

# 组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究

杨林 李咏梅\*

(同济大学环境科学与工程学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要** 在巢湖流域水环境治理中, 依托工业园区污水厂, 进行了组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究。介绍了工艺流程和设计参数, 运行结果表明, 整个处理系统运行稳定, 对 COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$  和 TP 的平均去除率分别为 65.5%、75.5% 和 49.2%, 其中一级潜流湿地对各污染物的去除贡献率最高。系统出水 COD、氨氮、总磷基本达到了《地表水环境质量标准》(GB3838-2002) 中的 V 类水标准。此外还利用 GC/MS 初步对系统进出水进行了有机物组分分析, 结果表明尾水中含有除草剂及农药中间体等难降解有机物, 组合人工湿地对这些物质有一定去除效果。

**关键词** 组合人工湿地 深度处理 污水厂尾水 中试研究

中图分类号 X703.1 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)06-1846-05

## Pilot-scale study on advanced treatment of tail-water from wastewater treatment plant in industrial park using hybrid constructed wetland system

Yang Lin Li Yongmei

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract** In order to control the pollution of Chao Hu Lake, pilot study was conducted to treat the tail-water from a wastewater treatment plant (WWTP) in industrial park using hybrid constructed wetland system. The treatment processes and designing parameters were introduced. The results indicated that the whole constructed wetland system was operated stably, with the average removal rates of COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TP being 65.5%, 75.5% and 49.2%, respectively. Of these removed pollutants, most were contributed by the primary subsurface constructed wetland. COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and TP in the final effluent reached the class V criteria of the Environmental Quality Standard for Surface Water (GB3838-2002). GC/MS was used to analyze the organic constituents in the influent and effluent of the wetland system. The results indicated that there were some herbicides and pesticide intermediates. The hybrid constructed wetland can partly remove these compounds.

**Key words** hybrid constructed wetland; advanced treatment; WWTP tail-water; pilot study

改革开放以来,我国建成了许多工业园区,大部分工业园区的污水都集中在园区污水厂进行集中处理。污水作为一种潜在的水资源,再生利用、提高水资源的有效利用效率近几年得到了重视<sup>[1,2]</sup>,在这样的背景下选取适当的工艺开展工业园区污水厂尾水深度处理与循环利用显得十分重要。

常见的尾水深度处理技术包括活性炭吸附、膜分离法、高级氧化法以及臭氧法<sup>[3]</sup>,但这几种技术建设运行成本高昂,限制了它们在尾水生态修复方面的应用;而人工湿地作为一种生态处理技术,其高效、低成本的优点,适合用作污水厂尾水的深度处理<sup>[4,6]</sup>。而且随着对湿地技术研究的深入,湿地处

理技术的工艺也得到了长足改进:具代表性的就是组合式的人工湿地技术<sup>[7,8]</sup>,它拥有比之传统人工湿地更高的污染物净化效能、更高的应用范围和使用寿命<sup>[9]</sup>。据此,本研究依托合肥循环经济示范园区污水处理厂进行了组合人工湿地处理工业园区污水厂尾水的中试研究。

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07316-003,2009ZX07316-005)

收稿日期:2012-01-05; 修订日期:2012-03-13

作者简介:杨林(1986~),男,硕士研究生,主要研究方向:污水处理与资源化利用。E-mail:lswordy@163.com

\* 通讯联系人, E-mail:liyongmei@tongji.edu.cn

目前污水厂的处理工艺为厌氧酸化、SBR 工艺,出水执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB18918-2002)一级 B 标准,其最终受纳水体是巢湖。为了进一步保护巢湖水环境,园区拟对污水厂尾水采取深度处理,主要工艺为生物滤池预处理,后接组合人工湿地,对污水厂尾水进行深度处理,进一步去除其中的污染物。本论文针对生物滤池的出水,研究了组合人工湿地对常规污染指标的去除情况,考察了各指标在组合人工湿地中的变化,分析了各湿地单元对污染物去除的贡献率,研究结果可为

工业园区污水的处理提供理论依据和技术参数。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 人工湿地工艺流程

