

复合型人工湿地及其在小城镇污水处理中的应用

何强, 万杰, 翟俊, 梁建军

(重庆大学三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

摘要:针对中国小城镇的水污染特点, 开发了1种复合型人工湿地污水处理技术, 该工艺由处于厌氧环境的竖向折流湿地滤池和处于兼氧环境的侧向潜流湿地床组成, 通过设置内回流系统、自然复氧区以及粒径为 $\phi 8\sim 30$ mm的碎石填料, 实现了系统内容解氧的合理分区, 并优化了污水流态, 显著提高了处理效率。低温和常温条件下的运行结果表明: 该工艺在进水流量 $300\sim 450$ m³/d, COD、NH₄⁺-N及TP分别为 $60\sim 250$ mg/L、 $4.5\sim 23$ mg/L、 $1.5\sim 8$ mg/L条件下, 低温出水中COD、NH₄⁺-N及TP的浓度分别为 $20\sim 30$ mg/L、 $2\sim 4$ mg/L、 $0.3\sim 0.5$ mg/L, 常温出水中的浓度分别在 30 mg/L、 4 mg/L、 0.43 mg/L以下。

关键词:污水处理; 竖向折流湿地; 侧向潜流湿地; 小城镇

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)05-0122-05

The Compound Artificial Wetland and Its Application in Treating Wastewater in Small Cities and Towns

HE Qiang, WAN Jie, ZHAI Jun, LIANG Jian-jun

(Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: A technology of wastewater treatment-compound artificial wetland was developed in connection with the characteristics of water pollution in small cities and towns in China. That compound system was composed of vertical baffled wetland filter under anaerobic conditions and lateral subsurface flow wetland bed under facultative conditions. By setting up the inner back-flow system, the nature reoxygenation area and the gravel filler with a particle size of $8\sim 30$ mm, the dissolved oxygen(DO) division in the system was achieved with the optimization of the flow pattern and the increase of treatment efficiency. The application results indicated that, under the conditions that the water flow rate was $300\sim 450$ m³/d, COD, NH₄⁺-N and TP concentration of the influent were $60\sim 250$ mg/L, $4.5\sim 23$ mg/L and $1.5\sim 8$ mg/L respectively. And these values of the effluent were $20\sim 30$ mg/L, $2\sim 4$ mg/L and $0.3\sim 0.5$ mg/L respectively at low temperature and could fall below 30 mg/L, 4 mg/L and 0.43 mg/L at normal temperature.

Key words: wastewater treatment; vertical baffled wetland; lateral subsurface flow wetland; small city

中国小城镇污水处理普遍存在水量、水质随季节变化和昼夜变化大, 维护管理技术人员及运行管理经验缺乏等问题。传统污水处理工艺对小城镇而言, 技术要求高、操作复杂, 与其经济发展水平及管

理水平不相适应。人工湿地与普通机械化的污水处理技术相比在运行成本、运行管理和景观效果等方面具有较明显的优势, 但也存在占地面积大, 易堵塞板结, 受季节气候影响大等不足^[1-2]。正是因为这些

收稿日期: 2009-04-16

基金项目: 中荷国际合作项目(2003-MOC-NGGP-03); 欧盟第六框架计划项目(SWITCH018530)

作者简介: 何强(1965-), 男, 教授, 博导, 主要从事水污染控制研究, (E-mail) hq0980@126.com。

不足影响了人工湿地的广泛应用。该研究开发的复合型人工湿地:折流湿地滤池+侧向潜流湿地床污水处理系统(发明专利号:ZL200510057047.2),通过设计全新的处于厌氧环境的竖向折流湿地滤池和处于兼(好)氧环境的侧向潜流湿地床组合,设置内回流系统(高浓度进水时选用)、自然复氧区和不同级配碎石填料,在沉淀塘为预处理单元的辅助下,达到系统内溶解氧合理分区,打破了传统人工湿地系统氧传递能力的局限;优化了污水流态,提高了池容利用率,显著提高了人工湿地的污水处理效率,同时降低了占地面积,减少堵塞,并避免了复杂的布水装置,降低工程造价。目前该技术已被中国住房和城乡建设部列为西部小城镇污水处理的“经济适用”技术。

