

自动增氧型垂直流人工湿地处理农村生活污水试验研究

李 松¹, 王为东², 强志民², 梁新强³, 王飞儿³, 陈英旭³

(1.浙江农林大学环境科技学院, 杭州 311300; 2.中国科学院生态环境研究中心, 环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3.浙江大学水环境研究院, 杭州 310029)

摘 要:针对人工湿地中溶解氧浓度不足的问题,采用自动增氧型垂直流人工湿地处理系统进行了农村生活污水脱氮除磷对比试验研究。结果表明,自动增氧型湿地内的 DO 浓度比非增氧型人工湿地高 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右, TN、 NH_4^+-N 去除率分别达到了 67.41%、69.04%, 比非增氧型湿地高 14.57%、19.79%, 但 TP 去除率与非增氧型湿地差异不显著。说明自动增氧措施对于增加人工湿地中的 DO 浓度, 提高脱氮效率是有效的, 但对于除磷效率无显著影响。

关键词:自动增氧; 人工湿地; 农村生活污水; 氮; 磷

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)08-1566-05

Self-aeration Vertical Flow Constructed Wetland for the Treatment of Rural Domestic Wastewater

LI Song¹, WANG Wei-dong², QIANG Zhi-min², LIANG Xin-qiang³, WANG Fei-er³, CHEN Ying-xu³

(1. School of Environmental Technology, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Department of Environmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

Abstract: According to the problem of low dissolved oxygen (DO) content and nitrogen removal rate in the constructed wetland system, a self-aeration vertical flow constructed wetland was designed to treat the rural domestic wastewater by comparing with the non-aeration vertical flow constructed wetland. The results showed DO content of the self-aeration vertical flow constructed wetland was about $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ higher than that of the non-aeration constructed wetland. Its removal rates of TN and NH_4^+-N were 67.41%, 69.04%, respectively, and 14.57%, 19.79% higher than those of the non-aeration constructed wetland, respectively, suggesting that it was a effective method to improve the nitrogen-removal rate of the constructed wetland by the self-aeration measures. No difference was found for the phosphorus-removal rate between the two vertical flow constructed wetlands, which suggested that the self-aeration showed no significant influence on phosphorus-removal rate.

Keywords: self-aeration; constructed wetland; rural domestic wastewater; nitrogen; phosphorus

随着乡镇经济的迅速发展,城镇化进程的不断推进,广大农民生活水平的迅速提高及生活条件的明显改善,农村生活污水的排放量不断增加,预计到 2012 年,中国农村污水排放量将达 270 亿 $\text{t}^{[1]}$ 。人工湿地系

统由于投资省、运行费用低、管理维护简单,在农村生活污水处理中得到了广泛应用^[2-4],是一种很有发展前途的处理工艺,但由于布水不均、填料级配不合理、植物传输氧气有限等原因,导致人工湿地堵塞、供氧不足形成了严重的还原环境,限制了微生物的硝化作用,一直存在着脱氮效率低的问题^[5-7]。因此,要提高湿地的脱氮效果,关键在于改善湿地的供氧环境,增加溶解氧含量,从而提高硝化作用效果。

Claudiane 等^[8]采用空气泵对人工湿地进行强制增氧,结果表明,污水 TKN 去除率提高了 9.4%,但是

收稿日期:2010-03-18

基金项目:浙江省教育厅资助项目(200803727);水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-006-02-05,2008ZX07101-006-08-A);校人才启动项目(2010FR035)

