

人工快速渗滤法处理干旱区小城镇污水的试验研究

陈永杏, 尚 斌, 董红敏*, 陶秀萍, 黄宏坤

(中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所 农业部畜牧环境设施设备质量监督检验测试中心(北京) 农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081)

摘 要:人工快速渗滤法作为一种处理效率较高、处理成本较低、运行维护技术要求低的分散式污水处理技术, 比较符合小城镇污水处理需求。针对西北干旱区小城镇水环境污染日益严重, 利用模拟系统研究了不同填料比和不同湿干比对人工快速渗滤系统处理小城镇污水时 COD、总磷、凯氏氮和铵氮去除效果的影响。结果表明, 土砂比 2:1 的系统污染物去除效果优于其他填料比, 对 COD、总磷、凯氏氮和铵氮的去除率分别为 35.05%~65.07%、53.27%~70.38%、10.42%~49.65% 和 11.61%~50.27%。COD、凯氏氮和铵氮的去除率在湿干比 1:1 时最高, 分别为 27.86%~65.07%、49.65%~53.18% 和 50.27%~57.14%。在湿干比 1:5 时, 总磷的最高去除率为 45.37%~69.15%。

关键词:人工快速渗滤法; 土砂比; 湿干比; 去除率

中图分类号:X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)11-2341-05

Experimental Study on Artificial Fast Infiltration Processing Sewage Water from Small Towns in Arid Area

CHEN Yong-xing, SHANG Bin, DONG Hong-min*, TAO Xiu-ping, HUANG Hong-kun

(Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture Chinese Academy of Agricultural Sciences, Key Lab. for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

Abstract: Water pollution is becoming more and more serious in small towns in Northwest Regions recently. Constructed rapid infiltration, with characteristics of high treating efficiency, low costs and low technical requirements for operation and maintenance, is an attractive decentralized wastewater treatment technology. Artificial sand columns were employed to study the effects of soil/sand ratio and wet/dry ratio on the removal rates of COD, total phosphorus, Kjeldahl nitrogen and ammonium nitrogen. Results showed that the pollutant removal effects of the systems with soil/sand ratio of 2:1 were better than the others, of which COD, total phosphorus, Kjeldahl nitrogen and ammonium nitrogen removal rates were 35.05%~65.07%, 53.27%~70.38%, 10.42%~49.65% and 11.61%~50.27%. The highest removal rates of COD, Kjeldahl nitrogen and ammonium nitrogen were reached when wet/dry ratio was set at 1:1, which were 27.86%~65.07%, 49.65%~53.18% and 50.27%~57.14% respectively, while the maximum removal rate of total phosphorus, 45.37%~69.15%, was achieved at wet/dry ratio 1:5.

Keywords: constructed rapid infiltration; soil/sand ratio; wet/dry ratio; removal rate

近年来,我国干旱区小城镇建设进度加快,随之而来的是小城镇水资源供应问题和水环境污染问题,其严重程度不亚于大中城市^[1]。目前我国的水资源状况不容乐观,2009 年全国人均水资源占有量为 1 784.9 m³,比 2008 年减少 13.8%^[2];与此同时用水量和污水排放量却逐年增加,2009 年生活用水量比 2008 年增加 2.9%^[2],生活废水排放量达 354.8 亿 t,比

2008 年增加 7.5%^[3]。小城镇生活污水已成为水环境污染的主要原因^[1]。

由于经济发展和基础设施落后,多数小城镇无力投资建设污水处理设施,并且因为污水处理厂的投资和运行费用高,运行操作复杂,管理人员难以掌握,致使小城镇污水处理厂不能正常运行^[1]。污水处理效率较高、工程建设投资较低、运行维护费用和技术要求低的人工快速渗滤法作为一种污水分散式处理技术,为我国小城镇污水处理提供了选择^[4-5]。

人工快速渗滤法是在传统快速渗滤法(Rapid Infiltration)基础上发展起来的一种污水处理技术。该法是将污水有控制地投配到采用天然河砂、陶粒、煤研

收稿日期:2010-12-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划课题“农村生态污染源控制关键技术”(2006BAJ10B04)

作者简介:陈永杏(1979—),女,在读博士,助研,主要从事畜禽养殖业废弃物处理利用研究。E-mail:chenyx@ieda.org.cn

* 通讯作者:董红敏 E-mail:donghm@ieda.org.cn

石等与土壤混合配制成的、具有良好渗滤性能的人工构筑的渗滤介质表面,污水在向下渗滤的过程中,经吸附、过滤、硝化、反硝化等一系列的物理、化学和生物过程而得到净化的一种污水土地处理工艺。具有水力负荷高,有机污染物和氮、磷去除效果好的特点,采用淹水和落干互相交替的工作方式运行^[4,6]。

