础上构建植物组合, 以单一植物为参照, 研究水生植物组合对于提高人工配制污水中氨氮、总磷净化效果的作用. 研究结果可为人工湿地的植物选种与组合提供参考, 同时对构建高效脱氮除磷的人工湿地有一定的参考价值.

1 材料与方方法

1.1 实验材料

千屈菜繁殖力强, 适应性好, 耐旱也耐湿, 耐寒性强, 可露地越冬, 耐瘠薄. 美人蕉具肉质根状茎, 根系发达, 生长周期较短, 生长速度快; 耐污性较强. 花叶美人蕉(*Canna generalis*) 多年生草本花卉, 可耐半荫蔽. 东方香蒲(*Typha orientalis*) 地下茎与根系发达, 沼生或水生环境均能生长, 较耐寒. 达香蒲(*Typha davidiana*) 多年生水生或沼生草木. 菖蒲(*corus calamus*) 最适宜生长温度 20-25℃, 对环境适应性强, 耐贫瘠, 耐污性好. 石菖蒲具根状茎, 根系发达, 四季生长, 生命力强, 耐污性好. 黄菖蒲(*Iris pseudacorus*) 又名黄花鸢尾, 适应性强, 耐半阴, 耐旱也耐湿, 耐寒性较强. 芦苇(*Phragmites communis*) 地下茎营养繁殖能力强, 生长季节长, 生长快; 适应性强, 耐污性好. 凤眼莲(*Eichhornia crassipes*) 又称水葫芦, 浮水草本, 根系发达、生长繁殖能力旺盛、耐污能力强.

1.2 实验方法

水培实验在青岛理工大学环境生物实验室内进行. 直射及散射自然光照, 保持良好通风. 实验期间, 气温 16-28℃(平均 22℃). 以 5000ml 烧杯作为实验容器, 长势良好、大小均匀的植株作为待测对象. 植株直接放入烧杯内, 不添加任何基质, 不采取固定措施, 临窗培养, 尽可能保持各处理采光和通风条件的一致. 实验前, 用双层报纸包好烧杯侧壁, 以模拟根区的弱光条件, 并防止由于阳光照射使藻类过量繁殖而影响氮磷等指标的测定; 将植物用自来水洗净, 室温放置 20-30min 风干, 称重, 测量植物形态指标.

配制人工污水(主要成分为 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 和自来水), 测定其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、pH 值、DO 等指标以确定初始值.

表 1 人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 初始浓度(C_0 , mg/L)
Tab.1 Original concentration of $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TP in artificial sewage(C_0 , mg/L)

试验水样	$\text{NH}_4^+\text{-N}$	TP
1	29.69	4.44
2	253.98	65.16
3	57.04	13.86
4	28.37	3.83

各项水质指标的测试采用《水与废水监测分析方法》中的标准方法: $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 采用纳氏试剂光度法; TP 采用过硫酸钾消解, 钼锑抗分光光度法; pH 值采用玻璃电极法; 溶解氧采用便携式溶解氧仪法。

将人工污水及筛选与组合研究所选用的实验植物放入烧杯中, 同时设置不放置任何植物的空白作为对照。根据不同植物对水分吸收数量及蒸腾作用强度的不同, 定期向烧杯中补充自来水并做记录, 以确定水样体积的变化并防止水分减少过快而影响植物的正常生长。

自实验开始计时, 每隔 5d 测试一次各处理的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、pH 值、DO 等水质指标。每种处理设 2 个平行样, 每个平行样取 3 个重复样。同时计算测试后的剩余水样体积; 取出植物在室温下风干称重, 以确定其测试后的质量。通过各种水质指标、加水体积和植物质量的测定, 计算各种植物对氨氮、总磷的去除率(E_n)和单位质量植物去除氨氮、总磷的质量(W_n)。

