

闻学政, 宋 伟, 张迎颖, 等. 凤眼莲深度净化污水处理厂尾水的效果[J]. 江苏农业学报, 2018, 34(5): 1072-1080.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2018.05.015

凤眼莲深度净化污水处理厂尾水的效果

闻学政, 宋 伟, 张迎颖, 王 岩, 秦红杰, 刘海琴, 邱园园, 严少华, 张志勇
(江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 通过构建三级凤眼莲深度净化塘,对村镇生活污水处理厂尾水进行深度净化。凤眼莲种苗初始投放量为 0.60 kg/m^2 ,三级凤眼莲深度净化塘总有效容积为 $7\,500 \text{ m}^3$,三级凤眼莲深度净化塘运行期间日均接纳一级 A 标准生活污水处理厂尾水 $1\,024.50 \text{ t}$ 。在 2015 年 6 月至 2015 年 10 月的运行期间,凤眼莲总生物量增加了 36.06 倍,凤眼莲植株氮、磷累积总量分别增加了 44.45 倍、55.38 倍;三级凤眼莲净化塘处理尾水效果显著,尾水总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)平均质量浓度分别由 $(9.86 \pm 3.51) \text{ mg/L}$ 、 $(0.38 \pm 0.07) \text{ mg/L}$ 、 $(0.49 \pm 0.09) \text{ mg/L}$ 和 $(7.91 \pm 2.27) \text{ mg/L}$ 降低至 $(2.51 \pm 1.52) \text{ mg/L}$ 、 $(0.10 \pm 0.06) \text{ mg/L}$ 、 $(0.20 \pm 0.08) \text{ mg/L}$ 和 $(1.90 \pm 1.46) \text{ mg/L}$,其中 TN 质量浓度下降值超过 7.0 mg/L ,各污染物去除率分别为 $75.04\% \pm 9.02\%$ 、 $68.76\% \pm 15.81\%$ 、 $59.12\% \pm 13.37\%$ 、 $79.21\% \pm 13.91\%$ 。三级凤眼莲深度净化塘对尾水氮、磷的平均削减速率分别为 $(1\,004.01 \pm 471.68) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(38.25 \pm 9.56) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,其中,第一、第二级净化塘对总氮的总削减速率分别高达 $(1\,069.99 \pm 276.94) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(1\,374.11 \pm 1\,089.69) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,对总磷的削减速率分别高达 $(74.93 \pm 15.99) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(30.65 \pm 25.01) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。运行期间,深度净化塘去除尾水氮、磷总量累计分别为 1100.02 kg 、 40.36 kg ,其中凤眼莲通过同化作用共吸收污水处理厂尾水中氮 218.52 kg 、磷 20.22 kg ,约占尾水氮、磷总削减量的 19.78% 、 50.10% 。利用综合水质标识指数对污水处理厂尾水和深度净化塘出水进行计算,结果表明污水处理厂尾水由 5.322 类降至 3.410 类,达到地表水环境质量标准 III 类标准。

关键词: 凤眼莲; 污水处理厂尾水; 深度净化

中图分类号: X52 文献标识码: A 文章编号: 1000-4440(2018)05-1072-09

Effects of *Eichhornia crassipes* on advanced treatment of tail water in domestic sewage plant

WEN Xue-zheng, SONG Wei, ZHANG Ying-ying, WANG Yan, QIN Hong-jie, LIU Hai-qin, QIU Yuan-yuan, YAN Shao-hua, ZHANG Zhi-yong

(Institute of Agricultural Resource and Environmental Sciences, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: An ecological wastewater purifying project consisting of three ponds with *Eichhornia crassipes* was constructed for in-depth purifying tail water from a town-run wastewater treatment plant. The initial seedling quantity of *Eichhornia crassipes* was 0.60 kg/m^2 , and total effective volume of three stage purification pond was $7\,500 \text{ m}^3$. During operation of the deep purification pond, the acceptance for the first class of A standard of tail water from wastewater treatment plant was

$1\,024.50 \text{ t}$ per day. During the execution of the project (June 2015 to October 2015), total biomass of *Eichhornia crassipes* increased 36.06 times. Nitrogen and phosphorus concentrations in *Eichhornia crassipes* increased 44.45 and 55.38 times, respectively. As the result showed, the ecological engineering could effectively remove nitrogen and phosphorus in the tail water. The concentrations of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), ammonium nitrogen

收稿日期: 2017-11-21

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目 [CX(16)1003-3]; 江苏省重点研发专项 (BE2016338)

作者简介: 闻学政 (1986-), 男, 安徽天长人, 硕士, 助理研究员, 主要从事污染水体生态修复研究, (E-mail) wenxuezheng1@163.com, 宋伟为共同第一作者。