作者简介:李 松(1977—),男,湖北荆门人,博士,讲师,主要从事污水处理方向的研究。E-mail:lisong@zjfc.edu.cn

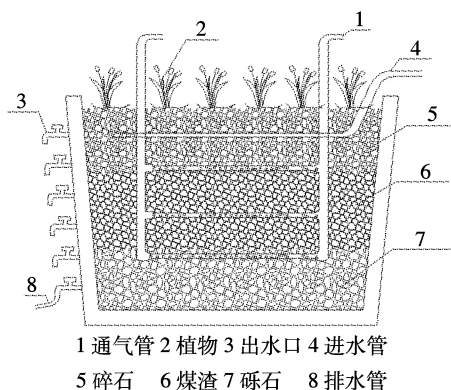
通讯作者:强志民 E-mail:qiangz@rcees.ac.cn

污水处理费用大大增加。叶芬霞等^[4]构建了新型人工湿地——塔式复合人工湿地(TICW)处理农村生活污水,利用阶梯式跌水进行充氧,克服了目前人工湿地含氧量少、硝化速率慢的瓶颈,对 NH_4^+-N 的去除率达到了 82%。孙亚兵等^[9]利用改进的自动增氧型潜流人工湿地对农村生活污水进行处理, NH_4^+-N 的平均去除率为 88.93%,但系统后期出水均不稳定。本试验就是在前人的研究基础上,通过布置通气管道,利用大气压力对人工湿地进行自动增氧,同时,在不同高度设置出水口,便于采样分析,构建自动增氧型垂直流人工湿地系统用来处理农村生活污水,考察溶解氧的变化情况及其与脱氮除磷效率之间的响应关系,为农村生活污水的高效去污脱氮除磷提供适用的方法。

1 材料与方法

1.1 人工湿地构建

为便于比较普通人工湿地与自动增氧型人工湿地的净水能力,构建了自动增氧型湿地处理系统进行模拟试验,如图 1 所示。人工湿地尺寸为 $90\text{ cm}\times 62\text{ cm}\times 65\text{ cm}(L\times W\times H)$,容器上部填充 16 cm 厚粒径为 5~8 mm 的碎石,在其中铺设“S”型的进水管,在管壁设置直径为 5 mm 的出水孔,并种植密度为 $25\text{ 株}\cdot\text{m}^{-2}$ 的美人蕉(*Canna. L*);美人蕉种植入湿地之前,先用自来水洗去根部所带泥土,然后用去离子水再次洗净,冲洗过程中尽量避免损坏植物的根系。中部填充 16 cm 厚粒径为 5~15 mm 的煤渣,下部 20 cm 填充粒径为 10~20 mm 的砾石。湿地一侧壁上每隔 8 cm 设置直径为 20 mm 的取水孔 6 个,用于采集湿地内不同深度的处理出水,其中最下面一个出水孔距容器底 6 cm,作为湿地排空口。



最后,在煤渣层和砾石层中各布设一层通气管网,导气管为 PVC 材料制成,主管管径 50 mm,支管管径 20 mm,管壁设置直径为 5 mm 的透气孔,湿地中的主管通过大气压力向湿地内部通气供氧,导气管是封闭的循环系统,使空气循环,增加空气与农村生活污水的接触面积与时间,增强供氧作用。而非增氧型湿地系统不铺设任何通气管道。

1.2 进水水质特征

试验用水体为太湖地区典型的农村生活污水,富含有机营养物质。其水质如表 1 所示。

表 1 试验农村生活污水水质
Table 1 Water quality of rural domestic wastewater

温度/ $^{\circ}\text{C}$	pH	$\text{COD}_\text{Cr}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{TN}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{TP}/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$
3~20	8.21	282.2	38.02	24.53	1.08

1.3 试验方法

试验时间为 2009 年 2 月 1 日至 2010 年 2 月 15 日。通过调节进出水口的阀门,系统采用连续进水、间歇排水的运行方式,进水量约 $50\text{ L}\cdot\text{d}^{-1}$,每日排水 3 次,水力停留时间(HRT)约 72 h。系统稳定运行 1 个月于 3 月 1 日开始每隔 15 d 对 6 个出水口(从上至下编号依次为 1~6)取样 1 次,并及时对出水各项指标进行检测。主要检测项目为 pH、DO、 COD_Cr 、 NH_4^+-N 、TP,其中 pH 采用玻璃电极法,DO 采用 YSI52 型溶解氧测定仪测定, COD_Cr 采用快速密封催化消解-分光光度法, NH_4^+-N 采用纳氏试剂法,TP 采用钼锑抗分光光度法,具体参照国家标准方法^[10]进行测定。