1.3 数据分析方法

氨氮、总磷去除率的计算方法见公式(1)、公式(2):

$$E_n = [(C_0 - C_n K_n) / C_0] \times 100\% \quad (1)$$

$$K_n = [V_0 + (V_1^\circ + V_2^\circ + \dots + V_m^\circ)] / V_0 \quad (2)$$

单位质量植物去除氨氮、总磷质量的计算方法:

$$W_n = (C_0 V_0 - C_n V_n) / [(M_0 + M_n) / 2] \quad (3)$$

式中: E_n 为第 n 次测样时某处理对氨氮、总磷的去除率(%), n 为测样次数, n 取值为 1, 2, 3; C_0 为氨氮、总磷初始浓度(mg/L); C_n 为第 n 次测样时氨氮、总磷浓度(mg/L); K_n 为第 n 次测样时的稀释倍数; V_0 为水样初始体积(ml); V_m° 为某处理第 m 次加水体积(ml), m 为第 n 次测样前加水次数; W_n 为第 n 次测样时单位质量植物去除氨氮、总磷质量(mg); V_n 为某处理在第 n 次测样时的体积(ml); M_0 为植物的初始质量(g); M_n 为第 n 次测样时植物质量(g)。

2 结果与讨论

2.1 水生植物净化效果

2.1.1 不同水生植物对相同人工配制污水中氨氮、总磷的净化效果 以 1 号人工配制污水为例, 考察不同种类单一植物对氨氮、总磷净化效果的差异。经 15d 处理后植物对 1 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的净化效果见表 2。

表 2 水生植物对 1 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的净化效果*

Tab.2 Purification effect of macrophyte species on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in the No.1 artificial sewage

植物 种类	$\text{NH}_4^+\text{-N}$			TP		
	C_3 (mg/L)	E_3 (%)	W_3 (mg)	C_3 (mg/L)	E_3 (%)	W_3 (mg)
菖蒲	0.55±0.00	98.6	1.02	2.65±0.38	26.9	0.02
千屈菜	0.55±0.00	96.6	0.83	1.87±1.32	69.9	0.08
达香蒲	1.93±1.55	95.1	3.06	3.23±0.78	19.5	0.07
美人蕉	4.84±1.65	87.7	1.02	0.06±0.05	99.0	0.13
凤眼莲	4.55±1.83	81.6	1.92	2.23±0.50	54.6	0.12
石菖蒲	10.07±0.73	74.4	11.05	2.67±0.75	36.7	0.42
花叶美人蕉	11.20±0.36	71.5	1.73	2.35±0.75	26.9	0.06
黄菖蒲	8.76±5.99	67.7	1.08	2.47±0.79	23.2	0.02
芦苇	10.18±2.93	65.7	2.42	4.87±0.29	-4.0	0.05
东方香蒲	16.38±4.60	44.8	0.72	6.17±0.56	-28.1	-0.02
空白	13.45±2.51	54.7	—	4.98±0.35	-5.8	—

* C_3 为第 3 次测样时氨氮(或总磷)浓度, E_3 为第 3 次测样时某处理对氨氮(或总磷)的去除率, W_3 为第 3 次测样时单位质量植物去除氨氮(或总磷)质量; 表中数据 C_3 为均值±标准差, E_3 和 W_3 为均值。

尽管单位质量千屈菜去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量相对较小, 但是无论去除率(96.6%)还是水培后的浓度, 千屈菜对人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果明显好于常用的人工湿地植物(凤眼莲、芦苇和东方香蒲), 这与其具有巨大的生物量、发达的木质块状根和细密的须根不无关系. 菖蒲的净化效果更优于千屈菜, 去除率为 98.6%; 达香蒲与二者相差无几, 单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量则更高. 此外, 美人蕉对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率(87.7%)高于凤眼莲(81.6%)(表 2).

美人蕉对 TP 的去除率极高(99.0%), 千屈菜较高(69.9%). 单位质量植物去除 TP 质量方面, 石菖蒲和凤眼莲较大, 分别为 0.42mg 和 0.12mg.