通讯作者: 张志勇, (E-mail) jaaszyzhang@126.com

($\text{NH}_4^+\text{-N}$) and nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^-\text{-N}$) of the tail water were reduced from (9.86 ± 3.51) mg/L, (0.38 ± 0.07) mg/L, (0.49 ± 0.09) mg/L and (7.91 ± 2.27) mg/L to (2.51 ± 1.52) mg/L, (0.10 ± 0.06) mg/L, (0.20 ± 0.08) mg/L and (1.90 ± 1.46) mg/L, respectively. TN concentration declined over 7.0 mg/L. The removal rates of TN, TP, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ were $75.04\%\pm 9.02\%$, $68.76\%\pm 15.81\%$, $59.12\%\pm 13.37\%$, $79.21\%\pm 13.91\%$, respectively. The average deceleration rates of nitrogen and phosphorus in the tailwater of three stage purification pond were $(1\ 004.01\pm 471.68)$ mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$) and (38.25 ± 9.56) mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$), respectively. The nitrogen average deceleration rates in the tailwater of the first and second purification ponds were $(1\ 069.99\pm 276.94)$ mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$) and $(1\ 374.11\pm 1\ 089.69)$ mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$), respectively. And the phosphorus average deceleration rates in the tailwater of the first and second purification ponds were (74.93 ± 15.99) mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$) and (30.65 ± 25.01) mg/($\text{m}^2\cdot\text{d}$), respectively. The cumulative removal amount of nitrogen and phosphorus in the tail water by the purification pond was 1 100.02 kg and 40.36 kg. Nitrogen 218.52 kg and phosphorus 20.22 kg in the tailwater of sewage treatment plant were absorbed by *Eichhornia crassipes* through assimilation, accounting for 19.78% and 50.10% of total reduction of nitrogen and phosphorus in tail water. The comprehensive water quality identification index was used to calculate the effluent of the tail water from the sewage treatment plant and the deep purification pond. After deep purified by *Eichhornia crassipes*, the tail water reduced from class 5.322 to class 3.410, and reached the standard value of class III of surface water.

Key words: *Eichhornia crassipes*; tail water in domestic sewage plant; advanced treatment

江苏省太湖流域是全国人口最稠密、经济最发达和城市化程度最高的地区之一^[1],在中国社会经济发展中具有举足轻重的地位^[2]。但是 20 世纪 90 年代以后太湖流域地区由于土地利用格局的变化,网围养鱼,农业面源污染等原因,水环境污染严重,导致湖泊富营养化程度日益加重,水华出现的频率也越来越高,严重影响该地区工农业生产的发展和人民生活饮用水的安全^[3]。特别是 2007 年 5 月太湖流域发生蓝藻暴发重大水污染事件以及引发无锡供水危机^[4]。此后,环太湖流域城镇污水处理厂开始严格执行国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)规定的一级 A 标准,并推动了全国城镇污水处理厂提标改造和扩建、新建工作^[5]。但是一级 A 标准最高允许排放的氮、磷质量浓度(分别为 15.0 mg/L 和 1.0 mg/L)仍然比《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中 V 类水总氮、总磷限值标准分别高出 6.5 倍和 4.0 倍。

江苏省太湖流域 15 条主要入湖河流的污染负荷占江苏省太湖入湖污染总负荷的 80% 以上,污水处理厂尾水经河道汇入太湖后对湖体氮、磷负荷的贡献率超过 40%^[3]。如果将治污的关口前移,在污水处理厂尾水的氮、磷等污染物排入河、湖前将它拦截、去除,技术难度和治理成本就要低得多。

常见的污水处理厂尾水氮、磷深度净化方法在应用过程中存在一定的缺陷,例如:物理过滤或吸附法,再生成本高,出水水质较差^[6];化学沉淀或氧化

剂氧化法,运行费用高,推广难度大,容易造成二次污染,目前在大多数深度处理厂都很难维持长期运行^[6];超滤或反渗透法,对膜压控制要求高,因膜容易阻塞和污染,对预处理要求严格,反渗透法会产生大量的副产物反渗透浓水(占处理尾水的 25%~50%)难以处理^[7-8];人工湿地法,基质易堵塞,植物腐败会产生二次污染^[9]。

在净化方法中,水生植物净化塘技术因其太阳能驱动,环境友好,成本低廉,可恢复水体自净能力等优点,已逐渐成为一种重要的生态治理手段^[10-14]。刘丽珠等^[15]、王妹等^[16]利用水生植物净化塘和人工湿地组合工艺净化规模化池塘养殖尾水,净化效果显著。杨鹏等^[17]利用多种水生植物组合三级净化塘处理农业种养废水,总氮、总磷去除率可达 90% 以上。本研究以污染物源头减量和河流湖泊水质持续改善为目标,利用三级串联凤眼莲深度净化塘处理村镇生活污水处理厂尾水,以期对生活污水尾水深度生态处理工程化技术的应用提供理论依据。

1 材料与方法

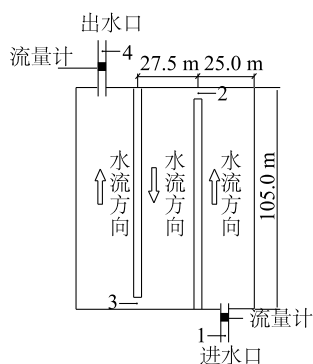
1.1 污水处理厂尾水与深度净化塘

污水处理厂尾水来源于南京市高淳区东坝镇污水处理厂。该厂主要处理东坝镇及附近的生活污水,采用 A²O 工艺处理污水,日处理能力为 2 000 t,生活污水经处理后尾水水质达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)一级 A 标准,尾水直接

排入临近连通太湖的胥河。在本试验期间,尾水总氮(9.86 ± 3.51) mg/L,总磷(0.38 ± 0.07) mg/L,铵态氮(0.49 ± 0.09) mg/L,硝态氮(7.91 ± 2.27) mg/L,高锰酸盐指数(4.37 ± 0.48) mg/L,流量为($1\,024.5 \pm 210.8$) t/d,水力负荷(0.13 ± 0.03) $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,水力停留时间为(7.32 ± 1.51) d。

三级凤眼莲深度净化塘设计与建设:生态工程位于东坝镇污水处理厂北侧,利用污水处理厂周边闲置土地,采用挖土的方式建成(图1)。深度净化塘采用三级串联的方式组成,各级净化塘长度均为105.0 m,深度均为1.2 m,第1级净化塘宽度为25.0 m,第2、3级深度净化塘宽度均为27.5 m。各