1.4 数据统计与分析

数据分析采用 Microsoft Office 2003,采用 DPS 6.55 的 Duncan 新复极差法进行 95%和 99%的显著性差

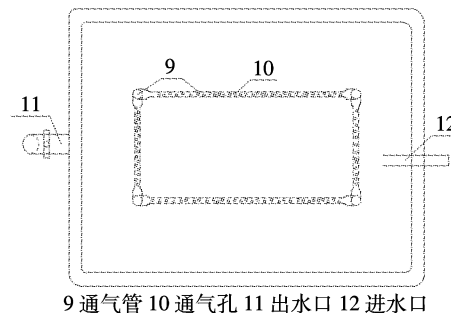


图 1 自动增氧型垂直流人工湿地处理系统示意图

Figure 1 Schematic diagram of self-aeration vertical flow constructed wetland

异分析。所有数据均为 3 次重复的平均值。

2 结果与分析

2.1 溶解氧的变化

人工湿地中的溶解氧(DO)浓度与农村生活污水的硝化效率有着重要的关系,本次试验溶解氧含量采用整个试验阶段的平均值。如图 2 所示,两种湿地进水 DO 平均值约为 $1.03 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,进入湿地后都呈下降趋势,且在出水口 1 处 DO 下降比较明显,这主要是因为 COD 去除和硝化反应耗氧导致的。由于在自动增氧型湿地中铺设了二层 PVC 穿孔管,并采用连续进水、间歇出水的运行方式,湿地上部填充粒径 5~8 mm 的碎石,增加了透气性,增氧效果明显,DO 浓度保持在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上,略高于相关文献报道的结果^[11-12]。这可能是由于人工湿地填料粒径相对较大,级配良好,未出现导气孔堵塞的现象,使得人工湿地通气性能较好;同时,试验期间平均温度相对较低,也有助于氧的溶解。自动增氧型湿地内各个出水口处的

DO 浓度比非增氧型人工湿地高 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。自动增氧型人工湿地出水口 6 处 DO 有所升高,这表明 COD 降解和 NH_4^+-N 的转化基本完成,植物根系泌氧及大气输氧产生的氧量大于系统的耗氧^[13],说明此系统较强的充氧能力,同时也保证了出水有较高的 DO (平均为 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。而非增氧型人工湿地 DO 浓度则一直下降,说明系统处于缺氧状态。

2.2 化学需氧量的变化

COD 是表征农村生活污水有机污染程度的指标。由图 3 可见,在相同的进水浓度下,自动增氧型及非增氧型人工湿地出水 COD 浓度均随着时间逐渐减小,最终出水分别稳定在 20.10 、 $12.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,相应去除率分别为 92.94% 、 95.63% ,这说明两种类型的湿地对 COD 均有较好的去除效果。同时,自动增氧型湿地 COD 去除率显著高于非增氧型湿地 COD 去除率($P < 0.05$),这主要是由于自动增氧提高了污水中的 DO 含量,有助于有机污染物的氧化作用^[14]。

2.3 氨氮的变化

农村生活污水中的氮主要以 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 等形态存在。自动增氧型湿地出水 NH_4^+-N 浓度随着气温的升高而降低,去除率增大,而非增氧型湿地正好相反(图 4a),这说明在采用增氧措施以及夏季植物生长旺盛,湿地内形成了良好的好氧硝化环境,最大去除率达到了 69.04% ;而非增氧型湿地由于供氧不足,只有在冬季气温低时,DO 含量升高,最大去除率为 49.25% 。图 4b 是人工湿地内垂直方向上 NH_4^+-N 的转化情况,可以看出, NH_4^+-N 在湿地的中上部去除效果比较高,下部去除能力明显下降,最终出水水质比较稳定。同时,自动增氧型湿地各个位置的 NH_4^+-N 浓度都比非增氧型湿地显著性低($P < 0.05$),说明自动增氧对于提高氨氮的去除效率是有效的。