系统进水时间与落干时间之比称为湿干比,湿干比对人工快速渗滤系统运行效果有着重要的影响^[7-9]。在合适的湿干比下运行,既可以防止系统表层孔隙堵塞,有效恢复系统的渗透性能,保持稳定的处理水量,并且使系统得到充分复氧,在系统内部潜层剖面上交替形成氧化还原环境,有利于对污染物的分解^[8]。目前对该技术的应用研究主要集中在高速路收费站生活污水^[10]、受污染河水^[11]、农村生活污水^[12]等污水处理,针对小城镇生活污水的研究较少,已见文献报道的仅余建朋等^[4]采用人工快速渗滤技术对三峡库区小城镇污水处理效果的试验研究,其研究表明,系统出水水质达到 GB 18918—2002 一级 B 标准。利用该技术针对北方小城镇生活污水处理的研究未见报道,本文拟采用人工快速渗滤系统处理北方小城镇污水,以模拟柱方式进行短周期条件下不同填料比和湿干比对污水处理效果影响的试验研究,为人工快速渗滤法应用于北方小城镇污水处理提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验用模拟柱(图 1)为内径 15 cm、高 170 cm 的有机玻璃管。填料为石英砂(粒径 2~4 mm)和土壤(过 20 目筛)按比例混合,设土砂体积比 1:1、2:1、3:1 3 种比例。填料层厚度为 100 cm,模拟柱底部装填 20 cm 厚的砾石(粒径约 20 mm)垫层,垫层与填料之间用 100 目尼龙纱网隔开。出水口设于垫层上部(填料层下部)柱子侧面。填料层上部留 50 cm 高的空间,由上部进水。

模拟柱供水系统由自动液位控制系统控制,在进水期,当液位达到 25 cm 时自动切断电磁阀停止进水,当液位降至 10 cm 时自动开启电磁阀进水,填料上方水柱保持在 10~25 cm 高度。

试验在 20 ℃恒温下进行,用伴热带对模拟柱直接加热,同时用隔热材料包裹模拟柱以保温。温度控制系统由温度传感器和数字式温度控制器组成。

供试污水取自昌平污水处理中心,COD 为 $(182.32 \pm 36.68) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,总磷 $(2.76 \pm 0.78) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,凯氏

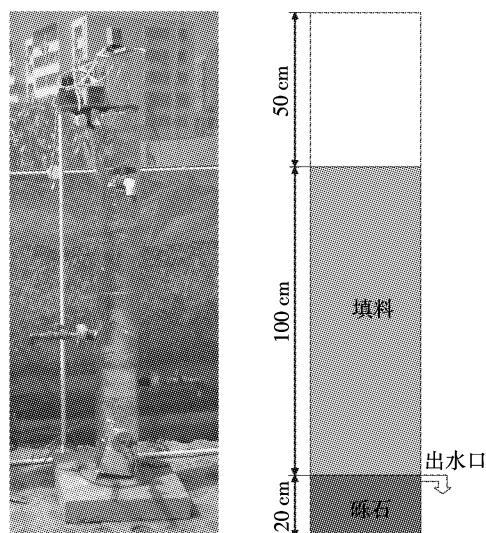


图 1 模拟土柱

Figure 1 Simulated column

氮 $(93.45 \pm 5.33) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,铵氮 $(74.49 \pm 7.04) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。试验污水贮存于地下贮存池中,进水期将贮存池中的污水抽至配水桶内(配水桶底部高于模拟柱顶部),再由配水桶分别进入各模拟柱。

1.2 试验方法

试验在短周期(进水时间为 24 h)条件下设 3 种填料比(土砂比 1:1、2:1、3:1)和 4 种常用的湿干比^[13]处理(1:1、1:2、1:3 和 1:5)进行交叉试验,每个处理 3 次重复。每种工况运行 3 个周期,运行周期分进水期和落干期两阶段,从开始进水起,每天上午 9:00 左右采集出水样品分析测试 COD、总磷、凯氏氮和铵氮,分别按国标 GB 11914—1989、GB 11893—1989、GB 11891—1989 和 GB 7478—1987 进行测定。