级净化塘之间采用夯土方式隔开,净化塘底部和岸堤均铺设防水布防止渗漏,出水口设置溢流堰使深度净化塘水深保持为1 m。深度净化塘总面积为8 400 m^2 ,总有效容积为7 500 m^3 。进水口和出水口均设置流量计监测尾水进出流量。2015年2-4月为深度净化塘基础建设阶段,铺设污水处理厂尾水进水管,于2015年5月底正式接入污水处理厂尾水。2015年5月底至6月底为凤眼莲种苗投放、扩繁与生态工程试运行阶段,6月底深度净化塘开始正式运行。根据本课题组前期研究结果^[18-21],凤眼莲种苗最佳初始投放量为0.5~1.0 kg/m^2 ,本试验初始投放量为0.6 kg/m^2 。



1:进水采样点;2:一级净化采样点;3:二级净化采样点;4:三级净化采样点。

图1 三级凤眼莲深度净化塘结构示意图(左)与现场效果图(中、右)

Fig.1 Schematic diagram of the deep purification pond (left) and field effect diagram (middle, right)

1.2 深度净化塘运行及管理

试验时间为2015年6月底至2015年10月底。2015年11月初至11月中旬实施凤眼莲的打捞加工处置工作。

1.3 水质监测方法

2015年6月30日开始试验,每隔7 d于上午9:00采集水样(采样点见图1),带回实验室立即进行分析,测定水体总氮(TN)、铵态氮(NH_4^+-N)、硝态氮(NO_3^--N)、总磷(TP)质量浓度和高锰酸盐指数(COD_{Mn})。总氮、铵态氮、硝态氮和总磷质量浓度采用德国SEAL AA3连续流动分析仪测定^[22-23],高锰酸盐指数采用酸性高锰酸盐滴定法^[24]测定。溶解氧(DO)、pH值、水温采用YSI professional plus (USA)测定仪现场测定。

1.4 凤眼莲植株生物量、叶绿素含量及全氮和全磷含量测定

从2015年6月30日开始每隔15 d采集凤眼莲

植株样,现场测定植物的生物量,植株样带回实验室测定植物体内氮、磷含量。凤眼莲单位面积生物量的测定采用质量法,将1 m^2 水面上的凤眼莲捞起放在筛网上,直至无滴水时称质量。使用SPAD-502叶绿素计(日本美能达公司制造)测定凤眼莲叶片的SPAD值。凤眼莲植株全氮、全磷含量采用浓 H_2SO_4 - H_2O_2 消解法^[25]测定。

1.5 数据处理

采用统计软件SPSS 16.0进行方差分析及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 凤眼莲生长特征及氮、磷吸收能力

2015年10月底试验结束时,一级和三级净化塘的凤眼莲根长分别为(15.67 ± 5.25) cm和(36.13 ± 7.75) cm,一级净化塘的根长显著低于二、三级净化塘($P < 0.05$);一级和三级净化塘的凤眼莲

株高分别为 (44.13 ± 7.94) cm 和 (23.88 ± 4.22) cm,一级净化塘的株高显著高于二、三级净化塘 ($P < 0.05$);根长/株高由一级净化塘的 (0.35 ± 0.06) 增加到三级净化塘的 (1.51 ± 0.27),增加了 331.43% (表 1)。

凤眼莲根质量和茎叶质量变化趋势分别与根长和株高变化一致,根冠比(根质量/茎叶质量)增加

尤为显著 ($P < 0.05$),平均增加了 640%。而单株质量平均由一级净化塘的 304.97 g 降至三级净化塘的 138.06 g,降低了 54.73%。凤眼莲叶片的 SPAD 值沿着水流方向逐渐降低,一级净化塘的凤眼莲 SPAD 值显著高于三级净化塘 ($P < 0.05$),但与二级净化塘的差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 1 各级深度净化塘凤眼莲形态特征

Table 1 Morphological characteristics of *Eichhornia crassipes* in the different deep purification ponds

净化塘	叶片 SPAD 值	根长 (cm)	株高 (cm)	根长/株高	单株根质量 (g)	单株茎叶质量 (g)	根质量/茎叶质量
一级净化塘	$48.02 \pm 3.80a$	$15.67 \pm 5.25b$	$44.13 \pm 7.94a$	$0.35 \pm 0.06c$	$28.64 \pm 3.88c$	$276.33 \pm 37.22a$	$0.10 \pm 0.01c$
二级净化塘	$43.29 \pm 2.78ab$	$26.40 \pm 8.81b$	$25.80 \pm 4.48b$	$1.02 \pm 0.18b$	$49.17 \pm 7.41b$	$104.09 \pm 5.57b$	$0.47 \pm 0.07b$
三级净化塘	$41.76 \pm 2.33b$	$36.13 \pm 7.75a$	$23.88 \pm 4.22b$	$1.51 \pm 0.27a$	$58.74 \pm 5.33a$	$79.32 \pm 5.41c$	$0.74 \pm 0.07a$

同一列不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

凤眼莲生物量变化呈现夏季(5-8月)快速增长,秋季(9-11月)生长速率减缓的趋势(图 2)。凤眼莲种苗投放后短期内(6月份)生长速率即达到了最大值 (252.20 ± 35.75) $g/(m^2 \cdot d)$,一级、二级、三级净化塘生长速率分别为 (273.38 ± 9.38) $g/(m^2 \cdot d)$ 、(251.75 ± 2.85) $g/(m^2 \cdot d)$ 、(231.47 ± 13.89) $g/(m^2 \cdot d)$ 。之后由于净化塘生长空间有

限,凤眼莲群体密度过大,生长速率受到限制,加之水温、气温降低等原因生长速率逐渐降低,至 11 月生长基本停止。

一级净化塘、二级净化塘、三级净化塘凤眼莲生物量分别由初始的 (1.50 ± 0.21) t 增至 (75.75 ± 0.50) t、(52.94 ± 0.72) t、(38.07 ± 1.15) t,分别增长了 49.50 倍、34.29 倍、24.38 倍。

