

人工湿地系统用于地表水水质改善的效能及特征

刘红¹, 代明利¹, 刘学燕², 欧阳威¹, 刘培斌³

(1. 北京师范大学环境科学研究所 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875, E-mail: LH64@sina.com; 2. 中国农业大学环境工程系, 北京 100094; 3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044)

摘要:在北京官厅水库附近建立潜流人工湿地(总面积: $3 \times 20 \text{ m} \times 2 \text{ m}$), 芦苇、蒲草混合种植, 研究其在不同季节条件下对地表水的处理效能及特征, 分析了进水浓度、水力负荷、温度对污染物去除率的影响。结果表明, 系统对地表水有较好的处理效果, COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的出水浓度与进水浓度的回归关系遵从线性关系; 系统对 TN、TP 的去除率分别为 20% ~ 60% 和 30% ~ 45%; 污染物的去除率随温度的降低而降低, 随水力负荷率的增加而降低; COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率与其进水浓度呈正相关, 而 TP 去除率与其进水浓度呈负相关。并研究建立了潜流湿地冬季运行管理措施。

关键词: 人工湿地; 水质改善; 地表水; 官厅水库

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)04-0065-05

Performance of Treatment Wetland Systems for Surface Water Quality Improvement

LIU Hong¹, DAI Ming-li¹, LIU Xue-yan², OUYANG Wei¹, LIU Pei-bin³

(1. State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, Institute of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China E-mail: LH64@sina.com; 2. Environmental Engineering Department, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 3. Beijing Hydraulic Research Institute, Beijing 100044, China)

Abstract: Intercropped with *Phragmites communis* and *Typha angustifolia*, subsurface flow constructed wetland systems (CWs) with the surface area of $3 \times 20 \text{ m} \times 2 \text{ m}$ were established beside Guanting Reservoir, an important source water base of Beijing. The treatment performance of the systems with different season were studied, the impacts of influent concentration, hydraulic loading rate and water temperature on contaminations removal were analyzed. The result showed that the subsurface flow CWs had the better decontamination effect to micro-pollution surface water. The relationship between the concentrations of COD_{Mn} and $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ in inflow and outflow followed the linear equation. The removal rates of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the systems were 20% ~ 60% and 30% ~ 45%, respectively. The removal rates of contaminations were reduced with the decrease of water temperature and the increase of hydraulic loading rate, the removal rates of COD_{Mn} , $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and TN showed the positive correlation with their inflow concentration, but the removal rate of TP showed the negative correlation with its inflow concentration. Operation and management considerations of the subsurface flow CWs in winter were investigated in this study.

Key words: constructed wetland; water quality improvement; surface water; Guanting reservoir

在过去的几十年中,人们对人工湿地污水处理的兴趣不断增加,由于人工湿地具有出水水质好、建设成本低、运行费用少、维护管理方便以及生态效益突出等优点,其应用的领域不断拓宽,除了各国研究人员所进行的大量关于人工湿地处理生活污水^[1~4]、市政废水^[5]、垃圾渗滤液^[6]、农业废水^[7,8]、石油化工废水^[9,10]以及城市暴雨径流污染控制^[11]等方面的研究之外,利用人工湿地技术进行湖泊污染防治的研究^[12]已有报道。

为了利用人工湿地技术处理受污染的地表水水源,特别是在冬季温度较低地区应用,在北京的官厅水库附近建立了野外试验湿地系统,进行了垂流人工湿地和潜流人工湿地处理地表水的试验研究。垂流人工湿地对污染物的去除率比较高^[13],但是由于其为表面布水,冬季结冰期无法正常运行,而潜流湿

地系统由于受温度变化的影响比较小,更适合在温度变化较大的温带地区应用。

本文研究了潜流人工湿地系统用于改善水库水质的效能与特征,重点分析了其对有机污染物和营养物质的去除效果,分析了进水浓度、水力负荷以及水温对污染物去除率的影响,并介绍了保证系统正常运行的必要管理措施。

