

复合型生态浮床净化污水厂尾水的效能研究

戴谨微, 陈 盛, 曾歆花, 何圣兵, 黄荣振, 周伟丽
(上海交通大学 环境科学与工程学院, 上海 200240)

摘 要: 污水厂尾水具有可生物降解有机物含量低、氮磷含量较高的特点。采用融合了生物、生态两类技术特点的复合型生态浮床净化模拟污水厂尾水,考察其对氮、磷的净化效能。结果表明,当 HRT 为 2 d 时,复合型生态浮床系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 $(86.89 \pm 13.18)\%$ 、 $(22.19 \pm 6.57)\%$ 、 $(76.10 \pm 24.31)\%$,单位面积去除负荷分别达到了 (664.29 ± 100.71) 、 (638.97 ± 178.97) 、 $(61.71 \pm 15.12) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$;当 HRT 为 3 d 时,对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 $(98.69 \pm 0.81)\%$ 、 $(20.56 \pm 2.63)\%$ 、 $(91.80 \pm 5.52)\%$,单位面积去除负荷则有所降低,分别为 (473.62 ± 36.72) 、 (395.61 ± 64.10) 、 $(45.79 \pm 5.40) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

关键词: 复合型生态浮床; 污水厂尾水; 黄菖蒲; 氮; 磷

中图分类号: TU992.3 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)03-0077-05

Treatment of Tail Water from Wastewater Treatment Plant by Integrated Ecological Floating-bed

DAI Jin-wei, CHEN Sheng, ZENG Xin-hua, HE Sheng-bing, HUANG Jung-chen, ZHOU Wei-li

(School of Environmental Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Tail water from wastewater treatment plants is low in biodegradable organic matter and high in nitrogen and phosphorus concentration. An integrated ecological floating-bed which has combined characteristics of bio-technology and eco-technology was utilized in this study to purify synthetic tail water from wastewater treatment plants. The nitrogen and phosphorus removal efficiencies were investigated during the experiment. The results showed that under a hydraulic retention time of 2 d, the average removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP by the integrated ecological floating-bed were $(86.89 \pm 13.18)\%$, $(22.19 \pm 6.57)\%$, and $(76.10 \pm 24.31)\%$, respectively; and the average removal loads per area were $(664.29 \pm 100.71) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(638.97 \pm 178.97) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $(61.71 \pm 15.12) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively. Under a hydraulic retention time of 3 d, the average removal rates of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, TN and TP reached $(98.69 \pm 0.81)\%$, $(20.56 \pm 2.63)\%$ and $(91.80 \pm 5.52)\%$, respectively; while, removal loads per area decreased to $(473.62 \pm 36.72) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, $(395.61 \pm 64.10) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, and $(45.79 \pm 5.40) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, respectively.

Key words: integrated ecological floating-bed; tail water from wastewater treatment plant; *Iris pseudacorus* L.; nitrogen; phosphorus

当前,绝大多数城市污水厂的尾水以一级 A 或一级 B 标准经由河道排入受纳水体,其 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 含量均远高于 V 类地表水标准限值。对于某些缺水型城市而言,污水厂尾水往往是其市区河道的补水水源,因此河道常成为污水厂尾水在排入地表受纳水体之前的处理场所。

目前研究表明,生态浮床可较好地净化受污染水体,然而研究结果却差别较大^[1~3],且处理对象也有所不同^[2~4],难以准确界定生态浮床对以污水厂尾水为代表的低污染水体的净化效能。为此,在河道原位修复大量开展的当今,笔者拟系统地评价生态浮床对低污染水体的净化效能,以期生态工程建设规模的确定提供数据支撑。同时,为提高河道水体的空间利用率,本研究采用复合型生态浮床处理低污染水体,即在生态浮床的水下部分悬挂生物填料,提高生态浮床的单位体积生物量,研究复合生态浮床在不同水力停留时间下对氮、磷的去除能力,并定量分析水生植物在处理系统中所起的作用。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