2 结果与讨论

2.1 对 COD 去除率的影响

不同湿干比条件下系统对 COD 的去除率见图 2,可以看出,湿干比对 COD 去除率的影响很大。COD 去除率随着湿干比的减小(落干时间加长)而降低,湿干比为 1:1、1:2、1:3 和 1:5 时,COD 去除率分别为 27.86%~65.07%、13.40%~50.17%、8.92%~47.22% 和 15.91%~35.61%。理论上讲,在一定范围内,COD 的去除率与落干时间成正相关关系^[14],但本研究中,COD 去除率却呈现出随落干时间加长而下降的趋势,可能是由于长时间落干,系统中的微生物由于营养物质缺乏生长受到抑制,代谢能力下降,从而对有机物的降解能力下降^[9]。

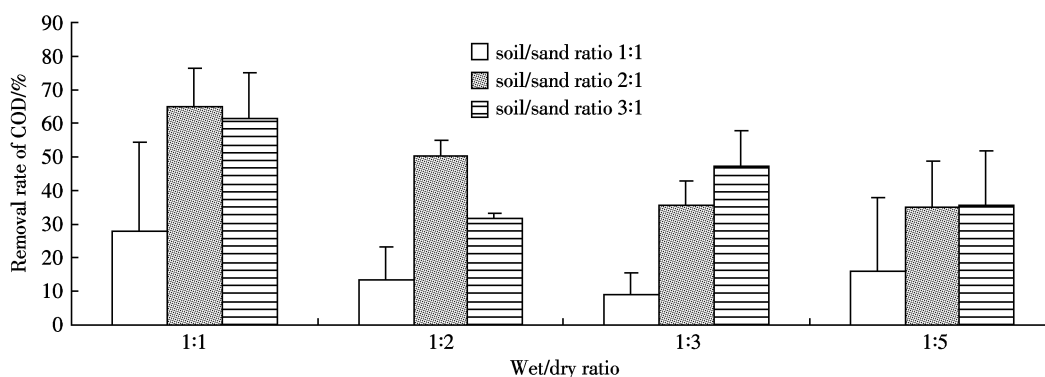


图2 不同湿干比下各模拟柱的COD去除率

Figure 2 Removal efficiency of COD under different wet/dry ratios

不同填料比的模拟柱对COD的去除率随湿干比的变化趋势也存在差异。除土砂比为2:1的柱子随着湿干比降低COD去除率逐渐降低外,其余两种填料比的柱子对COD的去除率表现为起伏波动,规律性不明显。土砂比2:1和3:1的柱子COD去除率范围接近,分别为35.05%~65.07%和31.81%~61.49%。土砂比1:1的柱子对COD的去除效果不理想,仅为8.92%~27.86%。这可能是因为土砂比为1:1时,填料紧实度最低,污水在系统中的停留时间短,微生物对有机物的分解作用不完全,导致部分未经分解的有机物进入出水中,使COD去除率偏低。而土砂比为2:1和3:1时,污水停留时间已不是限制COD去除率提高的因素,但是此时不同的湿干比影响了系统中好氧环境的恢复程度,从而影响COD的去除效果^[9]。总体而言,土砂比为2:1的柱子对COD的去除效果较好,在湿干比1:1时取得最大去除率65.07%。

2.2 对总磷去除率的影响

图3给出了不同湿干比条件下系统对总磷的去除率,由图可见,总磷去除率呈现出随着湿干比的

减小(落干时间加长)而提高的趋势。湿干比为1:1、1:2、1:3和1:5时,总磷去除率分别为17.34%~69.76%、21.87%~70.38%、36.72%~53.27%和45.37%~69.15%。这与郭劲松等^[8]的研究结果不同,他们的研究结果表明,湿干比与除磷率无显著相关性。

不同填料比的模拟柱对总磷的去除率随湿干比的变化趋势不同。除土砂比为1:1的柱子随着湿干比降低总磷去除率逐渐提高外,其余两种填料比的柱子对总磷的去除率随湿干比的变化规律性不强,但去除率均在48%以上。土砂比2:1和3:1的柱子总磷去除率范围比较接近,分别为53.27%~70.38%和48.61%~69.34%。而土砂比1:1的柱子对总磷的去除率较低,为17.34%~45.37%。人工快速渗滤系统对磷的去除主要是靠土壤的吸附和沉淀作用以及微生物和基质酶的分解作用,总磷去除率通常为40%~60%^[15]。土砂比为1:1的系统,由于介质中砂的比例较大,其阳离子交换容量较小,因而对磷的吸附效果较差。同时由于土砂比为1:1的系统中,渗滤介质紧密度较低,水力负荷较高,导致污水在系统中的停留时间较短,故通