1 材料与方法

1.1 系统概述和试验设计

本研究的人工湿地由 3 个平行的处理单元组

收稿日期: 2003-05-31; 修订日期: 2003-07-08

基金项目: 国家重点科技攻关计划项目(96-920-40-04)。

作者简介: 刘红(1964~),女,博士,教授,主要从事水污染控制与资源化、微污染源水净化和流域污染治理方面的研究工作。

成(长 20 m、宽 2 m、高 0.8 m),芦苇(*Phragmites communis*)和蒲草(*Typha angustifolia*)混合种植,位于官厅水库北岸,人工湿地中的水流形式主要是水平潜流,图 1 显示了该潜流湿地系统的结构,官厅水库水由水泵提升进入人工湿地,本系统连续进水,不间断运行。

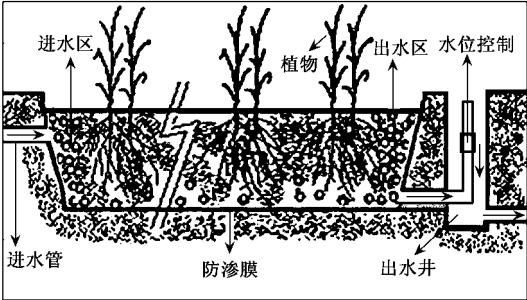


图 1 潜流人工湿地系统

Fig.1 The sketch of subsurface constructed wetland systems

种植植物的湿地床体底部有防渗的塑料膜(厚度 0.5 mm),从底部向上依次填充较大砾石(粒径 2.5 cm 左右,高度 20 cm)、较小砾石(粒径 0.5 ~ 2.0,高度 20 cm)和当地沙质土壤(高度 20 cm),作为潜流系统运行.经过处理的水由出水管从床体的底部导出,在出水井(出水井在冬季需要采取保温措施)得到收集和排放.床体中的水位通过自由调节的出水管来控制。

表 1 给出了本研究中该人工湿地系统的相关资料。

表 1 官厅水库人工湿地的设计和运行参数

Table 1 Operational and design characteristics of the wetland system at Guanting Reservoir

项目	资料
人工湿地	
建成时间	2002-05
总面积/ m ²	120
水流系统	水平潜流,连续运行
平均水力停留时间/ h	5
平均水力负荷率/ m ³ ·(m ² ·d) ⁻¹	0.3
填料(上层)	当地沙质土壤
填料(中层)	较小砾石(粒径 0.5 ~ 2.0 cm)
填料(底层)	较大砾石(粒径 2.5 cm 左右)
系统进水	
类型	受污染地表水
平均水力负荷/ m ³ ·d ⁻¹	36
平均水温/ ℃	20.4 (6 ~ 10 月);1.3 (11 日 ~ 次年 3 月)

1.2 试验用水

人工湿地系统位于官厅水库永定河入库口地

区,进水取自官厅水库的边缘水体——黑土洼。由于周围农田和葡萄园施用氮肥,所以,夏季降雨形成的地表径流会携带大量的氮进入水体,从而造成水体 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度有较大幅度的变化.另外,永定河入库水的水质和水量以及水体表面风力的大小等因素对试验用水水质有一定影响。水质具体情况见表 2。

表 2 人工湿地进水水质

Table 2 Influent quality of constructed wetland at Guanting Reservoir

水质参数	COD _{Mn}	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	TN	TP
均值/ mg·L ⁻¹	6.24	0.644	4.45	0.0830
标准差(SD)	0.951	0.988	2.70	0.0234

1.3 取样和测试

试验所用的进水样取自湿地进水管,出水样取自湿地出水井,在 10 个月的测试分析期内,取样测试频率为 5 ~ 8 次/月。

分析的水质指标包括 COD_{Mn}、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 和 TP 等,均采用标准方法分析.其中, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 采用纳氏试剂光度法,TN 采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,TP 采用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法。

1.4 试验数据分析

利用 OriginLab Corporation 的 Origin 6.1 进行图表分析和回归分析。

2 结果与讨论

2.1 人工湿地对 COD_{Mn} 的去除效能及特征

图 2 中的 A、B 显示了在试验期间(2002-06 ~ 2003-03)潜流人工湿地对地表水体中 COD_{Mn} 的去除效果.图 2 中的进、出水浓度为当月浓度的平均值。