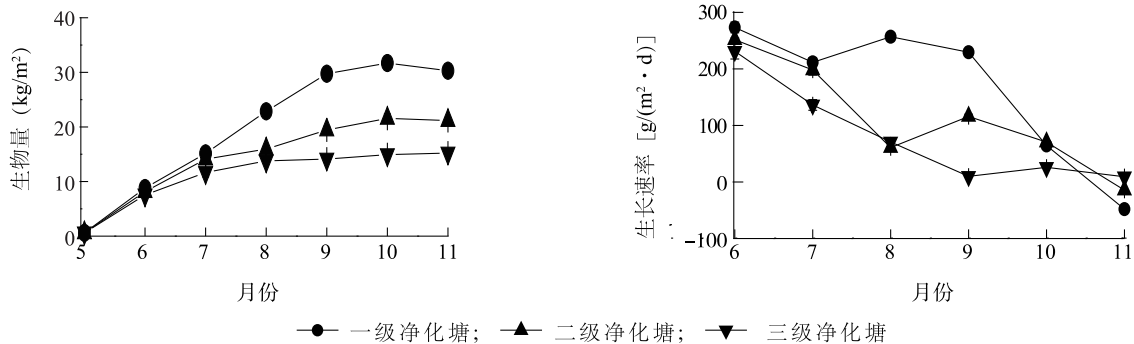


图 2 各级深度净化塘凤眼莲的生物量、生长速率变化

Fig.2 Changes of biomass and growth rate of *Eichhornia crassipes* in the different deep purification ponds

凤眼莲同化作用是去除水体氮、磷的主要途径之一。从凤眼莲植株氮、磷含量变化(表 2)可以看出,绝大多数时间内凤眼莲植株氮、磷含量顺着水流方向呈现逐渐降低趋势,并且表现为随着时间推移各级深度净化塘凤眼莲氮、磷含量有不同程度增加。通过不同深度净化塘凤眼莲氮、磷含量差异性比较发现,绝大多数时间内一级净化塘与三级净化塘凤眼莲氮、磷含量差异显著 ($P < 0.05$)。

根据凤眼莲生物增长量和组织氮、磷含量(图 3),初始投放时(5月)凤眼莲组织氮、磷总量分别为 (4.85 ± 0.54) kg、(0.37 ± 0.02) kg,凤眼莲采收时(11月)组织氮、磷总量分别为 (220.43 ± 20.76) kg、(20.86 ± 2.18) kg,计算得出生态工程运行期间,凤眼莲通过同化作用共吸收累积污水处理厂尾水中氮 215.58 kg、磷 20.49 kg,凤眼莲植株氮、磷累积总量分别增加了 44.45 倍、55.38 倍。

表 2 各级深度净化塘不同月份凤眼莲植株氮、磷含量变化

Table 2 Nitrogen and phosphorus contents of *Eichhornia crassipes* in the different months and deep purification ponds

月份	氮含量 (mg/g)			磷含量 (mg/g)		
	一级净化塘	二级净化塘	三级净化塘	一级净化塘	二级净化塘	三级净化塘
5		19.98±0.87			1.66±0.16	
6	22.94±2.66a	20.65±2.43b	20.49±0.60b	2.17±0.09a	1.77±0.11b	1.52±0.19b
7	20.50±3.66a	21.35±0.85a	18.46±0.57a	2.29±0.35a	1.77±0.34b	1.41±0.13c
8	21.48±3.78a	20.08±3.06ab	18.32±0.93b	1.76±0.21a	1.71±0.33a	1.47±0.28a
9	22.66±1.83a	20.13±1.29ab	18.19±1.82b	2.24±0.31a	1.74±0.08b	1.62±0.02b
10	26.50±0.90a	23.25±1.16b	18.84±2.30c	2.51±0.13a	2.33±0.49a	1.68±0.48b
11	26.50±4.34a	24.64±2.67b	19.07±3.04c	2.20±0.36a	2.15±0.32ab	1.96±0.15b

同一列不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

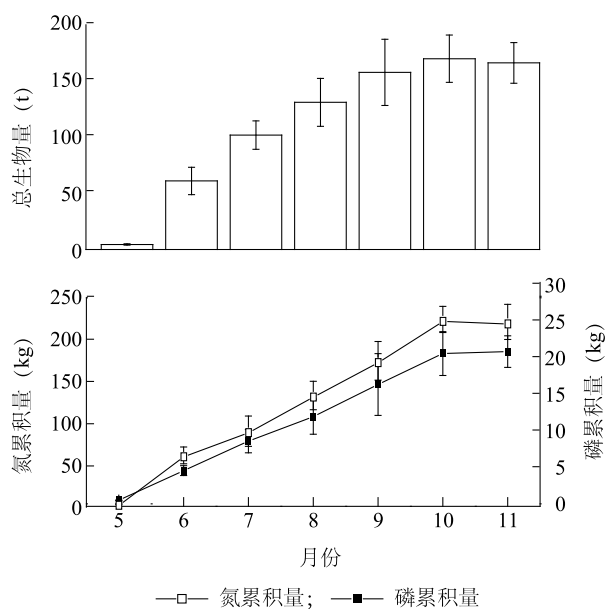


图 3 深度净化塘凤眼莲总生物量及氮、磷累积量

Fig.3 The total biomass, nitrogen and phosphorus accumulation of *Eichhornia crassipes* in the deep purification ponds