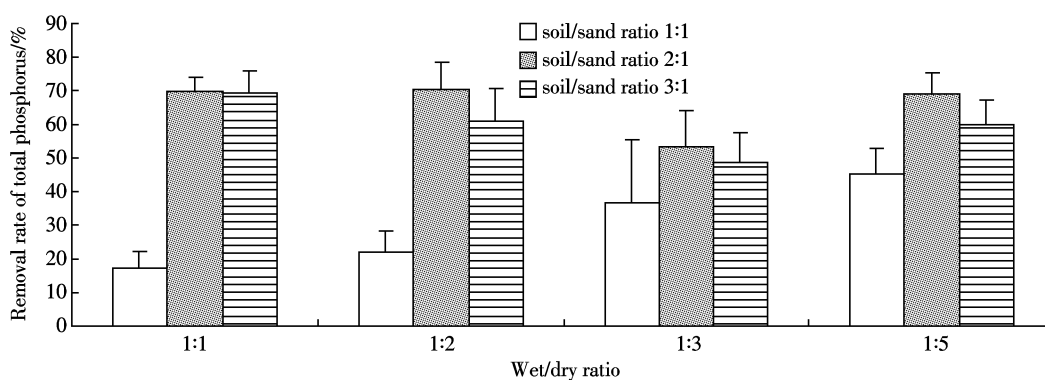


图3 不同湿干比下各模拟柱的总磷去除率

Figure 3 Removal efficiency of total phosphorus under different wet/dry ratios

过介质所含的铁、铝、钙等元素与水中磷酸根离子反应的除磷效果也较差^[15]。土砂比 1:1 的柱子对总磷的去除率随落干时间加长而提高,因为随着落干时间的加长,系统内的好氧环境得到充分恢复,生物作用对除磷的贡献也逐渐增大。

2.3 对凯氏氮和铵氮去除率的影响

由于进水凯氏氮中约 80%为铵氮,系统对凯氏氮和铵氮的去除规律相似。系统对凯氏氮和铵氮的去除率见图 4 和图 5。由图可见,湿干比为 1:1 和 1:2 时,系统对凯氏氮和铵氮的去除率略高,凯氏氮去除率为 49.65%~53.18%和 34.06%~40.09%,铵氮去除率为 50.27%~57.14%和 37.10%~42.30%。而当湿干比降低到 1:3 和 1:5 时,凯氏氮和铵氮的去除率大幅度降低,凯氏氮的去除率为 1.09%~10.92%和 10.42%~42.42%,铵氮的去除率为 0~11.61%和 14.78%~30.36%。

不同填料比的模拟柱对凯氏氮和铵氮的去除率随湿干比的变化规律不同。3 种土砂比的系统对凯氏氮和铵氮的最高去除率接近,均为 50%左右。土砂比 1:1 和 3:1 的系统对凯氏氮和铵氮的最低去除率均低于 5%,土砂比为 2:1 的系统的最低去除率则在 10%

以上。土砂比 1:1 和 3:1 的柱子凯氏氮去除率范围分别为 1.09%~50.20%和 2.69%~53.18%,铵氮去除率范围为 0~51.63%和 4.28%~57.14%。土砂比 2:1 的柱子对凯氏氮和铵氮的去除率范围分别为 10.42%~49.65%和 11.61%~50.27%。

人工快速渗滤系统介质中含有大量的好氧细菌、厌氧细菌、真菌等,氮的转化是在微生物的作用下完成的^[6]。当湿干比为 1:1 和 1:2 时,由于快滤柱上部通气传氧性好,污水中的铵氮在好氧微生物的作用下完成硝化,同时由于落干时间短,在快滤柱下部具备了厌氧条件,并且反硝化细菌和硝态氮含量高,系统的反硝化过程进行顺利^[6],因而取得相对较高的铵氮去除率。由于凯氏氮中绝大部分为铵氮,此时凯氏氮的去除效果也较好。但是,由于污水的碳氮比较低,反硝化过程还是由于有机物量不足而受限^[6],使得铵氮去除率未能达到理想的高值,如余建朋等^[4]用人工快滤系统处理三峡库区小城镇污水时达到的 83%~98%的铵氮去除率。当湿干比降低到 1:3 和 1:5 时,虽然铵氮得到充分硝化转化为硝态氮,但是由于落干时间长,系统呈富氧状态,有机物的降解完全,碳源的减少