复合型生态浮床试验装置如图 1 所示。

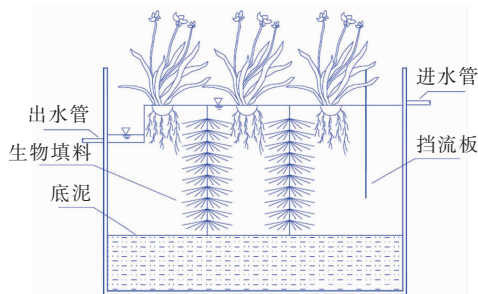


图 1 复合型生态浮床试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of integrated ecological floating-bed

试验装置由 PVC 板制成, $L \times B \times H = 0.8 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$ 。试验所用复合型生态浮床可以划分为 3 个区域:上部植物区、中部反应区及底部底泥区。其中植物区种植有多年生草本植物黄菖蒲 12 株(种植密度为 $50 \text{ 株}/\text{m}^2$);反应区内选择丝状弹性填料作为微生物载体,表观填充率为 45.8%;装置下部的底泥取自上海交通大学校内某河道的沉积物,底泥层厚度为 15 cm,上覆水层高度为 35 cm。

本研究设置试验组和对照组,试验组材料:菖蒲 + 弹性填料 + 底泥;对照组材料:弹性填料 + 底泥。

所用菖蒲、底泥在试验开始前已用原水驯养 30

d。在水力停留时间分别为 2 和 3 d 的条件下,考察系统对 N、P 的去除效果。

1.2 试验用水

试验用水模拟污水厂一级 A 尾水,主要配制成分为 NaNO_3 、 NH_4Cl 、 KH_2PO_4 、 NaCl 、 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 和蛋白胨。系统运行稳定后进水水质如下:TN 为 $(15.15 \pm 0.71) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为 $(10.35 \pm 0.61) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 为 $(0.09 \pm 0.03) \text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 为 $(3.95 \pm 0.29) \text{ mg/L}$ 、TP 为 $(0.40 \pm 0.07) \text{ mg/L}$ 、TOC 为 $(3.43 \pm 1.11) \text{ mg/L}$ 、DO 为 $(9.45 \pm 0.91) \text{ mg/L}$ 、pH 值为 7.45 ± 0.18 。

1.3 分析项目与方法

样品采集时间为采样日的 15:00,水温和 DO 采用 Hach HQ30d 溶解氧仪现场测定,pH 值采用 Hach HQ11d 数字化 pH 值测定仪现场测定。 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TN、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP 均采用标准方法测定。

2 结果与讨论

2.1 复合型生态浮床对氨氮的去除效果

试验期间反应器内水温在 $9 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,启动阶段(0 ~ 10 d)原水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 约为 12 mg/L 、氨氮约为 2 mg/L 。在启动阶段及初期,HRT 设定为 2 d,此时出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度尚不稳定,分析原因可能是装置中的底泥含有有机氮,这些有机氮在氨化的过程中会产生一定量的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$;从第 38 天开始,出水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度达到较为稳定的状态,在 HRT 为 2 d 条件下试验组出水浓度为 $(0.19 \pm 0.16) \text{ mg/L}$,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷为 $(664.29 \pm 100.71) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。对照组对氨氮的去除负荷与试验组相比没有显著差异($p > 0.05$),植物对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果的影响不明显。

当 HRT 为 3 d 时,试验组与对照组对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率达到较高且平稳的状态,分别为 $(98.69 \pm 0.81)\%$ 、 $(96.60 \pm 1.48)\%$,试验组对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷为 $(473.62 \pm 36.72) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,两组对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷没有显著性差异($p > 0.05$)。可以看出,延长水力停留时间会取得较高且稳定的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率,但也会导致系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除负荷降低。值得注意的是,在 HRT 分别为 2、3 d 时,试验组与对照组对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除效果均无显著差异,分析原因如下:对照组的 DO 浓度较高,而 DO 有利于微生物的生长繁殖,是氨氮硝化的必要