植物在人工湿地中的生长和繁殖, 需要吸收大量的营养元素如氮磷等. 污水中的氨氮可以被植物直接摄取, 作为自身生长的氮源以合成植物蛋白质和有机氮^[22]; 污水中无机磷在植物吸收及同化作用下可转化为植物的 ATP、DNA、RNA 等有机成分^[23]. 植物吸收氮磷进行同化作用, 除用以维持植株的生命外, 还可将多余部分贮存在组织内^[14]. 因此, 植物吸收氮磷后通过收割从污水中去除, 是人工湿地去除氮磷的重要机理之一. 不同植物同化吸收氮磷的能力不同, 因而对污水中氮磷的去除能力存在差异.

2.1.2 同种水生植物对不同浓度人工配制污水中氨氮和总磷净化效果比较 以 2 号和 3 号人工配制污水为例, 考察同种水生植物对不同浓度氨氮、总磷的净化效果的差别. 经 5d 处理后植物对 2 号和 3 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的净化效果分别见表 3、表 4.

表 3 水生植物对 2 号和 3 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果比较*
Tab.3 Comparison between purification effect of macrophyte species on $\text{NH}_4^+\text{-N}$
in the No.2 and No.3 artificial sewages

植物种类	$W_1(2)$ (mg)	$W_1(3)$ (mg)	$W_1(2)/W_1(3)$	$C_0(2)/C_0(3)$	$[W_1(2)/W_1(3)]/[C_0(2)/C_0(3)]$
菖蒲	10.49	2.78	3.77		0.85
千屈菜	1.49	0.89	1.67		0.38
美人蕉	2.54	0.85	2.99	4.45	0.67
凤眼莲	4.17	2.69	1.55		0.35
石菖蒲	18.67	4.04	4.62		1.04

* W_1 为第 1 次测样时单位质量植物去除氨氮质量; C_0 为氨氮初始浓度; W_1 数据采用均值; W_1 和 C_0 后括号中的数字为人工配制污水编号.

表 4 水生植物对 2 号和 3 号人工配制污水中 TP 的净化效果比较*
Tab.4 Comparison between purification effect of macrophyte species on TP
in the No.2 and No.3 artificial sewages

植物种类	$W_1(2)$ (mg)	$W_1(3)$ (mg)	$W_1(2)/W_1(3)$	$C_0(2)/C_0(3)$	$[W_1(2)/W_1(3)]/[C_0(2)/C_0(3)]$
菖蒲	2.41	0.80	3.01		0.64
千屈菜	0.96	0.26	3.69		0.78
美人蕉	0.65	0.14	4.64	4.70	0.99
凤眼莲	3.02	0.85	3.55		0.76
石菖蒲	4.80	1.84	2.61		0.56

* W_1 为第 1 次测样时单位质量植物去除总磷质量; C_0 为总磷初始浓度; W_1 数据采用均值; W_1 和 C_0 后括号中的数字为人工配制污水编号.

由表 3、表 4 可以看出: (1)对于同种水生植物而言, 单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量大于单位质量植物去除 TP 质量. (2)随着氨氮、总磷浓度的提高, 单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 质量均有不同程度的提高. 对于 $W_n(2)/W_n(3)$ 而言, 美人蕉、凤眼莲、千屈菜的单位质量植物去除 TP 质量提高的程度大于单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量提高的程度; 菖蒲、石菖蒲的单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量提高的程度大于单位质量植物去除 TP 质量提高的程度. (3)排除初始浓度差异的影响, 由 $[W_n(2)/W_n(3)]/[C_0(2)/C_0(3)]$ 值, 石菖蒲单位

质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量提高的程度大于水样 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度提高的程度, 表明其去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的潜力较大; 美人蕉单位质量植物去除 TP 质量提高的程度与水样 TP 浓度提高的程度相当, 表明其去除 TP 的潜力较大。

2.2 水生植物组合对人工配制污水中氨氮、总磷的净化效果

选择对氨氮、总磷净化效果较好的若干种植物构建了 7 种植物组合, 并以单一植物为参照, 研究水生植物组合能否提高人工配制污水中氨氮、总磷的净化效果。经 15d 处理后水生植物组合对 4 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的净化效果见表 5。