人工湿地中试研究现场位于合肥市循环经济园区污水厂内东北角,占地面积约 4 414 m<sup>2</sup>,设计水力停留时间 7.7 d。设计处理规模为 360 m<sup>3</sup>/d,整个工艺包括两级水平潜流湿地(SSFCW)、一级自由表面流湿地(SFCW)、氧化塘、后水平潜流湿地。具体工艺流程见图 1。

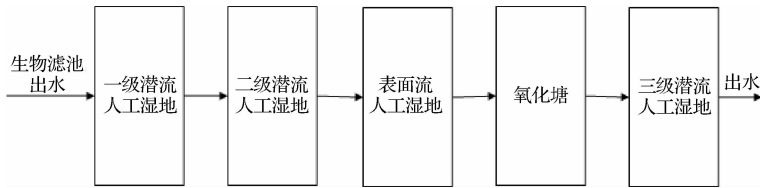


图 1 组合人工湿地工艺流程

Fig. 1 Flow chart of hybrid wetlands process

为不污染地下水,湿地床底做隔水防渗,纵向置坡度。进水端沿床宽构筑有配水沟,沟壁设穿孔花墙。来自人工快速生物滤池的进水由配水渠分配均匀,沿配水沟渠下部的穿孔花墙潜流呈水平渗滤前进,从另一端出水沟流出。在出水端砾石层底部设置多孔集水管,与能调节床内水位的出水管连接,以控制、调节床内水位。构筑物所有地基地座采用素土夯实,夯实后铺设 100 mm 碎石垫层、50 mm 细沙层,土工膜铺在细沙上,然后往上依次为填料层和土壤层。湿地填料以天然砾石为主,还包括鹅卵石、钢渣和沸石。

湿地内种有多种植物,第一级潜流湿地主要种植了美人蕉、青叶芦竹,第二级潜流湿地主要种植了莎草、灯芯草,表面流湿地和氧化塘种植了水葱、芦苇和睡莲,第三级潜流湿地并联的 3 个单元分别种植了伞草、花叶芦竹、黄花美人蕉。植物的选择是根据湿地启动期间,植物的株高测量及长势观察等表现指标,从试种的多种待选湿地植物中优选得出。

组合人工湿地具体设计参数见表 1。

### 1.2 进水水质

系统进水为工业园区污水厂尾水经生物滤池预处理后的出水,水质见表 2。

### 1.3 湿地运行方式

中试工程于 2010 年 8 月 28 日完成植物种植,10 月 3 日进行试水,10 月 13 日开始正式运行,水质检测时间为 10 月 20 日至翌年 9 月 10 日,跨越 4 个

表 1 人工湿地设计参数

Table 1 Designing parameters of hybrid constructed wetlands

项目	一级潜流湿地	二级潜流湿地	自由表面流湿地	氧化塘	三级潜流湿地	合计
长(m)	45	45	42.2	27	27	
宽(m)	30	30	13.5	14	20	
面积(m <sup>2</sup> )	1 350	1 350	569.7	378	540	4 187
子单元个数	5	5	1	1	3	
深度(m)	1.2	1.2	0.7		1.2	
填料层厚度(m)	0.7	0.7	0.3(土壤)		0.7	
水力停留时间(d)	2.6	2.6	0.5	1	1	7.7

表 2 进水水质

Table 2 characteristics of raw wastewater (mg/L)

水质指标	COD	氨氮	TN	TP
范围	66 ~ 138	2.4 ~ 11.1	4.2 ~ 12.8	0.52 ~ 1.07
均值	100	5.6	7	0.79

季节。实验期间湿地处理水量年均 300 m<sup>3</sup>/d,采用间歇布水方式,每天布水 2 次,每次约 3 h,水样的采集于进水 1 h 后于各采样点进行;人工湿地 HRT 为 7 ~ 8 d,水力负荷约 0.20 m<sup>3</sup>/d。

## 2 结果与讨论

### 2.1 对 COD 的去除效果

湿地的进水 COD 为 66 ~ 138 mg /L,出水 COD 均在 50 mg /L 以下,平均去除率约为 66%。各组湿地的出水水质虽有所差别,但变化趋势一致。在进水 COD 平均为 101 mg/L 时,第一、二、三级潜流湿地

