

文章编号:1000-5641(2011)01-0119-07

梯级生态浮床系统处理黑臭河水 除磷性能研究

徐欢¹, 张勇², 黄民生¹, 罗锦洪¹, 何岩¹

(1. 华东师范大学 资源与环境科学学院, 上海 200062; 2. 安徽建筑工业学院, 合肥 230022)

摘要: 以上海市某黑臭河道为处理对象, 通过模拟天然水体中水生植物的分布, 构建逐级下沉式梯级浮床系统(Staged Floating Treatment Wetlands, SFTWs), 分析温度、植物种类、pH值和溶解氧(DO)等因素对浮床系统的除磷性能的影响。结果表明, 浮床系统的除磷率受温度变化较为明显, 一定温度范围内两者呈正相关, 在最低温度15.2℃时, 总磷(TP)和溶磷($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)去除率分别达到最小值59%和62%。不同植物单元中, 磷去除主要发生在挺水植物香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)单元, TP去除率平均值高达62.3%, 对磷去除作用显著; pH值越大越有利于除磷, DO浓度也对系统除磷效果有影响。

关键词: 梯级生态浮床; 黑臭河水; 除磷; 城市河道治理; 生态修复

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2011.01.013

Study on the effect of SFTWs for phosphorus removal from malodorous water

XU Huan¹, ZHANG Yong², HUANG Min-sheng¹, LUO Jin-hong¹, HE Yan¹

(1. School of Resources and Environment Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;
2. Anhui Institute of Architecture & Industry, Hefei 230022, China)

Abstract: The staged floating treatment wetlands (SFTWs) were constructed to treat malodorous water of an industrial river in Shanghai by simulating the ecological distribution of aquatic plants in the natural water, focusing on the effect of the season and temperature, plant species, pH, dissolved oxygen (DO) and other factors on the phosphorus removal rate. The results showed that the temperature changes did an obvious effect on the phosphorus removal efficiency of floating bed system where a positive correlation was in a certain temperature range. Total phosphorus (TP) and dissolved phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$) removal rates reached 59% and 62% minimum respectively when the lowest temperature was 15.2℃. Among different species of water plants, emergent plant such as *Hydrocotyle vulgaris* unit removed the most phosphorus with a removal rate of 62.3%. The phosphorus removal efficiency increased when pH value rise. The

收稿日期:2010-08

基金项目:国家科技重大专项(2009ZX07317-006, 2009ZX07317-009)

第一作者:徐欢,女,硕士研究生,研究方向为废水生物处理工艺技术. E-mail:huange3560@163.com.

通讯作者:黄民生,男,教授,博士生导师. E-mail:mshuang@des.ecnu.edu.cn.

DO also had an effect on phosphorus removal.

Key words: staged floating treatment wetlands; malodorous water; phosphorus removal; harnessing of urban river; ecological restoration

0 引言

近年来,随着我国人口的增长和经济迅速发展,排入江河、湖泊的废水和未经处理的生活污水不断增加;而水处理设施建设严重滞后,导致地表水体环境的严重污染,富营养化水域日益增多,河水变黑发臭现象普遍存在^[1].利用生态技术来治理污染河道,是改善黑臭水体水质有效方法之一^[2].生态浮床技术是按照自然规律,运用无土栽培技术,以高分子材料为载体和基质,采用现代农艺和生态工程措施综合集成的水面无土种植植物技术.生态浮床技术作为一种兼顾水环境治理与生态修复的实用技术^[3],由于其稳定有效、安全持久、耗能少和管理方便等优点,正日益受到关注.目前,我国有多起生态浮床应用工程实例^[4,5],并且应用效果显著.然而,就梯级生态浮床系统对黑臭河水的除磷性能研究还鲜见报道.