进水 COD_{Mn} 浓度在 4.5 ~ 7.5 mg/L,水力负荷为 0.1 ~ 0.45 m³·(m²·d)⁻¹ 的情况下,人工湿地系统对于地表水中的有机污染物的去除率为 15 % ~ 40 % .能有效地去除水中的有机污染物是人工湿地系统的显著特点之一,但是人工湿地处理生活污水和其它废水,COD_{Mn} 的去除率一般在 80 % ~ 90 % 左右^[14~17],而对于地表水,由于有机物浓度比较低且难以降解,水力停留时间较短,因此去除率相对于污水来说要低一些。

湿地对水中污染物的去除效果受进水浓度、温度和水力负荷的影响.平均水力负荷率为 0.3 m³·(m²·d)⁻¹ 时,人工湿地系统的进水 COD_{Mn} 和出水 COD_{Mn} 所配合的回归方程为 $y = a + bx$,其中 x 表示进水 COD_{Mn} 浓度(mg/L), y 表示出水 COD_{Mn} 浓度(mg/L),在高温季节(6 月 ~ 10 月), $a = 2.0486$,

$b = 0.4167$, $R = 0.8252$; 低温季节(11月~次年3月) $a = 0.5182$, $b = 0.6885$, $R = 0.8777$, 显著性检验表明上述回归关系均为显著($\alpha < 0.05$)。

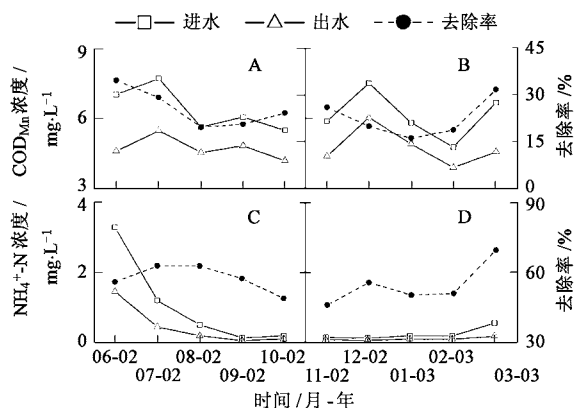


图2 人工湿地对 COD_{Mn} 和 NH_4^+-N 的去除效果

Fig. 2 The removal effect on COD_{Mn} and NH_4^+-N in CWs

2.2 人工湿地对 NH_4^+-N 的去除效能及特征

从图2C、D可以看出,进水 NH_4^+-N 浓度在 $0.2 \sim 3.0 \text{ mg/L}$ 之间波动时,当水力负荷为 $0.1 \sim 0.45 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,湿地系统对地表水中的 NH_4^+-N 有很好的去除效果,去除率基本都在50%以上,最高可达到80%左右。进水 NH_4^+-N 浓度的变化对其去除效果有影响,温度对 NH_4^+-N 去除效果影响不大。

平均水力负荷率为 $0.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 时,人工湿地系统的进水 NH_4^+-N 和出水 NH_4^+-N 所配合的回归方程为 $y = a + bx$,其中 x 表示进水 NH_4^+-N 浓度(mg/L), y 表示出水 NH_4^+-N 浓度(mg/L),并分别求得在高温季节(6月~10月), $a = -0.02044$, $b = 0.4405$, $R = 0.9978$;低温季节(11月~次年3月) $a = 0.03848$, $b = 0.2375$, $R = 0.9782$,显著性检验表明上述回归关系均非常显著($\alpha < 0.01$)。

2.3 人工湿地对 TN 和 TP 的去除效能及特征

图3是2002年9月和2003年3月人工湿地对TN和TP的去除情况。从图3A、B可以看出,系统对TN的去除率在60%~20%之间。在进水TN浓度有较大变化的情况下,出水TN浓度相对比较稳定。图3C、D是人工湿地系统对TP的去除情况,可以看出系统对TP的去除率在30%~45%之间波动。进水TP浓度变化不大,出水TP浓度及去除率比较稳定。