1 复合型人工湿地工艺

该复合型人工湿地主要由竖向折流湿地滤池和侧向潜流湿地床组成,其典型工艺流程如图 1 所示:

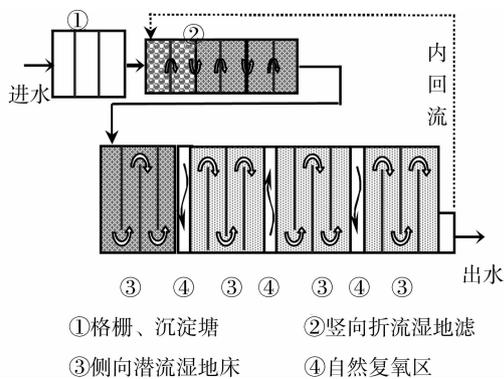


图 1 典型工艺流程示意图

1.1 竖向折流湿地

竖向折流湿地由多级(一般为 5~6 级)垂直流湿地组成,湿地底部用混凝土密封,并在每一湿地内设置有竖向的挡流墙,底部留过水通道。污水以上下折流的方式在湿地中推流穿行,既提高了污水负荷率,又避免了复杂的布水装置。湿地的填料表面会逐步形成厌氧生物膜,污水在厌氧微生物的作用下,发生水解反应,为后续处于好(兼)氧状态的侧向潜流湿地床进一步处理提供条件。湿地中装填 0.8~1.2 m 深的碎石填料,并在表面栽种挺水植物。填料粒径范围为 8~30 mm,逐级缩小布置。第 1 级湿地是整个湿地系统最容易发生堵塞的区域,采用粒径为 20~30 mm 的卵石,其表面不栽种植物,下设放空管,利于清洗。通过污水厂实际运行数据分析来看,竖向折流湿地通过填料过滤、微生物分解和植物吸收等作用,可以去除 30%左右的 COD,

15%左右的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 20%左右的 TP, 与其它类似研究相仿^[3-6]。竖向折流湿地的结构示意图如图 2 所示:

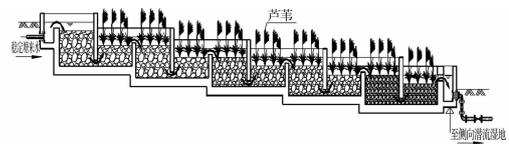


图 2 折流湿地剖面图

1.2 侧向潜流湿地

侧向潜流湿地床由多级梯度向下的侧向潜流湿地床和自然复氧区组成;每一侧向潜流湿地床内设置平行交错的分隔板,将床内空间分隔成 S 形的水流沟道(每个水流沟道均设置有一定的坡度),在沟道中装填碎石或陶粒填料,并栽种水生植物,可以基本消除湿地中的死水区,提高池容利用率;上一级湿地床与下一级湿地床之间由自然复氧区相连。自然复氧区为一水平的薄水层复氧沟,水流在沟中形成厚度为 3~10 mm 的紊动薄水层,以加大水流与空气的接触面积,加速空气中氧向污水的传质作用,打破了传统潜流湿地系统氧传递能力的局限。当自然复氧区沟长为 5~8 m,可将污水中溶解氧浓度从 0 mg/L 提高到 3 mg/L 左右。图 3 为不同长度自然复氧区出水端的溶解氧浓度的实际测量值。

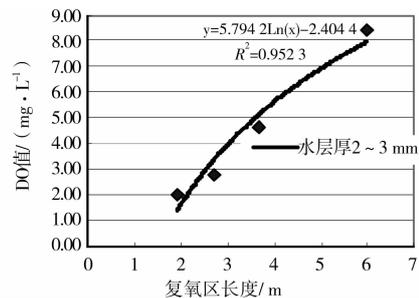


图 3 溶解氧随自然复氧区长度变化

由于侧向潜流湿地填料深度的设置较浅(0.2~0.5 m),整个填料区均在植物根系的范围内,植物供氧较足,因此在相隔一定距离设置自然复氧区后,溶解氧能保证在 0.5~1.5 mg/L 的范围内,基本处于好氧和缺氧状态,可以有效提高填料表面和根区的微生物量,大大提高生物作用效率。由污水厂实际运行数据分析可知,侧向潜流湿地床通过填料的过滤和吸附、微生物降解和植物吸收等作用,可以去除 40%左右的 COD, 35%左右的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, 35%左右的 TP, 与其它类似研究相仿^[7-12]。侧向潜流湿地的结构示意图如图 4 所示:

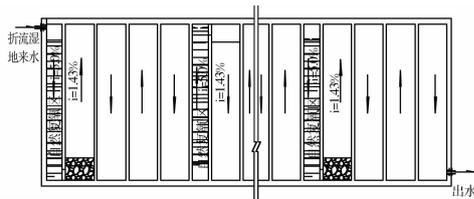


图 4 侧向潜流湿地平面图

2 设计方法与参数

折流湿地滤池按最高日平均时流量进行设计,并采用钢筋混凝土结构。该湿地滤池一般设为多组,每组分为 2 列。折流湿地滤池的底部设有放空管,在湿地出现堵塞后,可以放空其中一组进行闲置(一般闲置期为 10~15 d),经闲置后的人工湿地重新进水运行。

侧向潜流湿地床按最高日平均时流量进行设计,为素土夯实结构加防渗膜^[13]。设置为多组,并设内回流系统,在进水污染物浓度较高或冬季气温较低时,可以启动湿地内回流系统,将部分侧向潜流湿地的出水回流至折流湿地前,与原污水一起进入折流湿地,其回流比一般按 100%~200% 进行设计。另外,自然复氧区为一水平的薄水层复氧沟,表面可以人为设置一些小锯齿,以增加水流与空气的接触机会。

2 种湿地的主要设计参数、植物选种及进水方式如表 1 所示:

表 1 主要设计参数、植物选种及进水方式

项目	折流湿地	侧向潜流湿地
水力负荷/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)	1.5~3	0.5~1.0
HRT/h	8~15	15~30
有机负荷 $\text{kgBOD}/(10^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	750~850	200~250
设计水深/m	1.0~1.4	0.3~0.5
水头损失/m	0.3/格	0.07/沟道
栽种植物	风车草	美人蕉/风车草
进水方式	连续进水	连续进水

经试验研究表明,2 种湿地面积的确定均可以通过水力负荷进行计算,然后采用有机负荷校核确定。公式为:

$$A = Q/q \quad (1)$$

$$N = Q(C_0 - C_c)/A \quad (2)$$

其中: A 为湿地面积, m^2 ; Q 为设计流量, m^3/d ; q 为水力负荷, $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$; C_0 为进水浓度, g/l ; C_c

为出水浓度, g/l ; N 为有机负荷, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$

3 应用效果

目前,该复合型人工湿地技术已经在四川省凉山州泸沽湖景区母支污水厂、重庆白市驿花卉园区贝迪颐园-巴驿轩污水厂、重庆市长寿区云台镇污水厂和重庆市武隆县仙女山新区污水厂等项目中得已成功的应用^[14-15],其主要经济指标如表 2 所示:

表 2 工程主要技术经济指标

项目	数值
占地指标/($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	2~4
单位投资/(万元 $\cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.15~0.25
单位运行成本/(元 $\cdot \text{m}^{-3}$)	0.08~0.15
人员定额/人	1~2

以四川省凉山州泸沽湖风景区母支污水厂在 2007 年冬季时的运行数据及重庆白市驿花卉园区贝迪颐园-巴驿轩污水处理厂在 2008 年春季常温下的运行数据为例,介绍该人工湿地系统的实施效果。

3.1 四川省凉山州泸沽湖风景区母支污水厂

该污水厂建设规模为 $2000 \text{ m}^3/\text{d}$,地处四川省凉山彝族自治州盐源县泸沽湖镇,最低海拔 2 668 m,最高海拔 3 300 m,平均海拔 2 944 m。当地气候属于高原区大陆性暖温带气候,年平均气温 $10.7 \text{ }^\circ\text{C}$,12 月平均气温为 $3.7 \text{ }^\circ\text{C}$,7 月平均气温为 $15.9 \text{ }^\circ\text{C}$ 。昼夜温差大,冬季夜间温度可能低至 $-8 \text{ }^\circ\text{C}$,而白天气温则可达 $10 \text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