本研究在传统浮床技术的基础上,通过选择不同生态位植物种类,采用逐级下沉的运行方式构建梯级生态浮床系统,实现了从不同垂直层面上同步完成对污染物的净化,同时重点研究和分析了梯级生态浮床系统除磷影响因素,为城市河道的治理和生态修复的设计提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 试验装置的设计与运行

本实验用水直接取自上海市普陀区某黑臭河道,周边有密集的工厂和居民区,纳污量大,主要依靠不定期的调水来改善水质.其水质状况如下,pH 值 6.4~7.9,DO 浓度 0.17~0.89 mg/L,COD_{Cr} 浓度 72~110.4 mg/L,NH₄⁺-N 浓度 7.48~23.77 mg/L,TN 浓度 11.72~24.67 mg/L,PO₄³⁻-P 浓度 0.22~0.93 mg/L,TP 浓度 0.84~1.95 mg/L.

试验系统构建在黑臭河道旁,包括 1 个高位水箱和 2 个相同大小的水槽.高位水箱上部尺寸 1 500 mm(L)×1 000 mm(W),下部尺寸 1 450 mm(L)×950 mm(W)×600 mm(H),边宽 40 mm,提供进水,设有溢流管.水槽 1 810 mm(L)×1 100 mm(W)×1 300 mm(H),边宽 20 mm,其内模拟水生植物在天然水体中的生态位分布,设计了 1 套逐级下沉式梯级浮床系统,装置平面图如图 1 所示,从进水端依次分为挺水植物香菇草(*Hydrocotyle vulgaris*)单元、浮叶植物睡莲(*Nymphaea tetragona*)单元和沉水植物轮叶狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*)单元,组建梯级生态浮床系统.另在相同大小的水槽中,设 1 组不栽种的空白浮床作为对照(CK).

试验系统建成后,植物恢复和系统稳定 2 个月后,开始进行 4 个月的连续进水.试验时间为 2009 年 5~11 月,持续 6 个月,水力停留时间为 8 h.为了使植物与自然生长保持一致,根据睡莲和轮叶狐尾藻的株高每月调整 1 次浮床高度.

1.2 研究项目及分析方法

主要研究影响因素有季节、植物种类、pH 值和 DO 等.水质理化指标分析参照国家环境标准分析方法^[6],温度、pH 值和 DO 测定采用 Hydrolab 多参数水质分析仪,TP 采用过

硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 采用钼锑抗分光光度法.

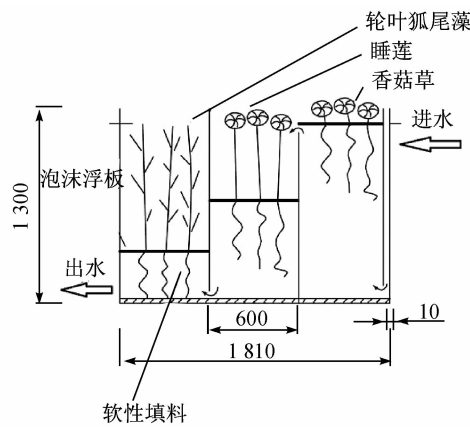


图 1 梯级生态浮床装置示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of Staged Floating Treatment Wetlands (Unit: mm)

每月采集水样 2 次,每次 5 个位点,所有水样按水流方向分别编号.以平衡水箱出水作为系统进水水样,出水水样采自右边单元出水口,挺水植物单元、浮叶植物单元与沉水植物单元每个取样 1 个.取样时,从每个单元表层和下层各取 1 L,混合,然后移入取样瓶.

2 结果与讨论

2.1 温度对梯级生态浮床处理黑臭河水的影响

温度是影响生态浮床运行效能的重要因素^[7-12].如图 2 所示,系统在运行第 35 天温度高至 31.4℃,第 171 天达到最小值 15.2℃,同时对应的 TP 去除率分别为 83.5%和 59%, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率为 95%和 62%,表明低温条件下该生态浮床系统对河水的 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除效果明显下降,浮床生物量及其活性降低是主要影响原因^[13].在 15~32℃,温度越高植物生长越快,植物对磷的累积量越大,从而对磷的去除量越大.同时,微生物的活性也会随温度的逐渐上升而加强,即微生物除磷作用逐渐加强.但是,在运行第 69 天,温度为 34.4℃时,TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率随温度的增加而下降,分别仅为 65.3%和 68.5%.由于植物根系的泌氧作用会在植物根系区形成好氧-缺氧-厌氧的微环境^[14,15],进行生物除磷作用;然而当水温过高时,植物的呼吸作用加强,净释氧可忽略^[16],会降低植物的输氧能力,从而导致植物根系区的微环境被破坏,对植物生物除磷作用产生抑制作用,导致通过植物吸收除磷量减少.另外,水温过高也不利于河水中颗粒态磷的沉淀去除.