分析图3可以发现,TN、TP的去除均受温度和

进水浓度的影响,在温度相对较高的9月,去除率要明显高于温度相对较低的3月,这是因为人工湿地是一种自然生物处理系统,其对污染物的去除必须要受到温度以及热量的影响。同时,在冬季,枯死的植物根系中的部分N、P会在水的滤取作用和有机质的矿化作用下重新释放到水体中^[18],这在一定程度上也会导致去除率的下降。进水TN浓度较大时,去除率相对也较高;不过TP的情况则与之相反,在进水TP浓度增大时,去除率却呈下降的趋势。

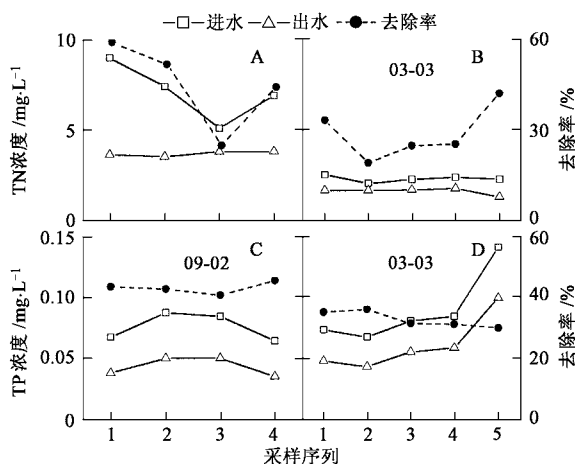


图3 人工湿地对 TN 和 TP 的去除效果

Fig. 3 The removal effect on TN and TP in CWs

出现上述现象的原因是N、P在人工湿地中不同的去除机理。湿地中N的去除主要通过微生物的硝化、反硝化作用和植物的吸收、氨氮的挥发作用、基质的吸附等作用来实现的,一般认为微生物的硝化和反硝化作用是湿地除氮的最重要过程^[19,20],因此,大量的硝化菌和反硝化菌的存在,以及良好的土壤条件就可以促进N在湿地中的去除。而P在湿地中的去除与基质的性质有着密切关系^[21],通常认为P在基质中的吸附、置换、沉淀等作用作用是P去除的主要机理^[14],这些去除作用都有一个饱和度,当进水中P的含量较高时,受饱和度的限制,过量的P将不会因为吸附、置换、沉淀等作用而从水体中去除,所以在一定的水力负荷条件下,随着进水浓度的增大,TP的去除率会有所下降。

2.4 温度和水力负荷对人工湿地中污染物去除率的影响

图4A、B、C分别给出了在低($< 5^\circ\text{C}$)、中($12 \sim 18^\circ\text{C}$)和高($21 \sim 27^\circ\text{C}$)3个不同温度及不同水力负荷率条件下,潜流湿地系统对地表水中 COD_{Mn} 的去

除率.可以看出,在 3 个温度区间内,随着水力负荷的增加,人工湿地系统对 COD_{Mn} 的去除率都呈降低趋势,同时随着温度的降低, COD_{Mn} 的去除率也呈明显降低的趋势.从图 5A 也可看出,在水力负荷不变的条件下,随着水温的降低,人工湿地系统对 COD_{Mn} 的去除率呈下降趋势.水力负荷率在 $0.1 \sim 0.45 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 情况下,在高温区, COD_{Mn} 的去除率在 40 % 左右,在中温区和低温区,去除率则减小到 15 % ~ 25 % 和 10 % ~ 15 %.