在冬季低温时,泸沽湖处于旅游淡季,水量较小,仅 $300 \sim 400 \text{ m}^3/\text{d}$ 左右,启动 2 组湿地(整个厂区共有 7 组湿地),总水力停留时间约 24 h,水力负荷为 $0.49 (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d})$,实际占地指标为 $2 \text{ m}^2/\text{m}^3/\text{d}$ 。实际运行数据分析如图 5—图 7 所示:

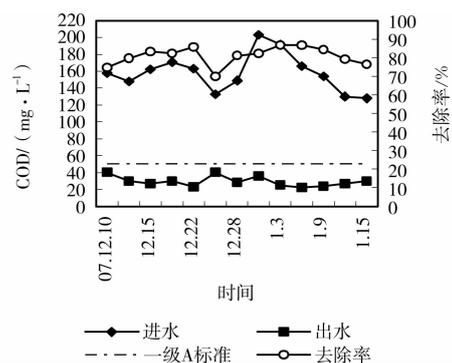


图 5 低温下 COD 去除效果

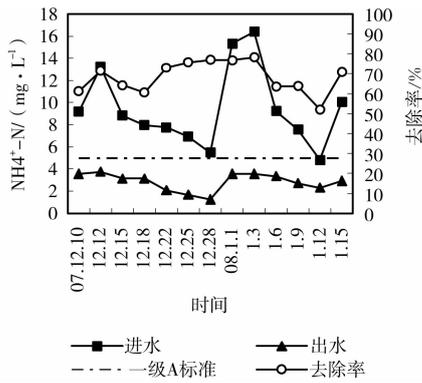


图 6 低温下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果

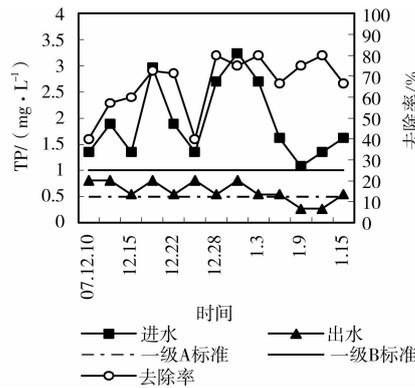


图 7 低温下 TP 去除效果

冬季低温时,处理出水水质稳定,受进水水质影响小。出水 COD 变化范围基本在 20~30 mg/L 之间,最高浓度 40 mg/L,全程 COD 处理率在 70%以上,最高达到 87%;出水氨氮变化范围基本在 2~4 mg/L 之间,最高浓度 3.57 mg/L,全程氨氮处理率波动较大,在 50%~80%之间。总磷进水浓度波动较大,出水浓度基本维持稳定,平均去除率在 74%以上,低温条件下,开启回流泵,回流比 100%,延长水力停留时间至 40 h,出水总磷可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。

3.2 重庆白市驿花卉园区贝迪颐园—巴驿轩污水处理厂

该污水厂近期建设规模为 500 m³/d,远期为 1 000 m³/d。位于重庆主城区,年平均气候在 18℃左右,冬季最低气温平均在 6~8℃,夏季较热,7、8月日最高气温均在 35℃以上,极端气温最高 41.9℃。该污水厂主要对园区内的生活污水进行深度处理后,回用于园区灌溉、绿化和道路冲洗,实现了园区生活污水零排放或循环利用目标,对保护当地环境和促进循环经济发展具有重要意义。

在春季常温时,该园区用水量比较均匀,约 400~450 m³/d,总水力停留时间约 34 h,水力负荷 0.27 (m³/m²·d),占地指标为 3.6 m²/m³/d。实际运行数据如图 8—图 10 所示:

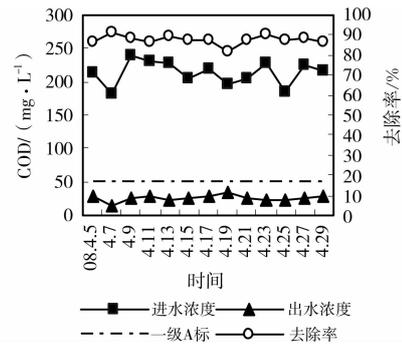


图 8 常温下 COD 去除效果

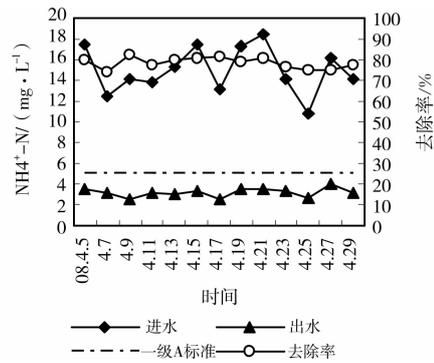


图 9 常温下 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果

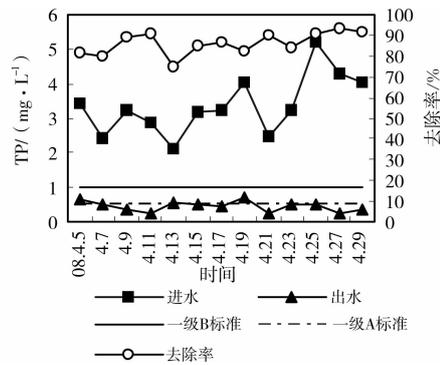


图 10 常温下 TP 去除效果

春季常温时,进水污染物浓度变化范围不是很大,这是因为花卉园区的污水主要来源于农业展览中心、贝迪颐园的生活污水,污水来源较为单一。出水 COD 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度维持稳定。运行至后期,COD 处理出水保持在 30 mg/L 以下,全程有机物处理率基本控制在 85%以上,最高达到 91.7%。运行稳定后,全程氨氮的去除率在 70%以上,平均在 76%左右。另外,进水总磷浓度平均在 3.27 mg/L 左右,最高值达 5.21 mg/L,去除率在 80%~92%之间。当进水总磷浓度高于 5 mg/L,水力停留时间 34 h 的条件下,出水 TP 浓度可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准。若开启回流泵,回流比 100%,并延长水力停留时间,此时 TP 浓度可达一级 A 标准。而且随着植物的生长,对 TP 的去除效果有明显提高。在植物

生长较为茂盛后,进水中总磷的含量虽有所回升,但出水的总磷浓度基本维持稳定,不超过 0.43 mg/L。

4 结 论

1) 竖向折流湿地滤池与设置复氧区的潜流湿地床相组合,在人工湿地系统内形成了厌氧、好氧交替的微生物环境,提高了填料及根区内的微生物量,促进了不同净化功能微生物的组合,强化了传统人工湿地的微生物净化作用。运行结果表明:在进水量为 300~450 m³/d,进水浓度 COD、NH₄⁺-N 及 TP 分别为 60~250 mg/L、4.5~23 mg/L、1.5~8 mg/L 的情况下,低温出水中 COD、NH₄⁺-N 及 TP 的浓度分别在 20~30 mg/L、2~4 mg/L、0.3~0.5 mg/L 之间,常温出水中 COD、NH₄⁺-N 及 TP 的浓度分别低于 30 mg/L、4 mg/L、0.43 mg/L。满足国家《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。

2) 通过在竖向折流湿地滤池设置导流墙和在侧向潜流湿地床设置“S”形沟道,增加了污水在湿地中的流行距离和池容利用率,并最大程度地消除了传统潜流湿地系统普遍存在的死水区。另外,内回流系统的设置,保证了高浓度进水时的出水水质。

参考文献:

- [1] 于少鹏,王海霞,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.
WANG SHAO-PENG, WANG HAI-XIA, 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.
- [2] 吴树彪,董仁杰. 人工湿地污水处理应用与研究进展[J]. 水处理技术,2008,34(8):5-8
WU SHU-BIAO, DONG REN-JIE. The application and research progress of constructed wetland for wastewater treatment [J]. Technology of Water Treatment, 2008,34(8):5-8.
- [3] 叶剑锋,徐祖信,李怀正. 垂直潜流人工湿地中有机物去除动态规律研究[J]. 环境科学,2008,29(8): 2166-2171.
YE JIAN-FENG, XU ZU-XIN, LI HUAI-ZHENG. Dynamic rule of organic matter removal in vertical-flow constructed wetland[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2166-2171.
- [4] 鄢璐,王世和,雒维国,等. 运行条件下潜流型人工湿地溶氧状态研究[J]. 环境科学,2006, 27(10): 2009-2013.
YANG LU, WANG SHI-HE, LUO WEI-GUO, et al. Study on the oxygen condition in subsurface flow wetlands in operation [J]. Environmental Science, 2006,27(10): 2009-2013.
- [5] JEREMY F, DORIN B, KELLY A R, et al. Nitrogen removal from domestic wastewater using the marshland upwelling system[J]. Ecological Engineering, 2006, 27 (1): 22-36.
- [6] VARIGA S, CHONGRAK P. Nitrogen mass balance and microbial analysis of constructed wetlands treating municipal landfill leachate[J]. Bioresource Technology, 2007, 98(3): 565-570.
- [7] CHRISTINA V, REIMO A, KASPAR N, et al. Dynamics of phosphorus, nitrogen and carbon removal in a horizontal subsurface flow constructed wetland[J]. Science of the Total Environment, 2007,380: 66-74.
- [8] JOSEPH K, FRANK K, GUNNEL D. Nitrogen and phosphorus removal in substrate-free pilot constructed wetlands with horizontal surface flow in uganda[J]. Water, Air & Soil Pollution,2005,7(1-4):37-59.
- [9] 汤显强,黄岁樑. 人工湿地去污机理及其国内外应用现状[J]. 水处理技术,2007,33(2): 9-13.
TANG XIAN-QIANG, HUANG SUI-LIANG. Mechanisms of pollutant removal in constructed wetlands and their applications both at home and abroad [J]. Technology of Water Treatment, 2007,33(2): 9-13.
- [10] 何连生,刘鸿亮,席北斗,等. 人工湿地氮转化与氧关系研究[J]. 环境科学,2006, 27 (6) :1083-1087.
HE LIAN-SHENG, LIU HONG-LIANG, XI BEI-DOU, et al. Relationship between the nitrogen removal and oxygen demand in constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2006,27 (6) :1083-1087.
- [11] Jing Shuh Ren, Lin Ying Feng. Seasonal effect on ammonia nitrogen removal by constructed wetlands treating polluted river water in southern Taiwan[J]. Environmental Pollution, 2004,127:291-301.
- [12] AWMAYO, JMUTAMBA. Effect of HRT on nitrogen removal in a coupled HRP and unplanted surface flow gravel bed constructed wetland [J]. Physics and Chemistry of the Earth,2004,29(15): 1253-1257.
- [13] 李雄勇,张帆,袁英兰,等. 对人工湿地污水处理系统设计技术关键的探讨[J]. 环境保护科学,2009,35 (1): 42-44.
LI XIONG-YONG, ZHANG FAN, YUAN YINGLAN, et al. Discussion on technical keys in designing artificial wetlands wastewater treatment[J]. Environmental Protection Science, 2009,35(1): 42-44.
- [14] 何强,李进丰,翟俊. 新型复合式人工湿地处理农业园区污水的工艺设计[J]. 中国给水排水,2009,25(8): 52-54.
HE QIANG, LI JIN-FENG, ZHAI JUN. New-type compound constructed wetland for treatment of agricultural park wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2009,25(8): 52-54.
- [15] 翟俊,何强,肖海文. 凉山州泸沽湖镇污水处理厂工程设计[J]. 中国给水排水,2006,22(2) : 39 -42.
ZHAI JUN, HE QIANG, XIAO HAI-WEN. Design for lugu lake wastewater treatment plant project in Liangshan prefecture[J]. China Water & Wastewater, 2006,22(2):39 -42.

(编辑 胡 玲)