条件,可以强化硝化作用,从而弥补了对照组中没有植物的弱势。因此,在本试验进水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度条件下,试验组和对照组都表现出了良好的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除能力。尹振娟等^[5]采用生物法-人工湿地组合工艺处理混合污水的研究结果也表明 DO 浓度的升高显著地促进了 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除。

2.2 复合型生态浮床对总氮的去除效果

试验期间系统进出水 TN 浓度及对 TN 的去除效果如图 2 所示。

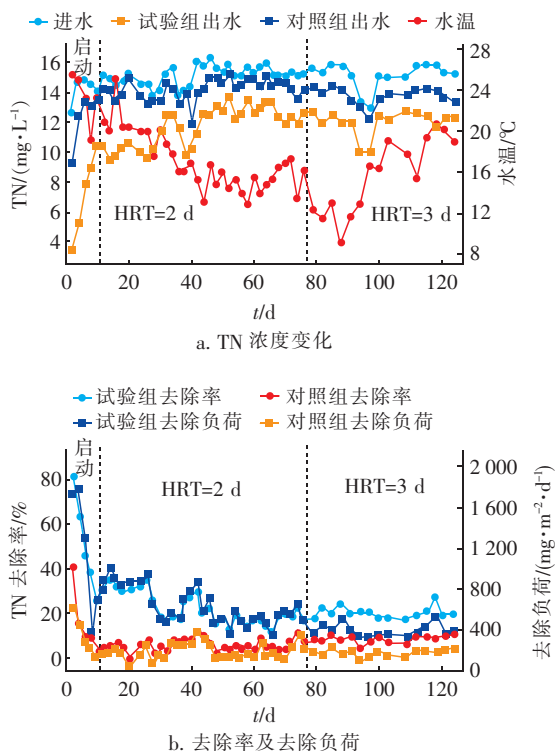


图2 系统对 TN 的去除效果

Fig. 2 TN removal efficiencies by integrated ecological floating-bed system

当 HRT 为 3 d 时,试验组出水 TN 浓度为 (11.80 ± 1.31) mg/L,略低于 HRT 为 2 d 时的出水 TN 浓度 $[(12.02 \pm 0.81)$ mg/L]。在启动阶段(0 ~ 10 d)及运行初期,出水 TN 浓度出现了急剧升高的趋势,分析有以下两个原因:试验初期,底泥中尚有部分可供利用的碳源,能促进系统中反硝化作用,而随着碳源的消耗,反硝化速率开始降低;其次,水温会影响 TN 的去除效果,当 HRT 为 2 d 时,复合型生态浮床中水温呈逐渐下降趋势,这也使得 TN 去除效果受到一定的影响。

在启动阶段(0 ~ 10 d),TN 去除率达到了较高

水平,试验组的最高去除负荷为 $1\,790.43$ mg/(m²·d),最高去除率为 81.33%。随着碳源的消耗,系统中反硝化效果持续减弱,TN 去除负荷及去除率迅速降低,而后达到较为稳定的状态。当 HRT 分别为 2、3 d 时,试验组的 TN 去除负荷分别为 (638.97 ± 178.97) 、 (395.61 ± 64.10) mg/(m²·d),均显著高于对照组,且 HRT 为 3 d 时 TN 单位面积去除负荷高于同等水力停留时间下 White 等^[2]使用生态浮床处理雨水径流的效果。此外,吴丹等^[6]比较了 8 套不同植物的表面流人工湿地处理污水厂尾水的效果,其中在种有黄菖蒲的系统中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率为 40% ~ 60%,TN 去除率为 17.9%,其认为黄菖蒲不适宜作为表面流人工湿地的湿生植物来净化尾水。而本试验采用黄菖蒲生态浮床与生物填料组合净化模拟污水厂尾水,不仅 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率得到大幅提升,同时也提高了 TN 去除率,达到了 35.44%。