的出水 COD 分别为 56、35 和 32.6 mg/L, 各级湿地对去除 COD 的贡献率分别为 44.1%、17.6% 和 2.8%, 见图 2, 图中柱状图为各级湿地 COD 去除贡献率。

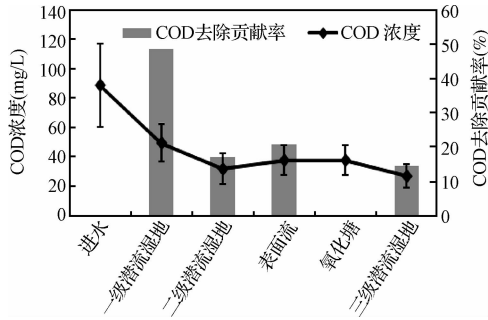


图 2 COD 沿程变化及各单元去除贡献率

Fig. 2 COD change along wetlands and contribution of COD removed by each treatment unit

观察各单元构筑物的出水 COD, 第一级潜流湿地在去除 COD 中发挥着重要作用。分析其原因: 一级潜流湿地进水的溶解氧高, DO 约 1.94 ~ 2.73 mg/L, 有利于有机物的降解, 而第二级潜流湿地进水溶解氧明显偏低, 约为 0.37 ~ 0.82 mg/L, 可以预料到二级潜流湿地床内的溶解氧沿长度方向递减, 床体内部分区域溶解氧浓度处于一极低的水平, 这种情况下附着在湿地填料上的生物膜对 COD 的去除能力有限<sup>[10,11]</sup>; 由于前两级湿地降解了大部分的有机物, 使得后续装置的进水 COD 浓度较低, 对总去除率的影响不大。

## 2.2 对氨氮及总氮的去除效果

各组湿地对氨氮的去除情况如图 3 所示。进水氨氮为 2.4 ~ 11.1 mg/L, 最终出水氨氮普遍能达到 2 mg/L 以下, 平均去除率为 75.5%。各级湿地对去除氨氮的平均贡献率分别为 47%、12% 和 16%。第一级湿地具有良好的硝化效果, 是去除氨氮的主要场所, 第三级湿地则可以有效保障出水氨氮浓度达标。

各级湿地对氨氮的去除效果存在明显差别 (见图 3), 除了和湿地床内的溶解氧浓度有关外<sup>[12]</sup>, 和湿地填充的填料也关系密切, 第一级湿地填充有沸石, 研究表明沸石能吸附大量氨氮<sup>[13]</sup>, 故一级湿地对氨氮的去除贡献远高于后续的湿地单元。

但在监测中发现, 湿地对 TN 的去除效果有限, 系统进水 TN 6.89 mg/L, 出水 3.61 mg/L, 去除率尚不能达到 50%, 鉴于其他文献中提出湿地脱氮的主要途径是硝化反硝化<sup>[14-16]</sup>, 湿地系统的反硝化能力不足, 其原因可能是, 湿地系统处理污水厂尾水, 进

水中易降解有机碳源相对较低, 在第二级潜流湿地, 其进水 COD 为 56 mg/L, TN 为 4.2 mg/L, 具明显的低碳氮比特征。

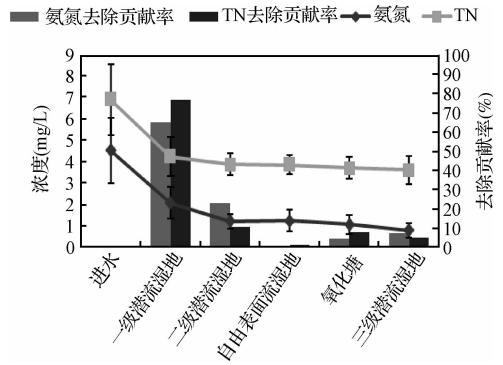


图 3 TN、氨氮沿程变化及各单元去除贡献率

Fig. 3 TN & ammonia nitrogen change along wetlands and contribution of N removed by each treatment unit