2.2 凤眼莲深度净化塘对污水处理厂尾水的净化效果

凤眼莲深度净化塘对污水处理厂尾水的 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 均有显著的去除效果(图 4)。尾水进水 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均质量浓度分别为 (9.86 ± 3.51) mg/L、 (0.38 ± 0.07) mg/L、 (0.49 ± 0.09) mg/L 和 (7.91 ± 2.27) mg/L,经三级净化塘深度净化后,出水 TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的平均质量浓度分别降低至 (2.51 ± 1.52) mg/L、 (0.10 ± 0.06)

mg/L、 (0.20 ± 0.08) mg/L 和 (1.90 ± 1.46) mg/L,去除率分别达到 $75.04\%\pm9.02\%$ 、 $68.76\%\pm15.81\%$ 、 $59.12\%\pm13.37\%$ 、 $79.21\%\pm13.91\%$ 。

各级净化塘出水 TN 质量浓度分别为:一级净化塘 (6.93 ± 3.69) mg/L,二级净化塘 (3.45 ± 1.83) mg/L,三级净化塘 (2.51 ± 1.52) mg/L;各级净化塘出水 TP 质量浓度分别为:一级净化塘 (0.21 ± 0.09) mg/L,二级净化塘 (0.13 ± 0.08) mg/L,三级净化塘 (0.10 ± 0.06) mg/L。可见,凤眼莲深度净化生态工程对污水处理厂尾水 TN、TP 的去除作用主要发生在一、二级净化塘。

污水处理厂尾水经凤眼莲三级净化塘净化后出水 COD_{Mn} 反而略有升高。这是由于凤眼莲深度净化塘进水高锰酸盐指数(COD_{Mn})处于较低水平(低于《地表水环境质量标准》中Ⅲ类中高锰酸盐指数的限值标准),限制了凤眼莲深度净化塘对尾水有机物的进一步去除效率^[26],且水生植物根系分泌的可溶性有机碳(主要以有机酸为主)也可能会增加出水高锰酸盐指数^[27]。

2.3 凤眼莲深度净化塘对尾水水质改善效果的综合评价

运行期间,深度净化塘三级出水总磷(TP)、铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)质量浓度和高锰酸盐指数(COD_{Mn})平均值分别达到《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅱ类、Ⅱ类、Ⅲ类限值标准,总氮(TN)平均质量浓度略高于Ⅴ类标准,但是7月份、8月份深度净化塘三级出水总氮(TN)质量浓度平均为 (1.47 ± 0.27) mg/L,达到Ⅳ类水标准(表3)。

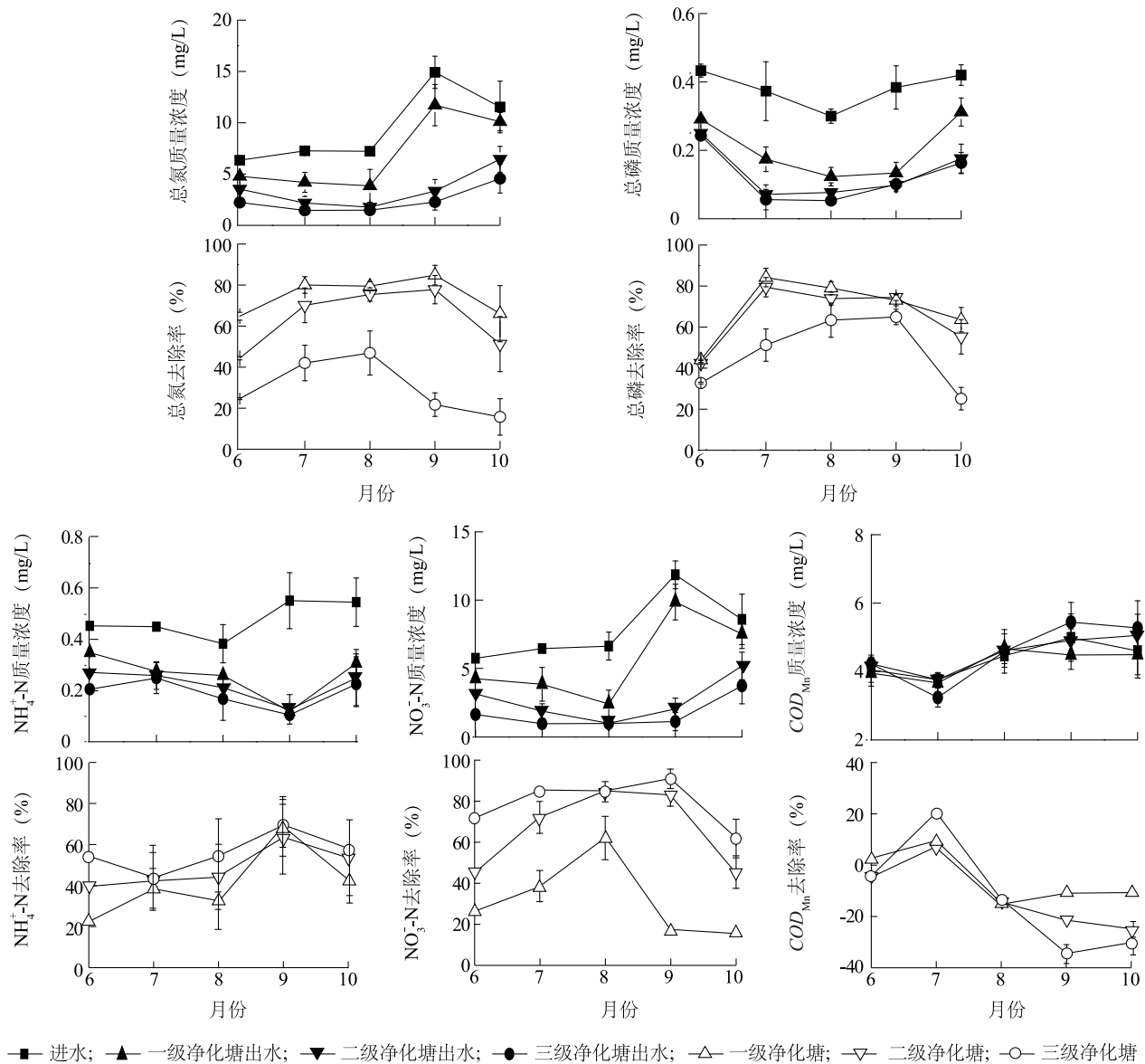


图4 各级深度净化塘对污水处理厂尾水的净化效果

Fig.4 Purification effect of different *Eichhornia crassipes* purification ponds on sewage treatment plant tail water