表 5 水生植物组合对 4 号人工配制污水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的净化效果*

Tab.5 Purification effect of combinations of macrophyte species on $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TP in the No.4 artificial sewage

植物组合和 单一植物种类	$\text{NH}_4^+\text{-N}$			TP		
	$C_3(\text{mg/L})$	$E_3(\%)$	$W_3(\text{mg})$	$C_3(\text{mg/L})$	$E_3(\%)$	$W_3(\text{mg})$
千屈菜+石菖蒲	12.34±0.14	54.2	3.93	4.82±0.07	-32.6	-0.17
千屈菜	19.15±1.21	28.7	2.38	5.13±0.06	-41.5	-0.22
石菖蒲	21.61±0.59	20.6	5.69	4.99±0.17	-35.9	-0.68
美人蕉+千屈菜	11.86±0.22	52.7	0.74	2.41±0.18	29.0	0.07
美人蕉	8.65±0.14	66.4	1.29	0.77±0.03	77.9	0.20
菖蒲+千屈菜	13.38±0.30	49.1	1.20	4.90±0.06	-38.1	-0.06
菖蒲	18.44±0.14	29.7	1.26	4.58±0.09	-29.4	-0.06
菖蒲+美人蕉	18.87±0.38	26.0	0.64	2.74±0.09	20.4	0.08
石菖蒲+菖蒲	21.38±0.22	20.7	1.90	4.76±0.12	-30.7	-0.15
美人蕉+石菖蒲	20.00±0.14	24.7	1.26	3.81±0.17	-6.20	0.03
凤眼莲	12.62±0.28	52.7	4.34	4.24±0.12	-17.9	-0.05
达香蒲	15.65±0.30	39.5	0.82	3.14±0.07	10.2	0.05
花叶美人蕉+芦苇	19.25±0.30	26.6	0.65	4.70±0.12	-32.7	-0.04
空白	21.23±0.30	20.5	—	4.90±0.10	-35.8	—

* C_3 为第 3 次测样时氨氮(或总磷)浓度, E_3 为第 3 次测样时某处理对氨氮(或总磷)的去除率, W_3 为第 3 次测样时单位质量植物去除氨氮(或总磷)质量; 表中数据 C_3 为均值±标准差, E_3 和 W_3 为均值。

不论平均去除率还是单位质量植物去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量的均值, 均有(千屈菜+石菖蒲)>千屈菜(分别为 54.2%和 28.7%, 3.93mg 和 2.38mg), 表明相比单一植物, 千屈菜与石菖蒲的组合能提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果(表 5)。对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率方面, (美人蕉+千屈菜)>千屈菜, (菖蒲+千屈菜)>千屈菜, (石菖蒲+菖蒲)>石菖蒲, (美人蕉+石菖蒲)>石菖蒲。

不论平均去除率还是单位质量植物去除 TP 质量的均值, 均有(千屈菜+石菖蒲)>千屈菜, (美人蕉+千屈菜)>千屈菜(去除率分别为 29.0%和-41.5%), (菖蒲+美人蕉)>菖蒲(去除率分别为 20.4%和-29.4%), (菖蒲+千屈菜)>千屈菜, (美人蕉+石菖蒲)>石菖蒲, 表明相比单一植物, 这 5 种组合能提高 TP 的净化效果。此外, 对 TP 的去除率方面, (石菖蒲+菖蒲)>石菖蒲。

对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的净化效果(以单位质量植物去除氨氮质量表示), 千屈菜和石菖蒲的组合(3.93mg)优于单独的千屈菜(2.38mg); 对 TP 的净化效果(以单位质量植物去除总磷质量表示), 美人蕉和千屈菜的组合、美人蕉和菖蒲的组合、美人蕉和石菖蒲的组合等 3 种组合(分别为 0.07mg、0.08mg、0.03mg)均好于单独的千屈菜、菖蒲、石菖蒲(分别为-0.22mg、-0.06mg、-0.68mg), 这也进一步说明, 石菖蒲去除 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的潜力较大, 美人蕉去除 TP 的潜力较大。