## 2.3 对正磷酸盐及 TP 的去除效果

湿地进水 TP 为 0.23 ~ 0.91 mg/L, 正磷酸盐为 0.20 ~ 0.61 mg/L; 出水 TP 稳定在 0.5 mg/L 以下, 正磷酸盐浓度约 0.3 mg/L。在实验中, 湿地对 TP 的去除效果良好, 正磷酸盐的去除趋势和 TP 的去除基本一致, TP 及磷酸盐在污水的浓度经一级潜流湿地后下降最为明显 (见图 4), 各级处理单元对去除  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  的贡献率分别为 71.4%、19.0%、0.3%、2.1% 和 7.2%, 在尾水的净化过程中一级潜流湿地贡献最大。

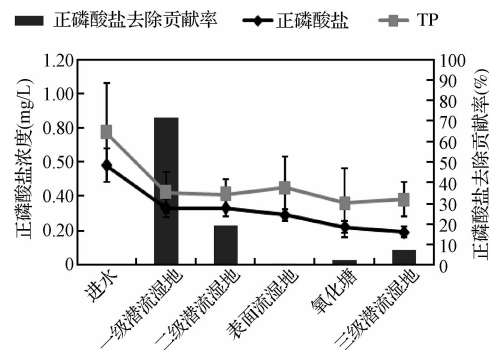


图 4 正磷酸盐、TP 沿程变化及各单元去除贡献率

Fig. 4 Orthophosphate & TP change along wetlands and contribution of orthophosphate removed by each treatment unit

分析其原因, 可能与一级潜流湿地填有对磷酸盐有较强吸附能力的钢渣<sup>[17]</sup>有关。湿地对磷的去除途径主要有填料层物化作用、植物吸收以及微生物去除<sup>[18]</sup>。实验期间, 系统长期保持稳定的除磷效果, 不受植物长势以及单元内污水 DO 浓度影响, 这

说明一级潜流湿地单元除磷主要依靠的是填料作用。

### 2.4 系统进出水 GC/MS 定性分析

由于是工业园区污水,即便经过二级处理,尾水中仍含有难降解有机物,为了更好地了解进水的组成,我们还对工艺进出水做了 GC/MS 定性分析实验。

系统进水有机物分析见图 5 和表 3。

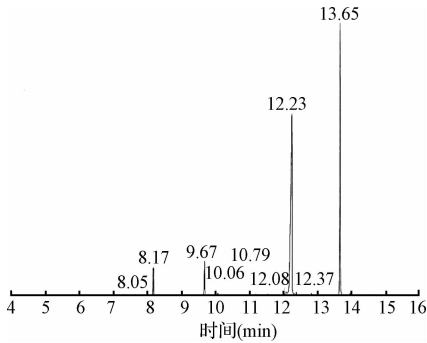


图 5 进水 GC/MS 谱图

Fig.5 GC/MS spectra of influent

表 3 进水中有机物分析

Table 3 Analysis of organic compounds in influent

顺序号	有机物	分子式	质量百分率 (%)
1	2-氨基-4,6-二甲氧基嘧啶	C <sub>6</sub> H <sub>9</sub> N <sub>3</sub> O <sub>2</sub>	0.47
2	2,4-二甲氧基-5-甲基嘧啶	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	4.31
3	2-氯-N-甲基乙酰苯胺	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> ClNO	4.7
4	2-氨基-(1-甲基乙基)-苯甲酰胺	C <sub>10</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> O	0.32
5	2-氯-N-甲基乙酰苯胺	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> ClNO	0.47
6	灭草松	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S	50.86
7	去甲替林	C <sub>19</sub> H <sub>21</sub> N	36.26

由图 5、表 3 可知,湿地系统进水中含有不少的有毒有害有机物,其中含量最多的有机物为灭草松,质量百分比为 50.86%,其分子式为 C<sub>10</sub>H<sub>12</sub>N<sub>2</sub>O<sub>3</sub>S,它是一种具选择性的触杀型苗后除草剂,用于杂草苗期茎叶处理,防除一年生阔叶杂草和莎草科杂草。含量次多的是去甲替林,除这两种外,其他有机物主要以苯胺类物质和嘧啶类物质为主,这两类物质大多也都是农药中间体和医药中间体。

系统出水的有机物分析见表 4 和图 6。

表 4 出水中有机物分析

Table 4 Analysis of organic compounds in effluent

顺序号	有机物	分子式	质量百分率 (%)
1	2,4-二甲氧基-5-甲基嘧啶	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5.74
2	2-氯-N-甲基乙酰苯胺	C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> ClNO	4.38
3	灭草松	C <sub>10</sub> H <sub>12</sub> N <sub>2</sub> O <sub>3</sub> S	75.84
4	去甲替林	C <sub>19</sub> H <sub>21</sub> N	10.75