表3 深度净化塘进水及出水主要污染物质量浓度变化

Table 3 The change of concentrations of main pollutants in the influent and effluent water of deep purification pond

水质指标	深度净化塘进水 污染物质量浓度 (mg/L)	深度净化塘出水 污染物质量浓度 (mg/L)	污染物 去除率 (%)
TN	9.86±3.51	2.51±1.52	75.04±9.02
TP	0.38±0.07	0.10±0.06	68.76±15.81
NO ₃ ⁻ -N	7.91±2.27	1.90±1.46	79.21±13.91
NH ₄ ⁺ -N	0.49±0.09	0.20±0.08	59.12±13.37
COD _{Mn}	4.37±0.48	4.55±0.89	-3.41±10.71

针对上述测定指标中的总氮(TN)、总磷(TP)、铵态氮(NH₄⁺-N)质量浓度和高锰酸盐指数(COD_{Mn}),采用综合水质标识指数法^[28-29]对凤眼莲深度净化塘进水及三级净化出水进行评价,设定该功能区划为地表水环境质量标准Ⅲ类标准。综合水质标识指数由整数位和3位或4位小数位组成,其结构为: $I_{wq} = X_1 X_2 X_3 X_4$,其中, X_1 为河流总体的综合水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间内所处位置,从而实现在同类水中进行水质优劣比较; X_3 为参与综合水质评价的水质指标中,劣于水环境功

能区目标的单项指标数量; X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果。从表 4 中可以看出,凤眼莲深度净化塘三级净化出水的综合水质级别达到地表水环境质量标准Ⅲ类标准,以尾水排入水

域——胥河(Ⅳ类)^[30-31]作为水环境功能区进行达标评价的依据,结果表明污水处理厂尾水经深度净化塘处理后的出水不仅完全达到排放要求,甚至可以作为胥河的补充水源。

表 4 凤眼莲深度净化塘进水、出水水质综合标指数法评价结果

Table 4 Comprehensive water quality of influent and effluent in the deep purification ponds with *Eichhornia crassipes*

水体	TN	TP	NH_4^+-N	COD_{Mn}	综合水质类别
深度净化塘进水	10.07	4.81	3.00	3.20	5.322
深度净化塘出水	6.31	2.00	2.10	3.30	3.410

2.4 凤眼莲对污水处理厂尾水氮、磷的削减能力

试验结果(图 5)表明,凤眼莲深度净化塘对污水处理厂尾水氮的平均削减速率为 $(1\,004.01 \pm 471.68) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,其中一级净化塘平均氮削减速率为 $(1\,069.99 \pm 276.94) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,二级净化塘平均氮削减速率为 $(1\,374.11 \pm 1\,089.69) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,三级净化塘平均氮削减速率为 $(448.68 \pm 347.86) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。试验期间,一、二级深度净化塘单位面积氮削减速率显著高于三级深度净化塘($P < 0.05$)。磷的平均削减速率为 $(38.25 \pm 9.56) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,其中一级净化塘平均磷削减速率为 $(74.93 \pm 15.99) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,二级净化塘平均磷削减速率为 $(30.65 \pm 25.01) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,三级净化塘平均磷削减速率为 $(4.37 \pm 3.70) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。一级深度净化塘单位面积磷削减速率显著高于二、三级深度净化塘($P < 0.05$)。

深度净化塘运行期间(6-10月),对污水处理厂尾水氮、磷去除总量分别为 $1\,100.02 \text{ kg}$ 、 40.36 kg ,凤眼莲氮、磷总吸收量(即凤眼莲植株氮、磷含量)分别为 218.52 kg 、 20.22 kg 。不同月份凤眼莲吸收作用对污水处理厂尾水氮去除的贡献率介于 11.54% 至 46.06% 之间,平均 19.78% ,是尾水氮去除的重要途径之一;对尾水磷去除的贡献率介于 38.64% 至 70.42% 之间,平均为 50.10% ,为尾水磷去除的主要途径(表 5)。

3 讨论

3.1 凤眼莲生长特征与水质的关系

有研究结果^[32-33]表明,pH 值接近中性以及氮、磷含量较高且风浪较小的水体有利于凤眼莲快速生

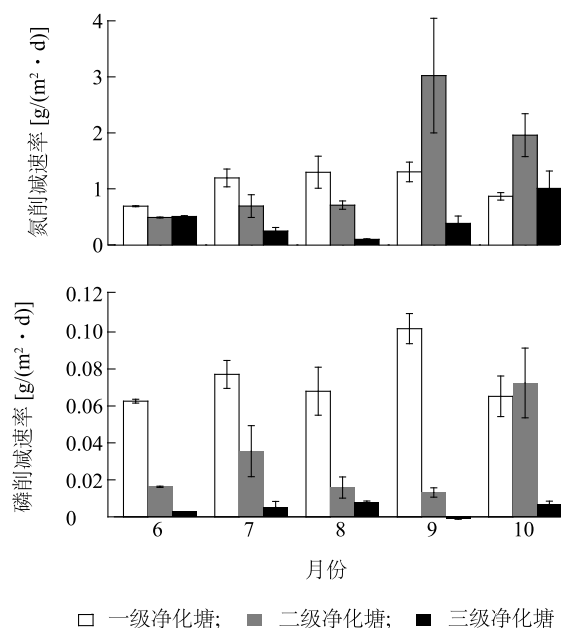


图 5 各级单位面积深度净化塘对污水处理厂尾水氮、磷削减速率

Fig.5 Reduction rate of nitrogen and phosphorus in the tail water of sewage treatment plant by different deep purification ponds per unit area *Eichhornia crassipes* in the