系统中植物的存在为去除 TN 带来了一定效果。当 HRT 为 2 d 时,植物对去除 TN 的贡献率为 $(69.66 \pm 12.58)\%$;当 HRT 为 3 d 时,植物对去除 TN 的贡献率为 $(55.38 \pm 10.13)\%$ 。分析原因是:植物根系分泌的有机酸为系统提供了一定量的碳源,从而促进了反硝化效果,这也与两组系统中 pH 值的状况相吻合。

2.3 硝态氮和亚硝态氮的变化状况

试验期间,对照组出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度始终高于试验组,且在运行 10 d 时就出现了出水浓度高于进水浓度的情况,而试验组约在 50 d 后才出现这一趋势,即试验组的反硝化能力强于对照组(见图 3)。启动阶段,试验组和对照组的出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度均经历了急剧升高的过程,这可能是因为装置底泥中的碳源逐渐消耗,使得系统的反硝化能力随之下降。

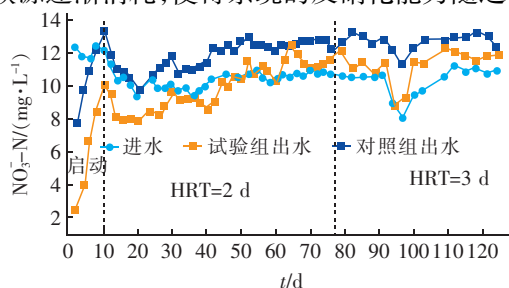


图3 系统进出水 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度的变化情况

Fig. 3 Variation of $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in integrated ecological floating-bed system

试验期间对照组的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累量为 $(0.73 \pm 0.57) \text{ mg/L}$, 显著高于试验组 $[(0.28 \pm 0.30) \text{ mg/L}]$ 。 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的浓度峰值表明植物抑制了 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累, 分析是由于菖蒲根系分泌的有机酸提供了部分碳源, 使得部分 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化成了气态氮 (N_2 或 N_2O)^[4], 而对照组中由于碳源不足导致 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 产生了较多积累 (见图4)。

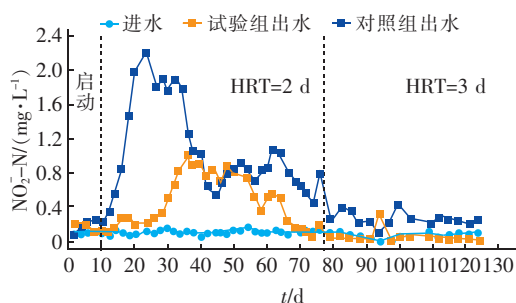


图4 系统中 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的积累情况

Fig. 4 Accumulation of $\text{NO}_2^- - \text{N}$ in integrated ecological floating-bed system

2.4 复合型生态浮床对TP 的去除效果

试验期间进出水 TP 浓度及对 TP 的去除效果如图5所示。相同水力停留时间下两组出水 TP 浓度虽有波动但均较稳定。当 HRT 分别为 2、3 d 时, 试验组出水 TP 浓度分别为 (0.08 ± 0.03) 、 $(0.03 \pm 0.02) \text{ mg/L}$, 对照组出水 TP 浓度分别为 (0.26 ± 0.07) 、 $(0.19 \pm 0.05) \text{ mg/L}$, 即延长 HRT 能得到更低的出水 TP 浓度。Li 等^[1]采用由水蕹菜、淡水蚌及生物填料组成的生态浮床处理富营养化水体, 其认为延长 HRT 能够提高 TP 去除率, 与本研究结论一致。