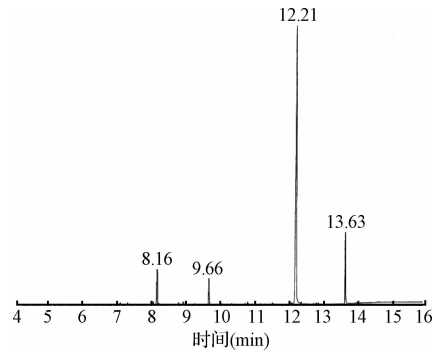


图 6 出水 GC/MS 谱图

Fig.6 GC/MS spectra of effluent

由图 6 可以看出,人工湿地系统出水有机物的种类有所减少,出水中主要检测出 4 种有机物(见表 4),主要成分仍为灭草松,质量百分比为 75.84%;通过进出水峰面积的比较,2,4-二甲氧基-5-甲基嘧啶去除率约为 69.1%,2-氯-N-甲基乙酰苯胺去除率约为 76.3%,灭草松去除率约为 65.3%,去甲替林去除率约为 93.1%,湿地对有机物的去除效果良好。另外 2-氨基-4,6-二甲氧基嘧啶、2-氨基-(1-甲基乙基)-苯甲酰胺、2-氯-N-甲基乙酰苯胺浓度低于检测限,也说明了污水经湿地系统深度处理后降低了对环境的危害。

由于湿地所在的污水厂接纳的污水现阶段主要来自大型农化企业,湿地的运行管理尤为需要注意是否种植有对灭草松等除草剂敏感的植物,及早采取措施以防湿地植被死亡影响到系统的正常运行。

### 3 结 论

(1) 采用生物滤池预处理-潜流人工湿地-自由水面人工湿地与生态氧化塘组合技术处理污水厂尾水,对 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 的平均去除率分别为 65.5%、75.5% 和 49.2%,因进水低碳氮比, TN 去除率偏低;出水水质 COD、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 TP 达到《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类标准。对工业园区水污染控制起到一定示范推动作用。

(2) 污染物沿程去除,污水得到进化的过程中,一级潜流湿地单元对 COD、氮、磷去除贡献最大。

(3) 利用 GC/MS 初步分析了湿地系统进出水有机组分,工业园区污水厂尾水中主要含有灭草松、去甲替林和其他几种嘧啶、苯胺类物质,经湿地系统处理,去甲替林和嘧啶、苯胺类物质得到有效去除。另外人工湿地对含除草剂成分的污水处理还有待研究。