除美人蕉、(美人蕉+千屈菜)、(菖蒲+美人蕉)、达香蒲外, 其它多种植物及组合的处理对总磷的去除率、单位质量植物去除总磷质量出现了负值(表 5), 这可能是由于人工配制污水中氮磷浓度较高($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 28.37mg/L, TP 3.83mg/L), 植物自身组织脱落, 植物体内的有机磷释放到水中而造成的^[24]。

多种植物组合比单种植物能更好地净化水质, 具有更合理的物种多样性^[25-27], 更容易保持生态系统的长期稳定性^[28], 并且会减少病虫害的发生, 因而目前有越来越多的试验采用多种植物的组合. 混合栽种植物的人工湿地较单一栽种植物的人工湿地而言, 植物生长更快, 对污染物的净化效果更好; 这可能是因为不同湿地植物的根系泌氧能力及氮磷吸收性能不同^[29], 有的可以高效地吸收氮, 有的能更好地富集磷, 当使用多种植物组合时有利于植物之间取长补短, 保持较为稳定的净化效果.

2.3 水生植物在高浓度氮磷人工配制污水中的生长状况

对水生植物在人工配制高浓度氮磷污水中的生长状况进行观察和记录, 结果表明, 不同水生植物的生长状况之间存在一定的差异. 以氮磷浓度最高的 2 号人工配制污水($\text{NH}_4^+\text{-N}$ 253.98mg/L、TP 65.16mg/L)为例, 室内水培 5d 后, 水生植物基本均未出现明显的不良反应. 限于篇幅, 本文对植物的生长状况仅进行简要的描述. 菖蒲、美人蕉和石菖蒲等生长状况良好: 菖蒲叶长增加, 部分叶片颜色由亮黄色加深为绿色; 美人蕉质量增加, 叶宽增加, 叶数增加; 石菖蒲质量增加, 叶宽增加. 千屈菜生长状况较好, 质量略有减轻, 叶长和叶宽均增加, 黄嫩的叶子由叶尖和叶脉处开始变绿. 凤眼莲生长状况一般, 质量略有减轻, 叶长减小, 叶宽增加, 叶数增加.

3 结论

1) 选取并考察 10 种湿地水生植物对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 等物质的净化能力. 结果表明, 千屈菜、菖蒲、美人蕉、达香蒲对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 净化效果较好; 美人蕉、凤眼莲、千屈菜、石菖蒲对 TP 净化效果较好.

2) 组合实验结果表明, 适当的水生植物组合能提高 N、P 的净化效果. 千屈菜与石菖蒲的组合能同时提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 与 TP 的净化效果; 美人蕉与千屈菜的组合、菖蒲与美人蕉的组合、菖蒲与千屈菜的组合、美人蕉与石菖蒲的组合等组合能提高 TP 的净化效果.

致谢: 国家海洋局第一海洋研究所刘乐军研究员和李萍副研究员在本文构思写作过程中给予帮助, 谨致谢忱.