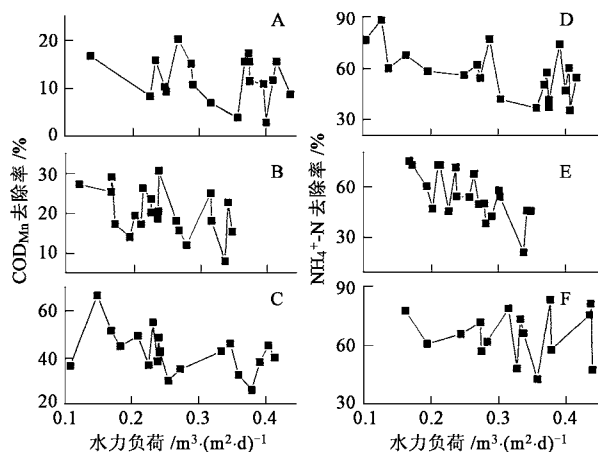


图 4 不同温度下水力负荷对污染物去除率的影响

Fig. 4 The impacts of the hydraulic loading rate on contamination removal under different temperature

本试验中,进水有机物浓度较低,且主要是可溶性有机物,该类有机物在湿地中的去除主要是通过生物膜的吸附、吸收以及微生物的代谢降低作用来完成.在湿地中,有机物的去除率随着温度的降低而下降,一方面是因为随着温度的降低,微生物的活性显著降低,代谢作用减弱,有机物的消耗量减少;另一方面,由于植物在冬季已经枯死,部分腐烂的植物根系会向水体释放一些有机物,从而导致出水中有机物浓度增大,去除率下降.

图 4D、E、F 给出了低($< 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$)、中($12 \sim 18 \text{ }^{\circ}\text{C}$)和高($21 \sim 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 3 个不同温度条件下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率受水力负荷的影响.可以看出,在较高温度条件下(图 4F),人工湿地系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率基本不受水力负荷变化的影响,去除率在 70 % 左右,综合分析图 4F 和图 5B,在较高温度条件下,人工湿地系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除作用受水力负荷的影响要远远小于受水温的影响.然而,在中、低温条件下,随着水力负荷的增加,系统对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率呈下降趋势,说明在中低温条件下,水力负荷则成为人工湿地

去除 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的主要影响因素.

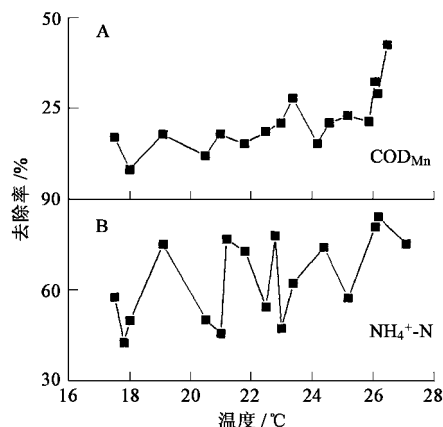


图 5 温度对污染物去除率的影响

Fig. 5 The impact of temperature on contamination removal

2.5 潜流湿地系统运行管理措施

(1) 适时地收割湿地植物 在秋冬季节,腐烂的湿地植物中的大部分营养物质会逐渐通过水的滤取作用和有机物的矿化作用重新释放到水体中,所以适时收割植物的地上部分,对于改善系统在冬季的出水水质很重要.湿地植物的收割时间应该在其完全枯干以前,这样的收割有利于提高湿地去除营养物质的能力.

(2) 控制湿地水位 适当地调节和控制湿地中的水深.如果潜流湿地系统在高水位和低水位交替运行,那么污染物,尤其是营养物质的去除效率就会有明显地提高.在冬季低温条件下,湿地表层会形成一个冰层,通过调节出水管的位置,使系统在较低的水位运行,减少温度变化对处理湿地系统的影响.

(3) 出水管及出水井的防冻 冬季系统在冰层的覆盖下运行,但是出水管所在的出水井需要一定的保温处理,以确保整个水流系统的畅通和系统的正常运行.本试验中,出水井上方设有可以移动的保温盖,使出水管免受寒风的影响,经出水管进入出水井的水,在自身重力的作用下迅速排出,上述措施保证了系统在近 4 个月的结冰期(最低气温达 $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$) 正常运行.