2.2 植物种类对梯级生态浮床处理黑臭河水的影响

植物吸收是系统对主要污染物去除的重要途径,植物的存在对于人工湿地系统净化功能的实现有极大作用^[17].比较挺水植物单元(香菇草)、浮叶植物单元(睡莲)与沉水植物单元(轮叶狐尾藻)分别对 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率的贡献,结果得到 3 个单元的去除率大致相同,平均值为 48.5%.但是,按照除磷负荷计算,则 3 个单元从高到低的顺序为挺水植物单元(香菇草)、浮叶植物单元(睡莲)与沉水植物单元(轮叶狐尾藻),除磷负荷分别为 7.92 g(TP)/(m³·d),2.40 g(TP)/(m³·d)和 0.96 g(TP)/(m³·d).浮床系统的 TP 去除率明显高于空白湿地(TP 去除率平均值为 20.3%),说明植物在生态浮床的除磷中具有重要作用.磷作

为必需的养分,植物通过吸收与同化作用将其转化为植物 ATP,DNA 及 RNA 等有机成分,再通过对植物的收割,从而实现对磷的去除.植物吸收的磷,在其衰老死亡时能将植物磷的 35%~75%快速释出,因此应及时收割植物^[18].浮床上种植的 3 种植物 TP 去除率随时间变化如图 3 所示.比较不同净化单元的贡献可知,各单元对 TP 去除率平均值分别为 62.3%,51.7%和 44.9%.由此可见,根系发达植物对于磷的去除效果均非常显著,且系统对于磷去除主要发生在挺水植物单元,这与植物根系发达程度和生长对磷的需求量有关.另外,发达的植物根系通过接触沉淀及过滤,能够有效促进河水中颗粒态磷的去除.

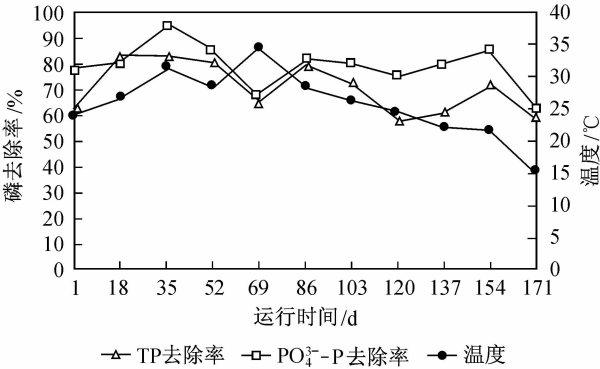


图 2 磷去除率和温度变化

Fig. 2 The changes of phosphorus removal efficiency with temperature

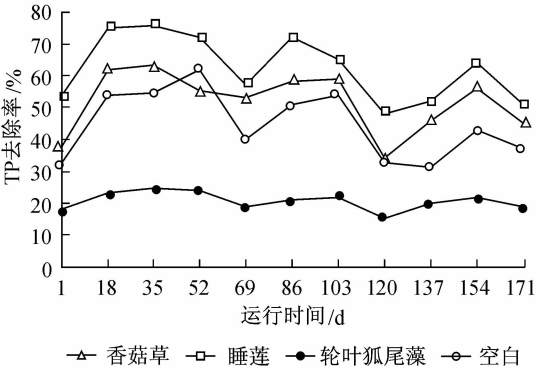


图 3 各种植物净化单元 TP 去除率

Fig. 3 The changes of total phosphorus removal efficiency of different wetland plants with running time