4 参考文献

- [1] 刘永懋. 中国水环境污染状况. 中国环境科学, 1994, (4): 23-26.
- [2] 王国祥, 濮培民, 张圣照等. 冬季水生高等植物对富营养化湖水的净化作用. 中国环境科学, 1999, 19(2): 106-109.
- [3] 葛滢, 王晓月, 常杰. 不同程度富营养化水中植物净化能力比较研究. 环境科学学报, 1999, 19(6): 690-692.
- [4] Green MB, Upton J. Constructed reed beds: a cost-effective way to polish wastewater effluents for small communities. *Water Environmental Research*, 1994, 66(3): 188-192.
- [5] 韩潇源, 毕继胜, 宋志文. 水生植物在水污染控制中的应用与发展. 青岛理工大学学报, 2005, 26(6): 88-91.
- [6] 宋志文, 郭本华, 韩潇源等. 潜流型人工湿地污水处理系统及其应用. 工业用水与废水, 2003, 34(6): 5-8.
- [7] 宋志文, 毕学军, 曹军. 人工湿地及其在我国小城市污水处理中的应用. 生态学杂志, 2003, 22(2): 74-78.
- [8] Gérard Merlin, Jean-Luc Pajean, Thierry Lissolo. Performances of constructed wetlands for municipal wastewater treatment in rural mountainous area. *Hydrobiologia*, 2002, 469(1-3): 87-98.
- [9] 严立, 刘志明, 陈建刚等. 潜流式人工湿地净化富营养化景观水体. 中国给水排水, 2005, 21(2): 11-13.
- [10] Headley TR, Huett DO, Davison L. The removal of nutrients from plant nursery irrigation runoff in subsurface horizontal-flow wetlands. *Water Science and Technology*, 2001, 44(11-12): 77-84.
- [11] BRIX H. Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 1994, 29(4): 71-78.
- [12] Tanner CC. Growth and nutrient dynamics of soft-stem bulrush in constructed wetlands treating nutrient-rich wastewaters. *Wetlands Ecology and Management*, 2001, 9(1): 49-73.
- [13] Wang PF, Wang C. Nutrients removing by arrowheads in different growing periods in the transition zone between lands and rivers. *Water Resources*, 2007, 34(4): 471-477.
- [14] 何池全, 赵魁义, 叶居新. 石菖蒲净化富营养化水体的研究. 南昌大学学报(理科版), 1999, 23(1): 73-76.
- [15] 鞠瑾, 张志扬, 唐运平等. 不同植物湿地系统对高盐再生水的除氮能力比较. 中国给水排水, 2006, 22(19): 56-58.

- [16] 吴建强, 黄沈发, 阮晓红等. 江苏新沂河河漫滩表面流人工湿地对污染河水的净化试验. *湖泊科学*, 2006, **18**(3): 238-242.
- [17] Coleman J, Hench K, Garbutt K *et al.* Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands. *Water Air and Soil Pollution*, 2001, **128**: 283-295.
- [18] 周守标, 王春景, 杨海军等. 菰和菖蒲在污水中的生长特性及其净化效果比较. *应用与环境生物学报*, 2007, **13**(4): 454-457.
- [19] 蒋跃平, 葛滢, 岳春雷等. 人工湿地植物对观赏水中氮磷去除的贡献. *生态学报*, 2004, **24**(8): 1718-1723.
- [20] 夏汉平. 人工湿地处理污水的机理与效率. *生态学杂志*, 2002, **21**(4): 51-59.
- [21] 赵桂瑜, 杨永兴, 杨长明. 人工湿地污水处理系统工艺设计研究. *四川环境*, 2005, **24**(6): 24-27, 35.
- [22] 廖红, 严小龙. 高级植物营养学. 北京: 科学出版社, 2003: 115.
- [23] 陈效逖. 自然地理学. 北京: 北京大学出版社, 2001: 168-169.
- [24] 郭焕晓, 马牧源, 孙红文. 中国北部沿海高盐度地区人工湿地植物研究. *铁道工程学报*, 2006, (9): 6-9.
- [25] Stephan A, Meyer AH, Schmid B. Plant diversity affects cultural soil bacteria in experimental grassland communities. *Journal of Ecology*, 2002, (22): 988-998.
- [26] Zak D, Holmes WE, White D. Plant diversity, soil microbial communities, and ecosystem function: are there any links? *Ecology*, 2003, **84**(8): 2042-2050.
- [27] Jiang X, Zhang W, Wang G. Biodiversity effects on biomass production and invasion resistance in annual versus perennial plant communities. In: David L Hawksworth, Alan T Bull eds. *Plant conservation and biodiversity*. Netherlands: Springer Netherlands, 2007: 409-420.
- [28] Tilman D, Knops J, Wedin D. The influence of functional diversity and composition on ecosystem processes. *Science*, 1997, (277): 1300-1302.
- [29] 段志勇, 刘超翔, 施汉昌等. 复合植物床式人工湿地研究. *环境污染治理技术与设备*, 2002, **3**(8): 4-7.