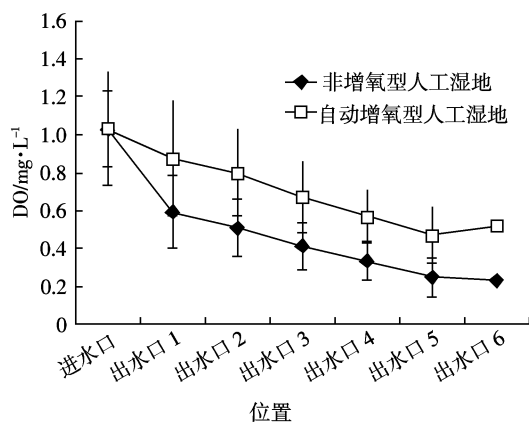


图 2 人工湿地内 DO 变化情况

Figure 2 The changes of DO in the constructed wetland

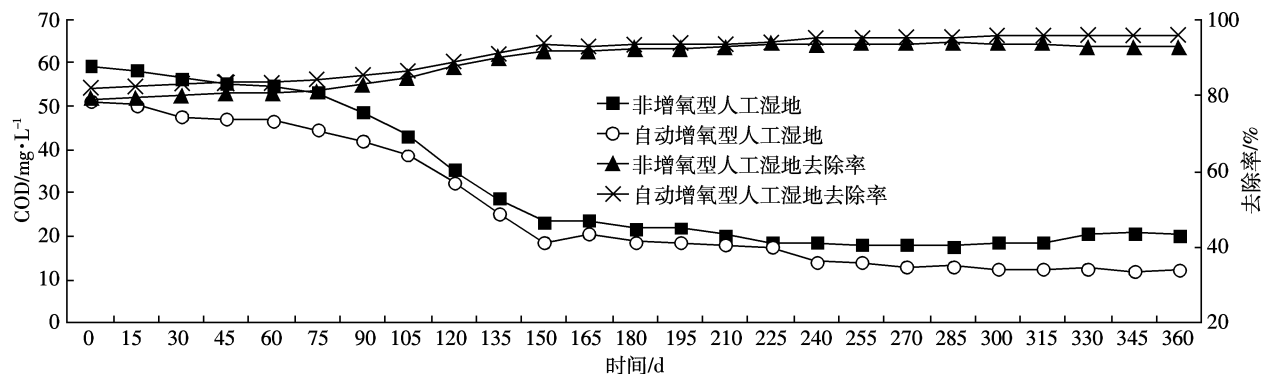


图 3 COD 随时间变化图

Figure 3 The changes of COD with time

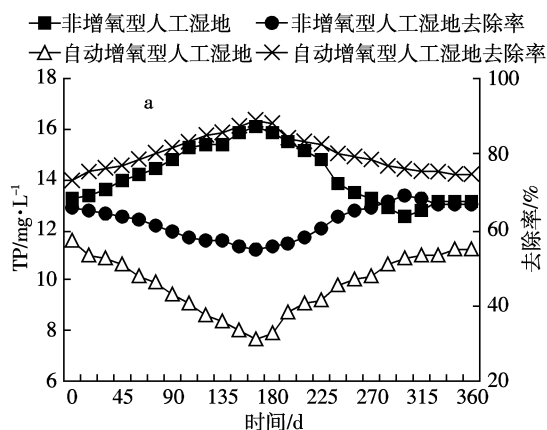


图4 氨氮在人工湿地内的变化情况

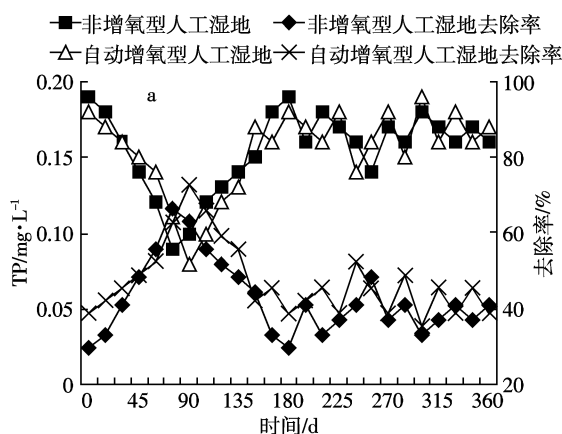
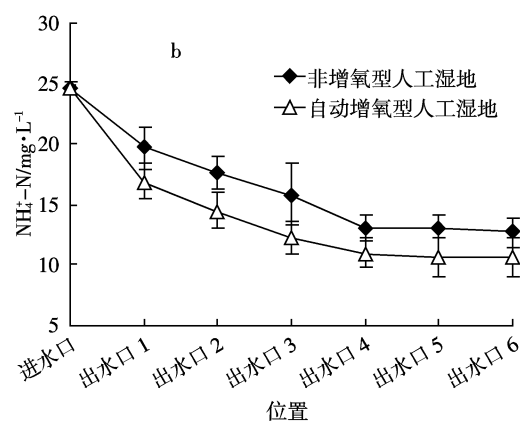
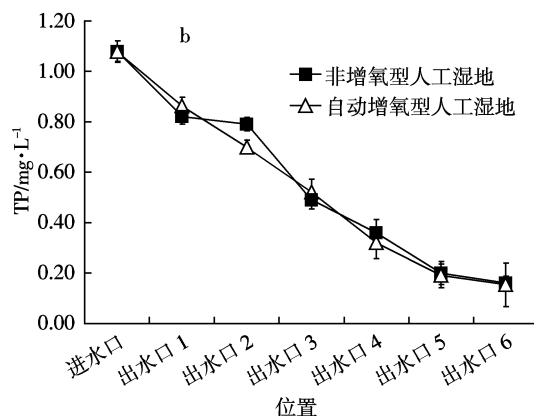
Figure 4 The changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ in the constructed wetland

图5 总磷在人工湿地内的变化情况

Figure 5 The changes of TP in the constructed wetland



2.4 总磷的变化

图5显示总磷在两种类型人工湿地中的变化情况。从整体上看,自动增氧型和非增氧型人工湿地的TP含量及去除率曲线都基本重合,TP含量和去除率分别在 $0.08\sim 0.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $82\%\sim 93\%$ 之间波动(图5a),说明增氧措施对于提高人工湿地的除磷率没有显著影响。农村生活污水进入人工湿地后TP含量先是降低,然后在180 d左右达到稳定,表明填料吸附饱和。从图5b可以看出,整个试验过程中,磷的含量随着填料的吸附从进水口到出水口5逐渐降低,然后在出水口6达到稳定,且两种人工湿地不同位置的磷含量没有显著性差异,表明溶解氧和温度对磷的去除率影响不显著。