2.3 pH 值对梯级生态浮床处理黑臭河水的影响

pH 值是影响除磷效果的另一因素.生态浮床系统中磷的去除主要依靠介质的物理化学作用和栽种植物的吸收实现,这一过程主要是由吸附位点的数量和 pH 值决定的^[19].为了探讨 pH 值对除磷效果的影响,对试验稳定运行期间系统 TP 去除率和 pH 值变化范围进行了研究.结果表明,香菇草净化单元 pH 值变化范围较小(7.2~8.4),除磷效果好,最高可达 75.5%,TP 去除率高于其他植物净化单元,说明介质对磷的物理化学作用是除磷的主要因素,植物对磷的吸收有限.同时发现睡莲净化单元的 pH 值范围(7.1~8.5)大于轮叶狐尾藻沉水植物单元(6.7~7.8),而且睡莲 TP 去除率(平均值为 51.7%)大于轮叶狐尾藻(平均

值为 44.7%),说明水质的酸碱度变化对磷的去除有较大影响,介质碱性越强,越有利于脱磷.当水力停留时间过长时,容易导致系统 pH 值的降低.当 pH 值减少到一定程度,就不利于磷的吸附沉淀发生,甚至使已吸附或沉淀的磷发生解析或溶解,导致水中磷的浓度逐渐升高.

2.4 DO 浓度对梯级生态浮床处理黑臭河水的影响

图 4 显示的是梯级生态浮床系统稳定运行期间 DO 浓度与 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率的变化范围.由图可知,虽然进水 DO 浓度为 0.17~0.89 mg/L,平均值 0.43 mg/L,但出水浓度提升至 0.38~3.38 mg/L,平均值 1.51 mg/L.系统中 DO 的来源主要有 3 个途径:大气复氧、浮游生物光合作用释氧和植物光合作用泌氧.出水 DO 浓度平均提高了 251%,说明有植物的系统形成了较好的供氧机制,有利于促进污染物的氧化降解.这可能是由于植物能够通过光合作用产氧并直接释放到水体中,从而向水体供氧.这与之前其他研究结果^[20]是一致的.浮床系统出水 DO 浓度与 TP 去除率均高于空白湿地(DO 浓度平均值 0.10 mg/L),说明 DO 浓度与磷去除率有一定的关系.卢晓明^[21]等研究表明,睡莲植物净化槽的 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度在春、夏季曝气时明显升高,秋季曝气时浓度高于非曝气时浓度.然而雒维国^[19]等对潜流型人工湿地除磷效果研究表明,DO 水平越高,越有利于系统中有有机磷的降解和微生物对磷的吸收利用.本实验条件下,DO 出水浓度高达 3.46 mg/L 时,除磷效果一般.DO 平均浓度为 0.72 mg/L 时,系统的除磷效果最好.这可能是因为 DO 较低时虽然系统中微生物释磷效果较好,但吸磷过程受到抑制;DO 较高时释磷过程又受到抑制.只有 DO 在一个最佳范围内时,既有利于植物对水中磷的吸附吸收,又有利于微生物的生长繁殖,促进对水中磷的降解、转化,才能实现微生物和植物对磷的去除共同达到最有利状态.因此,对于 DO 对梯级生态浮床的除磷效果问题进行更深入的研究具有重要意义.

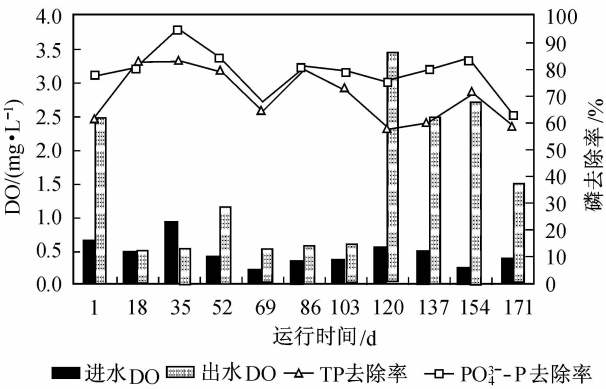


图 4 DO 与磷去除率变化

Fig. 4 The changes of DO and phosphorus removal efficiency with running time

沿水流方向比较 3 个净化单元的 DO 浓度,挺水植物单元为 0.48~3.08 mg/L,平均 1.51 mg/L;浮叶植物单元为 0.34~1.43 mg/L,平均 0.98 mg/L;沉水植物单元为 0.33~5.29 mg/L,平均 2.08 mg/L.这说明不同植物均具有一定供氧能力,这与植物的生长状况和泌氧能力有关.同时,随着还原性污染物沿水流方向的逐步降解,其对后续单元的需氧量也会同步降低.