长,并且氮源对凤眼莲生长的影响远大于磷源的影响。本研究中,一、二、三级深度净化塘出水 TN 质量浓度分别为 $(6.93 \pm 3.69) \text{ mg/L}$ 、 $(3.45 \pm 1.83) \text{ mg/L}$ 、 $(2.51 \pm 1.52) \text{ mg/L}$,一、二、三级深度净化塘出水 TP 质量浓度分别为 $(0.21 \pm 0.09) \text{ mg/L}$ 、 $(0.13 \pm 0.08) \text{ mg/L}$ 、 $(0.10 \pm 0.06) \text{ mg/L}$ 。各级深度净化塘凤眼莲根长、根质量在水流流程方向上随着水体氮、磷质量浓度的降低而逐渐增加,而凤眼莲株高、茎叶质量则在水流流程方向上随着水体氮、磷质量浓度逐渐降低而降低。水体污染物(TN)质量浓度与凤眼莲根

系/株高长度比($r = -0.842, P < 0.05$)、根系/茎叶质量比($r = -0.787, P < 0.05$)呈显著性负相关关系。

表5 凤眼莲对污水处理厂尾水氮、磷去除的表观贡献率

Table 5 Contribution of *Eichhornia crassipes* to nitrogen and phosphorus removal in tail water of sewage treatment plant

月份	日平均流量 (t/d)	尾水表观去除总量(kg)		凤眼莲总吸收量(kg)		表观贡献率(%)	
		氮	磷	氮	磷	氮	磷
6	1 014.41	125.20	5.80	57.67	4.08	46.06	70.42
7	894.47	160.90	8.79	28.65	4.06	17.81	46.16
8	885.94	157.58	6.77	42.24	3.38	26.80	49.87
9	937.68	355.42	7.96	41.02	4.43	11.54	55.65
10	1 390.40	300.92	11.04	48.94	4.27	16.26	38.64
合计	5 122.90	1 100.02	40.36	218.52	20.22	19.87	50.10

为了适应环境中氮、磷等营养物质质量浓度逐渐降低的变化,凤眼莲根冠比不断增加,从而提高植株对营养物质的吸收能力,这与 Xie 等^[34]、秦红杰等^[35]的研究结果相似。凤眼莲叶片的 SPAD 值顺着水流方向而逐渐降低,一级深度净化塘中凤眼莲叶片呈现深绿色,二、三级深度净化塘凤眼莲叶片颜色逐渐变浅,呈现浅绿略带黄色。说明水体的富营养化程度是凤眼莲生长形态特征的主要影响因素。

3.2 凤眼莲对污水处理厂尾水氮、磷去除的主要机制

一般说来,水生植物修复系统中氮的去除途径主要包括植物吸收、微生物硝化-反硝化作用、根系吸附和根系脱落等。本研究团队在前期研究中发现,凤眼莲除自身根系附着大量硝化、反硝化细菌外,还可以增加水体中硝化、反硝化细菌的数量^[36],且凤眼莲根系分泌的氧及有机碳加强了水体硝化和硝化-反硝化作用,进而促进水体脱氮^[37]。本研究结果表明,硝化-反硝化作用为水体脱氮的主要途径,这与马涛等^[38]研究的结果相似。因此推测,本研究中三级净化塘深度净化工程对污水处理厂尾水氮的主要去除途径可能是微生物的硝化-反硝化作用。

植物体吸收、底泥吸附(絮凝沉淀)、植物吸附、磷挥发是深度净化塘的主要去磷途径^[39]。本研究中凤眼莲吸收作用是深度净化生态工程去除尾水磷的最主要途径,占尾水磷去除贡献率的 50.10%。底泥吸附(絮凝沉淀)作用去除磷的机理主要是通过磷酸盐与水体中金属离子进行一系列化学反应^[40],再由尾水中铝离子(污水处理厂添加的聚氯

化铝)的絮凝作用沉降到底泥而被固定。底泥吸附(絮凝沉淀)作用去除的磷在缺氧^[41]、氧化还原电位低^[42]、温度高^[43]的环境中才有利于磷的释放,而本研究尾水中 DO 含量、氧化还原电位均较高,不利于底泥中磷的释放,故底泥吸附(絮凝沉淀)作用去除的磷不易被释放出来。而磷挥发在磷去除过程中所占比例极小可以忽略不计^[39]。

参考文献:

- [1] 尹荣尧,周 燕,朱晓东. 江苏省太湖水污染防治对策措施[J]. 环境保护科学,2010,36(3):93-95.
- [2] 许 明,储时雨,蒋永伟,等. 太湖流域化工园区污水处理厂尾水人工湿地深度处理实验研究[J]. 水处理技术,2014,40(5):87-91.
- [3] 张利民,孙卫红,程 炜,等. 太湖入湖河流水环境综合治理[J]. 环境监测管理和技术,2009,21(5):1-5.
- [4] 叶建春. 实施太湖流域综合治理与管理改善流域水环境[J]. 水利水电技术,2008(1):20-24.
- [5] 赵联芳,黄靖宇. 苏州太仓市污水处理厂尾水排放河道的治理[J]. 水资源保护,2015,31(1):63-68.
- [6] 常会庆,王 浩. 城市尾水深度处理工艺及效果研究[J]. 生态环境学报,2015,24(3):457-462.
- [7] 孙迎雪,胡洪营,高 岳,等. 城市污水再生处理反渗透系统 RO 浓水处理方式分析[J]. 给水排水,2014,50(7):36-42.
- [8] 孙迎雪,胡洪营,汤 芳,等. 城市污水再生处理反渗透系统 RO 浓水的水质特征[J]. 环境科学与技术,2015,38(1):72-79.
- [9] 李 宁. 小城镇污水生物处理方法的比较研究[D].扬州:扬州大学,2009.
- [10] 刘作云,彭忆兰,付美云. 3 种常见水生植物对养殖废水中化学需氧量的去除效果[J]. 南方农业学报,2016,47(6):911-915.
- [11] SALT D E, SMITH R D, RASKIN I. Phytoremediation [J]. Annu-