3 讨论

3.1 溶解氧含量对脱氮效果的影响

相对于非增氧型人工湿地,采用自动增氧措施

后,脱氮率随着溶解氧浓度的升高而显著增加,这说明好氧环境有利于微生物的硝化作用。同时,土壤微生物分析表明,自动增氧型湿地系统内氨化菌的数量为 $(10^6\sim 10^7)\text{CFU}\cdot\text{g}^{-1}$ 土壤,亚硝化菌和硝化菌的数量均为 $(10^3\sim 10^5)\text{MPN}\cdot\text{g}^{-1}$ 土壤,而反硝化菌的数量均为 $(10^5\sim 10^6)\text{MPN}\cdot\text{g}^{-1}$ 土壤。氨化菌数量无显著性差异,但亚硝化菌及硝化菌的数量显著高于非增氧型湿地系统($P<0.05$),而反硝化菌的数量则稍低,这说明自动增氧型湿地系统的供氧状况较好,为湿地系统高效脱氮奠定了基础。

3.2 溶解氧含量对除磷效果的影响

通过图5可以看出,增氧措施对于人工湿地的除磷率并没有显著影响,这是由于磷的去除机理主要包括微生物的同化和植物的吸收作用、聚磷菌的过量摄磷作用、填料的物理化学作用,但最主要的是填料对磷的吸附作用及其纳磷容量,而植物吸收对有机磷的去除率影响不大,这与前人的研究结果相一致^[15-16]。

4 结论

自动增氧型垂直流人工湿地中 DO 浓度保持在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以上, 比非增氧型人工湿地高 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右。自动增氧型人工湿地硝化良好, NH_4^+-N 最大去除率达到了 69.04%; 而非增氧型湿地由于供氧不足, 最大去除率仅为 49.25%。 NH_4^+-N 主要在人工湿地的中上部去除, 且自动增氧型湿地 NH_4^+-N 浓度比非增氧型显著性低, 说明自动增氧对提高脱氮效率是有效的。