3 结论

潜流人工湿地系统对地表水有较好的处理效果.在水力负荷为 $0.1 \sim 0.45 \text{ m}^3/\text{d}$ 条件下,对有机物和营养物质有较高的去除率,尤其是在冬季寒冷的条件下,对 COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 仍然有相对高的去除

率. COD_{Mn} 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的出水浓度与进水浓度的回归关系遵从线性关系; 系统对 TN 、 TP 的去除率分别为 25 % ~ 60 % 和 30 % ~ 45 %; 污染物的去除率随温度的降低而降低, 随水力负荷率的增加而降低; COD_{Mn} 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率与其进水浓度呈正相关, 而 TP 去除率与其进水浓度呈负相关。为保证较高的净化效率需要适时收割植物和适时调整水位。

参考文献:

- [1] Cooper P, Smith M, Maynard H. The design and performance of a nitrifying vertical-flow reed bed treatment system[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 215 ~ 221.
- [2] Schreijer M, Xamph R, Toet S, *et al.* The use of constructed wetlands to upgrade treated sewage effluents before discharge to natural surface water in Texel island, The Netherlands: pilot study[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 231 ~ 237.
- [3] Coleman J, Hench K, Garbutt K, *et al.* Treatment of domestic wastewater by three plant species in constructed wetlands[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2001, **128**: 283 ~ 295.
- [4] Winthrop C A, Paul B H, Joel A B, *et al.* Temperature and Wetland Plant Species Effects on Wastewater Treatment and Root Zone Oxidation[J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**: 1010 ~ 1016.
- [5] Li S R, Ding T, Wang S. Reed bed treatment for municipal and industrial wastewater in Beijing, China[J]. J. Chart. Inst. Water Environ. Manag., 1995, **9**: 581 ~ 588.
- [6] Jonathan K R and Sarah K L. Flow pattern analysis of constructed wetlands treating landfill leachate[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **40**(3): 271 ~ 278.
- [7] Rivera R, Warren A, Curds C R, *et al.* The application of the root zone method for the treatment and reuse of high-strength abattoir waste in Mexico[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 271 ~ 278.
- [8] Kern J and Idler C. Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems[J]. Ecological Engineering., 1999, **12**: 13 ~ 25.
- [9] Ji G D, Sun T H, Zhou Q X, *et al.* Constructed subsurface flow wetland for treating heavy oil-produced water of the Liaohe Oilfield in China[J]. Ecological Engineering, 2002, **18**: 459 ~ 465.
- [10] Anne L S, Cynthia A M. Design and hydraulic performance of a constructed wetland treating oil refinery wastewater[J]. Wat. Sci. Tech., 1999, **40**(3): 301 ~ 307.
- [11] Scholes L, Shutes R B E, Revitt D M, *et al.* The treatment of metals in urban runoff by constructed wetlands[J]. The Science of the Total Environment, 1998, **214**: 211 ~ 219.
- [12] D' Angelo E M, Reddy K R. Diagenesis of organic matter in a wetland receiving hypereutrophic lake water: Role of inorganic electron acceptors in nutrient release[J]. Environ. Qual., 1994b, **23**: 937 ~ 943.
- [13] 代明利, 欧阳威, 刘培斌, 等. 垂流人工湿地处理官厅水库入库河水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2003, **12**(3): 4 ~ 7.
- [14] Verhoeven J T A, Meuleman A F M. Wetland for wastewater treatment: opportunities and limitations[J]. Ecological Engineering, 1999, **12**: 5 ~ 12.
- [15] Geller G. Horizontal subsurface flow systems in the German speaking countries: summary of long-term scientific and practical experiences: recommendations[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 157 ~ 166.
- [16] Vymazal J. The use of sub-surface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, **18**: 633 ~ 646.
- [17] Yang Y, Xu Z C, Hu K P, *et al.* Removal efficiency of the constructed wetland wastewater treatment system at Bainikeng, Shenzhen[J]. Wat. Sci. Tech., 1995, **32**(3): 31 ~ 40.
- [18] Brix H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands[J]. Wat. Sci. Tech., 1997, **35**(5): 11 ~ 17.
- [19] 吴晓磊. 人工湿地废水处理机理[J]. 环境科学, 1991, **12**(2): 38 ~ 42.
- [20] 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.
- [21] Haberl R, Perfler R, Mayer H. Constructed wetlands in Europe[J]. Wat. Sci. Tech., 1995, **32**(3): 305 ~ 315.