另外,由于处理对象为黑臭河水,其中含有 Fe^{2+} 含量较高,在好氧环境中系统中运行时, Fe^{2+} 与 Fe^{3+} 实现转化, Fe^{3+} 含量增加,易与 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 结合形成沉淀。 Fe^{2+} 的氧化能促进磷的沉淀,提高系统的除磷效果。 DO 浓度的增加能够促进这一反应的发生,从而促进各类磷的吸收去除。 Fe^{3+} 对磷的沉淀作用是系统除磷的重要途径。

3 结 论

(1) 梯级生态浮床系统 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率平均值分别达到 70.5% 和 79%。系统对磷去除效果明显,并且主要受温度变化、植物种类、 pH 值和 DO 影响。

(2) 浮床系统除磷效果受季节和气温影响较大,夏季温度高时有利于磷去除,低温时磷去除率降低,在最低温 15.2 $^{\circ}\text{C}$ 时, TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率达到最小值,分别为 59% 和 62.3%。当温度上升超过最适温度时,也降低植物输氧能力,会对除磷产生抑制作用。可以通过对温度的控制,来实现达到磷最大去除率。

(3) 梯级生态浮床系统中不同植物单元的除磷率不同,但均有明显去除效果。考虑栽种的经济效益,可适当筛选根系发达且克隆繁殖能力强植物,如香菇草等。

(4) pH 值和 DO 浓度对水质中磷的去除也有影响作用。由于影响 pH 值变化的因素较多, pH 值越大,磷通过物理化学作用去除率越高;系统出水 DO 浓度较进水浓度增加,并且与磷去除率有一定关系,下一步将进行相关方面的研究,以期实现通过调节水质状况和水力条件,提高 TP 和 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 去除率。

[参 考 文 献]

- [1] 唐静杰,周青.生态浮床在富营养化水体修复中的应用[J].环境与可持续发展,2009,34(2):24-27.
TANG J J, ZHOU Q. Application of ecological floating bed in remediation of eutrophic water[J]. Environment and Sustainable Development, 2009, 34(2): 24-27.
- [2] 董哲仁,刘倩,曾向辉.受污染水体的生物—生态修复技术[J].水利水电技术,2002(2):1-4.
DONG Z R, LIU Q, ZENG X H. Biological-ecological remediation technology on the polluted surface water[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2002(2): 1-4.
- [3] 陈荷生,宋祥甫,邹国燕.利用生态浮床技术治理污染水体[J].水文水资源,2005(5):50-53.
CHEN H S, SONG X F, ZOU G Y. Ecological floating bed technology on polluted waterbody remediation[J]. China Water Resources, 2005(5): 50-53.
- [4] 刘福兴,付子斌,宋祥甫,等.生态浮床及辅助技术治理汇丰河黑臭水体[J].四川环境,2009,28(5):36-40.
LIU F X, FU Z S, SONG X F, et al. Treating the smelly water of Huifeng River with ecological floating bed and assistive technology[J]. Sichuan Environment, 2009, 28(5): 36-40.
- [5] 李梅,孙远奎,张见魁.生态浮床技术应用研究[J].工业安全与环保,2010,36(1):35-36.
LI M, SUN Y K, ZHANG J K. The application research of ecological floating bed technology[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(1): 35-36.
- [6] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法[M].4版.北京:中国环境科学出版社,2002.
Administration of Environmental Protection of China. Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [7] 彭永臻,张自杰.活性污泥法处理系统中温度对动力学常数的影响[J].环境科学学报,1990,10(2):226-232.
PENG Y Z, ZHANG Z J. Effect of temperature on kinetic constant in activated sludge operations[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1990, 10(2): 226-232.
- [8] 马娟,彭永臻,王丽,等.温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J].中国环境科学,2008,28(11):

1004-1008.