两种类型人工湿地的 TP 含量及去除率曲线都基本重合, TP 含量和去除率分别在 $0.08 \sim 0.19 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、82%~93% 之间波动, 表明 TP 去除率与人工湿地系统溶解氧含量和温度关系不显著。

参考文献:

- [1] 李海明. 农村生活污水分散式处理系统与实用技术研究[J]. 环境科学与技术, 2009 (9): 177-181.
LI Hai-ming. Distributed rural sewage treatment system and practical technology[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009 (9): 177-181.
- [2] 蔡树美, 王娟娟, 蔡玉琪, 等. 波式潜流人工湿地对生活污水中磷的去除效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1484-1487.
CAI Shu-mei, WANG Juan-juan, CAI Yu-qi, et al. Treatment efficiency of wavy subsurface constructed wetland for removal of phosphorous from house-hold wastewater[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1484-1487.
- [3] 于少鹏, 王海霞, 万忠娟, 等. 人工湿地污水处理技术及其在我国发展的现状与前景[J]. 地理科学进展, 2004, 23(1): 22-29.
YU Shao-peng, WANG Hai-xia, WAN Zhong-juan, et al. Treatment technology of wastewater using constructed wetland and its present status and future prospects in China[J]. *Progress in Geography*, 2004, 23(1): 22-29.
- [4] Ye Fen-xia, Li Ying. Enhancement of nitrogen removal in towery hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities[J]. *Ecological Engineering*, 2009, 35(7): 1043-1050.
- [5] Gabriel M L, Roxane M, Jacques B, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands[J]. *Water Research*, 2009, 43: 535-545.
- [6] Zhang Lie-yu, Zhang Lan, Liu Yong-ding, et al. Effect of limited artificial aeration on constructed wetland treatment of domestic wastewater[J]. *Desalination*, 2010, 250: 915-920.
- [7] 叶建锋, 徐祖信, 李怀正. 垂直潜流人工湿地堵塞机制: 堵塞成因及堵塞物积累规律[J]. 环境科学, 2008, 29(6): 1508-1512.
YE Jian-feng, XU Zu-xin, LI Huai-zheng. Clogging mechanism in vertical-flow constructed wetland: Clogging cause and accumulation distribution characteristics[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(6): 1508-1512.
- [8] Claudiane O P, Florent C, Yves C, et al. Artificial aeration to increase pollutant removal efficiency of constructed wetlands in cold climate[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 27: 258-264.
- [9] 孙亚兵, 冯景伟, 田园春, 等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(3): 404-408.
SUN Ya-bing, FENG Jing-wei, TIAN Yuan-chun, et al. Treatment of rural domestic sewage with self-aeration subsurface constructed wetland[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3): 404-408.
- [10] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
Editorial Committee of Inspection and Analytical Approach for Water and Wastewater of State Environmental Protection Administration. Inspection and analytical approach for water and wastewater [M]. Beijing: China Environment Science Press, 2002.
- [11] 张甲耀, 夏盛林, 邱克明, 等. 潜流型人工湿地污水处理系统氮去除及氮转化细菌的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(3): 323-327.
ZHANG Jia-yao, XIA Sheng-lin, QIU Ke-ming, et al. Nitrogen removal by a subsurface constructed wetlands wastewater treatment system and nitrogen-transformation bacteria[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(3): 323-327.
- [12] Alar N, Elar P, Ülo M. The effect of pre-aeration on the purification processes in the long-term performance of a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 380: 229-236.
- [13] Marika T, Jaanis J, Jaak T. Microbial biomass, activity and community composition in constructed wetlands[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407: 3958-3971.
- [14] Christos S A, Vassilios A T. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 173-191.
- [15] Pant H K, Reddy K R, Lemon E. Phosphorus retention capacity of root bed media of sub-surface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2001, 17(4): 345-355.
- [16] 王媛媛, 张衍林. 人工湿地的基质及其深度对生活污水中氮磷去除效果的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3): 581-586.
WANG Yuan-yuan, ZHANG Yan-lin. Effects of the depth and variety of substrates used in constructed wetlands on nitrogen and phosphorus' removal[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3): 581-586.