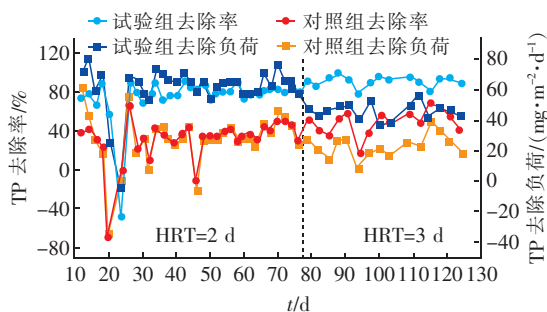


图5 系统对 TP 的去除效果

Fig. 5 TP removal efficiencies by integrated ecological floating-bed system

从试验初期至末期, 对照组和试验组的 TP 去除率均较为稳定。当 HRT 为 2 d 时, 试验组对 TP

的单位面积去除负荷为 $(61.71 \pm 15.12) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 显著高于对照组 ($p < 0.05$); HRT 为 3 d 时, 试验组对 TP 的单位面积去除负荷为 $(45.79 \pm 5.40) \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 也均显著高于对照组 ($p < 0.05$)。此外, HRT 为 2 d 及 3 d 时, 试验组对 TP 的去除率分别为 $(76.10 \pm 24.31)\%$ 、 $(91.80 \pm 5.52)\%$, 均优于卜发平等^[7]采用菖蒲生态浮床去除微污染水源水中 TP 的效果, 说明本研究采用的黄菖蒲浮床与生物填料的组合能使 TP 得到较大程度的去除。延长水力停留时间虽使得 TP 去除负荷略有下降, 但却提升了 TP 去除率。

对比试验组和对照组的出水 TP 浓度可知, 植物对去除 TP 具有重要意义。当 HRT 为 2 d 时, 植物对去除 TP 的贡献率为 $(61.57 \pm 10.13)\%$; 当 HRT 为 3 d 时, 植物对去除 TP 的贡献率为 $(49.80 \pm 16.63)\%$ 。分析原因如下: 首先, 部分颗粒性磷酸盐通过植物根系的截留作用得以去除; 其次, 部分有机磷化合物被植物根系的磷细菌分解矿化, 最终被植物吸收; 可溶性磷酸盐被植物根系吸收并同化为植物的有机成分^[8]。因此, 试验组对 TP 的去除效果优于对照组。

2.5 DO 和 pH 值的变化情况

试验组和对照组的 DO、pH 值具有一定的差异, 具体如图6所示。

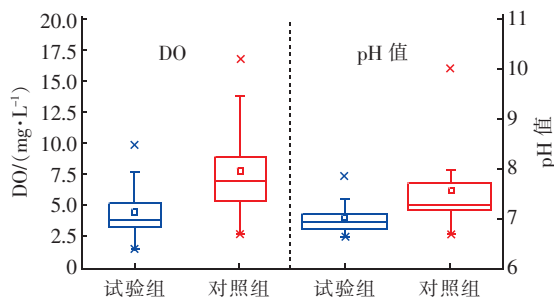


图6 系统中 DO 和 pH 值状况

Fig. 6 DO and pH variation during experiment

试验期间对照组的 DO 浓度显著高于试验组 ($p < 0.05$), 这可能是因为黄菖蒲的引入使得生物量增加, 从而增加了对 O_2 的需求量^[9]; 植物的光合作用虽能向表层水体提供一部分 O_2 , 但由于植物覆盖率较大, 阻隔了大气向水体的溶氧过程, 使得试验组呈现出 DO 含量较低的状态; 对照组装置中丝状藻增殖, 其光合作用产生的 O_2 使得 DO 浓度升高。

试验期间, 试验组 pH 值显著低于对照组 ($p <$

0.05), 为 7.03 ± 0.32 , 而对照组为 7.29 ± 0.28 。这可能是由于植物根系产生了酸性分泌物以及根系呼吸作用产生了 CO_2 [10,11], 并且有机物在微生物降解过程中释放的有机酸也会降低 pH 值 [12]。