## 参考文献

- [1] Akratos C., Tsihrintzis V. Effect of temperature, HRT, vegetation and porous media on removal efficiency of pilot-scale horizontal subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, **2007**, 29(2):173-191
- [2] 于荣丽,李亚峰,孙铁珩. 人工湿地污水处理技术及其发展现状. *工业安全与环保*, **2006**, 32(9):29-31  
Yu Rongli, Li Yafeng, Sun Tieheng. Wastewater treatment technology on constructed wetland and its development status. *Industrial Safety and Environmental Protection*, **2006**, 32(9):29-31 (in Chinese)
- [3] 牟冠文,李光浩. 污水深度处理方法及其应用. *中国环保产业*, **2006**, (3):40-43  
Mu Guanwen, Li Guanghao. Tertiary sewage treating process and its application. *China Environmental Protection Industry*, **2006**, (3):40-43 (in Chinese)
- [4] 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. *地理科学进展*, **2004**, 23(1):22-29  
Yu Shaopeng, Wang Haixia, Wan Zhongjuan. Treatment technology of wastewater using constructed wetland and its present status and future prospects in China. *Progress in Geography*, **2004**, 23(1):22-29 (in Chinese)
- [5] 梁继东,周启星,孙铁珩,等. 人工湿地污水处理系统研究及性能改进分析. *生态学杂志*, **2003**, 22(2):49-55  
Liang Jidong, Zhou Qixing, Sun Tieheng. A research review and technical improvement analysis of constructed wetland system for wastewater treatment. *Chinese Journal of Ecology*, **2003**, 22(2):49-55 (in Chinese)
- [6] 沈耀良,王宝贞. 人工湿地系统的除污机理. *江苏环境科技*, **1997**, (3):1-4  
Shen Yaoliang, Wang Baozhen. Purification mechanism of constructed wetland system. *Jiang Su Environmental Science and Technology*, **1997**, (3):1-4 (in Chinese)
- [7] 吴振斌,张晟,张金莲,等. 人工湿地组合系统除磷的净化空间研究. *环境科学与技术*, **2007**, 30(11):77-80  
Wu Zhenbin, Zhang Cheng, Zhang Jinlian. Purification area of phosphorus removal by constructed wetland system. *Environmental Science & Technology*, **2007**, 30(11):77-80
- [8] 张晟,贺锋,成水平,等. 八种不同工艺组合人工湿地系统除磷效果研究. *长江流域资源与环境*, **2008**, 17(2):295-300  
Zhang Sheng, He Feng, Cheng Shuiping. Phosphorus removal efficiency in eight kinds of different combination systems of wetland. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, **2008**, 17(2):295-300 (in Chinese)
- [9] House C. H., Bergmann B. A., Stomp A. M., et al. Combining constructed wetlands and aquatic and soil filters for reclamation and reuse of water. *Ecological Engineering*, **1999**, 12(2):27-38
- [10] Cynthia Mitchell, Dennis McNevin. Alternative analysis of BOD removal in subsurface flow constructed wetlands employing Monod kinetics. *Water Research*, **2001**, 35(5):1295-1303
- [11] 李世斌,施培俊,郭岭志. 厌氧-垂直潜流型人工湿地处理生活污水. *水处理技术*, **2008**, 34(5):59-62  
Li Shibin, Shi Peijun, Guo Lingzhi. The pilot study of anaerobic-vertical subsurface constructed wetland used in sewage treatment. *Technology of Water Treatment*, **2008**, 34(5):59-62 (in Chinese)
- [12] 张翔凌,张晟,贺锋,等. 不同填料在高负荷垂直流人工湿地系统中净化能力的研究. *农业环境科学学报*, **2007**, 26(5):1905-1910  
Zhang Xiangling, Zhang Sheng, He Feng. Effect of different filter media on the treatment performances of vertical flow constructed wetlands at high hydraulic loading. *Journal of Agro-Environment Science*, **2007**, 26(5):1905-1910 (in Chinese)
- [13] 陈德强,吴振斌,成水平,等. 人工湿地-氧化塘工艺组合对氮和磷去除效果研究. *四川环境*, **2004**, 23(6):4-6  
Chen Deqiang, Wu Zhenbin, Cheng Shuiping, et al. The performance of several integrated systems of constructed wetland and oxidation pond for nitrogen and phosphorus removal. *Sichuan Environment*, **2004**, 23(6):4-6 (in Chinese)
- [14] 卢少勇,金相灿,余刚. 人工湿地的氮去除机理. *生态学学报*, **2006**, 26(8):2671-2677  
Lu Shaoyong, Jin Xiangcan, Yu Gang. Nitrogen removal mechanism of constructed wetland. *Acta Ecologica Sinica*, **2006**, 26(8):2671-2677 (in Chinese)
- [15] 陆松柳,胡洪营. 人工湿地的反硝化能力研究. *中国给水排水*, **2008**, 24(7):63-69  
Lu Songliu, Hu Hongying. Study on denitrification capacity of constructed wetlands. *China Water & Wastewater*, **2008**, 24(7):63-69 (in Chinese)
- [16] Kuschk P., Wiessner A., Kappelmeyer U., et al. Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water research*, **2003**, 37(17):4236-4242
- [17] Drizo A., Frost C. A., Grace J., et al. Phosphate and ammonium distribution in a pilot-scale constructed wetland with horizontal subsurface flow using shale as a substrate. *Water Research*, **2000**, 34(9):2483-2490
- [18] Dunne E. J., Culleton N., Donovan G. O., et al. Phosphorus retention and sorption by constructed wetland soils in Southeast Ireland. *Water research*, **2005**, 39(18):4355-4362