MA J, PENG Y Z, WANG L, et al. Effect of temperature on denitrification and profiles of pH during the process [J]. *China Environmental Science*, 2008, 280(11): 1004-1008.

- [9] OBAJA O, MACEE S, COSTA J, et al. Nitrification, denitrification and biological phosphorus removal in piggery wastewater using a sequencing batch reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2003, 87: 103-111.

- [10] PANSWAD T, DOUNGCHAI A, ANOTAI J, et al. Temperature effect on microbial community of enhanced biological phosphorus removal system[J]. *Water Research*, 2003, 37: 409-415.

- [11] FENG H, HU F, MAHMOOD Q, et al. Effects of temperature and feed strength on a cattier anaerobic baffled reactor treating dilute wastewater[J]. *Desalination*, 2009, 239: 111-121.

- [12] DUGAN N R, WILLIAMS D J, MEYER M, et al. The impact of temperature on the performance of anaerobic biological treatment of per chlorate in drinking water[J]. *Water Research*, 2009, 43: 1867-1878.

- [13] 罗固源, 卜发平, 许晓毅, 等. 温度对生态浮床系统的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(4): 499-503.
LUO G Y, BU F P, XU X Y, et al. Effect of temperature on the ecological floating bed system[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(4): 499-503.

- [14] 钟云霄, 胡洪营, 钱易. 大型水生植物在水污染治理中的应用研究进展[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2003, 4(2): 36-40.

ZHONG Y X, HU H Y, QIAN Y. Advances in utilization of macrophytes in water pollution control[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2003, 4(2): 36-40.

- [15] 杨海清, 李秀艳, 赵丹, 等. 植物-水生动物-填料生态反应器构建和作用机理[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(6): 852-857.

YANG H Q, LI X Y, ZHAO D, et al. Construction of plant-aquatic animal- combined packing eco-reactor and its mechanism of treating scenic water[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(6): 852-857.

- [16] SODA S, IKE M, OGASAWARA Y, et al. Effects of light intensity and water temperature on oxygen release from roots into water lettuce rhizosphere[J]. *Water Research*, 2007, 41: 487-491.

- [17] 邱沪生, 欧阳郑凯. 人工湿地对污水的除磷效果研究[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(3): 124-169.
QIU H S, OUYANG Z K. Study on the effect of constructed wetlands for wastewater on phosphorus removal[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2010, 16(3): 124-169.

- [18] 张荣社, 周琪, 史云鹏, 等. 潜流构造湿地去除农田排水中磷的效果[J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 105-108.
ZHANG R S, ZHOU Q, SHI Y P, et al. Phosphorus removal of agriculture wastewater through subsurface constructed wetland[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 105-108.

- [19] 雒维国, 王世和, 钱卫一, 等. 潜流型人工湿地除磷效果研究[J]. *安全与环境工程*, 2004, 11(4): 21-25.
LUO W G, WANG S H, QIAN W Y, et al. Research on nitrogen and phosphorus removal in subsurface constructed wetlands[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2004, 11(4): 21-25.

- [20] 王庆安, 黄时达, 孙铁珩. 湿地植物光合作用向水体供氧能力的试验研究[J]. *生态学杂志*, 2000, 19(5): 45-51.
WANG Q A, HUANG S D, SUN T H. Examination on ability of wetland plants' photosynthesis supplying water body with oxygen[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(5): 45-51.

- [21] 卢晓明, 张勇, 陈建军. 连续曝气下河水水质及睡莲生理响应的季节变化[J]. *环境工程学报*, 2010, 4(9): 1978-1984.

LU X M, ZHANG Y, CHEN J J. Seasonal variation of river water qualities and physiological responses of *Nymphaea tetragona* L. under continuous aeration[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(9): 1978-1984.