3 结论

① 采用复合型生态浮床处理模拟污水厂尾水, 在进水 TN 为 (15.15 ± 0.71) mg/L、TP 为 (0.40 ± 0.07) mg/L、HRT 为 2 d 时, 栽种菖蒲的试验组对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的平均去除率分别为 $(86.89 \pm 13.18)\%$ 、 $(22.19 \pm 6.57)\%$ 、 $(76.10 \pm 24.31)\%$; 与 HRT 为 3 d 时相比, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率波动较大, TP 去除率略低, 但对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN、TP 的去除负荷明显高于 HRT 为 3 d 时的, 分别为 (664.29 ± 100.71) 、 (638.97 ± 178.97) 、 (61.71 ± 15.12) mg/($\text{m}^2 \cdot \text{d}$)。即在 HRT 为 2 d、菖蒲栽植密度为 50 株/ m^2 、填料表观填充率为 45.8% 时, 系统可较好地净化模拟污水厂尾水。

② 试验组对 TN、TP 的去除率及去除负荷均显著高于对照组 ($p < 0.05$), 即植物对 TN、TP 的去除有明显改善作用。当 HRT 为 2 d 时, 植物对 TN、TP 的去除贡献率分别为 $(69.66 \pm 12.58)\%$ 、 $(61.57 \pm 10.13)\%$, 当 HRT 为 3 d 时则分别为 $(55.38 \pm 10.13)\%$ 、 $(49.80 \pm 16.63)\%$ 。

参考文献:

- [1] Li X N, Song H L, Li W, *et al.* An integrated ecological floating-bed employing plant, freshwater clam and biofilm carrier for purification of eutrophic water[J]. *Ecol Eng*, 2010, 36(4): 382–390.
- [2] White S A, Cousins M M. Floating treatment wetland aided remediation of nitrogen and phosphorus from simulated stormwater runoff[J]. *Ecol Eng*, 2013, 61(8): 207–215.
- [3] Zhang Q, Achal V, Xu Y, *et al.* Aquaculture wastewater quality improvement by water spinach (*Ipomoea aquatica* Forskal) floating bed and ecological benefit assessment in ecological agriculture district[J]. *Aquacult Eng*, 2014, 60(3): 48–55.
- [4] Cao W, Wang Y, Sun L, *et al.* Removal of nitrogenous compounds from polluted river water by floating constructed wetlands using rice straw and ceramsite as substrates under low temperature conditions[J]. *Ecol Eng*,

2016, 88: 77–81.

- [5] 尹振娟, 杨扬, 卢建, 等. 生物法-人工湿地组合工艺对小城镇混合污水氮素去除效果研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(5): 1044–1049.
- [6] 吴丹, 缪爱军, 李丽, 等. 表面流人工湿地不同植物及其组合净化污水处理厂尾水研究[J]. *水资源保护*, 2015, 31(6): 115–121.
- [7] 卜发平, 罗固源, 许晓毅, 等. 美人蕉和菖蒲生态浮床净化微污染源水的比较[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(3): 14–17.
- [8] 卢少勇, 金相灿, 余刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. *生态环境*, 2006, 15(2): 391–396.
- [9] Ning D, Huang Y, Pan R, *et al.* Effect of eco-remediation using planted floating bed system on nutrients and heavy metals in urban river water and sediment: A field study in China[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 485/486(1): 596–603.
- [10] Bezbaruah A N, Zhang T C. pH, Redox, and oxygen microprofiles in rhizosphere of bulrush (*Scirpus validus*) in a constructed wetland treating municipal wastewater[J]. *Biotechnol Bioeng*, 2004, 88(1): 60–70.
- [11] Iamchaturapatr J, Su W Y, Rhee J S. Nutrient removals by 21 aquatic plants for vertical free surface-flow (VFS) constructed wetland[J]. *Ecol Eng*, 2007, 29(3): 287–293.
- [12] Ijaz A, Shabir G, Khan Q M, *et al.* Enhanced remediation of sewage effluent by endophyte-assisted floating treatment wetlands[J]. *Ecol Eng*, 2015, 84(2): 58–66.



作者简介:戴谨微(1991–), 女, 云南玉溪人, 硕士研究生, 研究方向为水污染控制。

E-mail: daijinwei@sjtu.edu.cn

收稿日期: 2017–07–12