- al Reviews of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1998, 49: 643-668.
- [12] 董文斌, 何铁光, 蒙炎成, 等. 狐尾藻对养殖废水的减控去污效果[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7): 1204-1210.
- [13] BATTY L C, DOLAN C. The potential use of phytoremediation for sites with mixed organic and inorganic contamination [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2013, 3(3): 217-259.
- [14] 刘国锋, 何俊, 华伯仙, 等. 控养速生植物治理污染水体的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(21): 1-6.
- [15] 刘丽珠, 张志勇, 宋伟, 等. 凤眼莲净化塘与人工湿地组合工艺对养殖尾水的净化效能[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(10): 389-393.
- [16] 王妹, 杜兴华, 张金路, 等. 组合湿地系统对养殖尾水的净化效果[J]. 渔业现代化, 2016, 43(3): 39-42.
- [17] 杨鹏, 张克强, 倪喜云, 等. 三级净化塘生态修复技术用于处理农业种养殖废水[J]. 中国给水排水, 2013, 29(8): 87-90.
- [18] 闻学政, 刘海琴, 张迎颖, 等. 凤眼莲和水浮莲对滇池草海水体中氮去除效果的比较研究[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(4): 388-394.
- [19] 张志勇, 刘海琴, 严少华, 等. 水葫芦去除不同富营养化水体中氮、磷能力的比较[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(5): 1039-1046.
- [20] 张志勇, 郑建初, 刘海琴, 等. 凤眼莲对不同程度富营养化水体氮磷的去除贡献研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 152-157.
- [21] 刘凤梅. 温度对凤眼莲浮岛净化效果影响的研究[J]. 环境保护科学, 2013(3): 9-11, 54.
- [22] 夏倩, 刘凌, 王流通, 等. 连续流动分析仪在水质分析中的应用[J]. 分析仪器, 2012(2): 64-68.
- [23] 沈建红, 闫国利, 曹雪英. AA3 流动注射仪同时测定水中氨氮和氰化物[J]. 预防医学论坛, 2012, 18(6): 441-442, 445.
- [24] 李莉, 李晓, 肖溶, 等. 高锰酸盐指数(酸性法)测定方法的探讨[J]. 河北农业科学, 2009(8): 165-166, 170.
- [25] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [26] 曾永刚. 人工湿地对微污染水中污染物去除特征研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- [27] 刘雯, 丘锦荣, 卫泽斌, 等. 植物及其根系分泌物对污水净化效果的影响[J]. 环境工程学报, 2009, 3(6): 971-976.
- [28] 徐祖信. 我国河流单因子水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(3): 321-325.
- [29] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(4): 482-488.
- [30] 谷先坤, 谷孝鸿, 曾庆飞, 等. 固城湖及其出入湖河道水质时空分布差异与历年变化趋势分析[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32(1): 68-75.
- [31] 杨红卫, 王晓燕, 李萍, 等. 基于集对分析理论的南京市饮用水水源地水质评价[J]. 水电能源科学, 2013(6): 66-68.
- [32] 张迎颖, 张志勇, 王亚雷, 等. 滇池不同水域凤眼莲生长特性及氮磷富集能力[J]. 生态与农村环境学报, 2011, 27(6): 73-77.
- [33] 周喆. 水质条件对外来入侵生物水葫芦生长的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2008.
- [34] XIE Y H, YU D. The significance of lateral roots in phosphorus (P) acquisition of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) [J]. Aquatic Botany, 2003, 75(4): 311-321.
- [35] 秦红杰, 张志勇, 刘海琴, 等. 两种漂浮植物的生长特性及其水质净化作用[J]. 中国环境科学, 2016, 36(8): 2470-2479.
- [36] 高岩, 易能, 张志勇, 等. 凤眼莲对富营养化水体硝化、反硝化脱氮释放 N_2O 的影响[J]. 环境科学学报, 2012, 32(2): 349-359.
- [37] 马涛, 易能, 张振华, 等. 凤眼莲根系分泌氧和有机碳规律及其对水体氮转化影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 2003-2013.
- [38] 马涛, 张振华, 易能, 等. 凤眼莲及底泥对富营养化水体反硝化脱氮特征的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(12): 2451-2459.
- [39] 吴湘, 叶金云, 杨肖娥, 等. 生态浮岛植物在富营养化养殖水体中去磷途径的初步分析[J]. 水产学报, 2011, 35(6): 905-910.
- [40] 梁威, 吴振斌. 人工湿地对污水中氮磷的去除机制研究进展[J]. 环境科学动态, 2000(3): 32-37.
- [41] 冯海艳, 李文霞, 杨忠芳, 等. 上覆水溶解氧水平对苏州城市河道底泥吸附/释放磷影响的研究[J]. 地学前缘, 2008(5): 227-234.
- [42] 黄廷林, 周瑞媛, 夏超, 等. 氧化还原电位及微生物对水库底泥释磷的影响[J]. 环境化学, 2014, 33(6): 930-936.
- [43] 汪家权, 孙亚敏, 钱家忠, 等. 巢湖底泥磷的释放模拟实验研究[J]. 环境科学学报, 2002, 22(6): 738-742.

(责任编辑: 张震林)