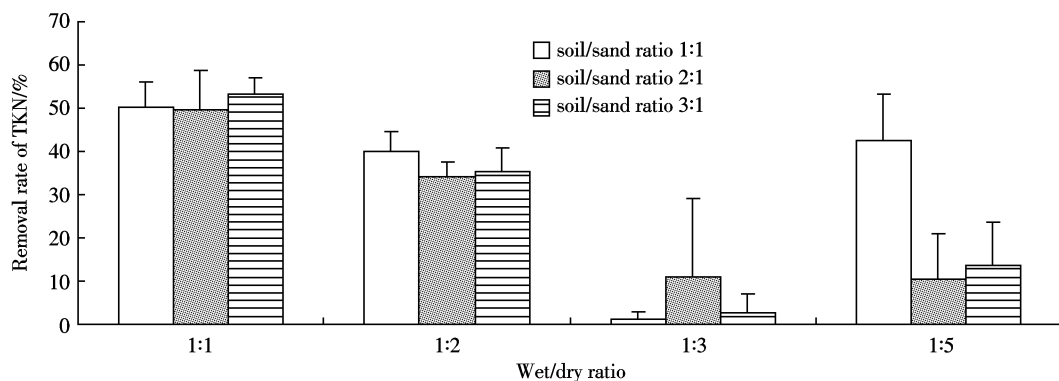


图 4 不同湿干比下各模拟柱的凯氏氮去除率

Figure 4 Removal efficiency of TKN under different wet/dry ratios

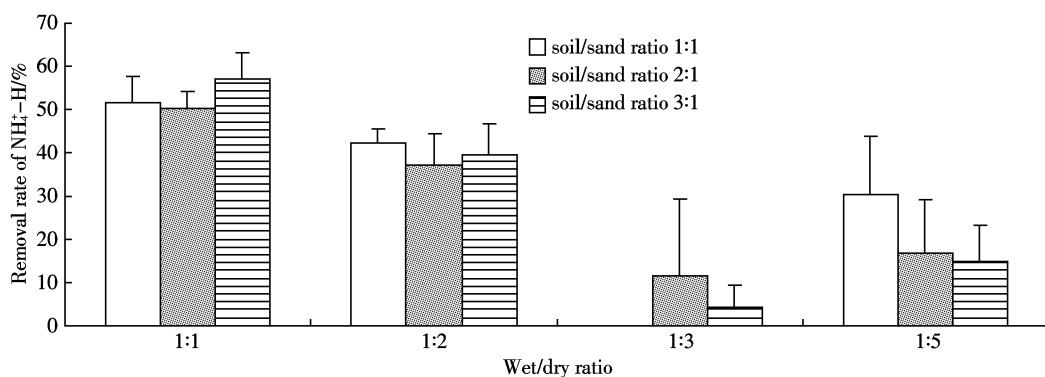


图 5 不同湿干比下各模拟柱的铵氮去除率

Figure 5 Removal efficiency of ammonium nitrogen under different wet/dry ratios

和含氧量的增加同时抑制了反硝化细菌的生长^[9],从而反硝化过程受阻。另外,由于氨化细菌的存在,并且氨化作用在好氧、厌氧和兼性厌氧的环境下均可发生,通常在好氧条件下,氨化作用更容易进行^[17],因而在小湿干比条件下,系统处于好氧状态,系统中的氨化细菌将污水中的有机氮转化为铵氮,进入出水中,导致铵氮去除率下降。

3 结论

人工快速渗滤法处理北方小城镇生活污水的污染物去除效果受系统填料比影响较大,在本研究的试验条件下,土砂比 2:1 的系统污水处理效果优于其他填料比,COD、总磷、凯氏氮和铵氮的去除率分别为 35.05%~65.07%、53.27%~70.38%、10.42%~49.65%和 11.61%~50.27%。

不同污染物在不同的湿干比下取得试验条件下的最高去除率,COD、凯氏氮和铵氮的最佳去除效果在湿干比 1:1 时获得,去除率范围分别为 27.86%~65.07%、49.65%~53.18%和 50.27%~57.14%。系统在湿干比 1:5 时取得总磷的最佳去除效果,去除率范围为 45.37%~69.15%。

参考文献:

- [1] 王中华,项学敏,周集体. 人工湿地污水处理技术及其在我国中小城镇的应用[J]. 工业水处理, 2009, 29(12): 1-4.
WANG Zhong-hua, XIANG Xue-min, ZHOU Ji-ti. Man-made wet-land wastewater treatment and its application to small/medium cities of China[J]. *Industrial Water Treatment*, 2009, 29(12): 1-4.
- [2] 中华人民共和国环境保护部. 2009 年中国环境状况公报[Z]. 2010. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environment in China 2009[Z]. 2010.
- [3] 中华人民共和国国家统计局. 中华人民共和国 2009 年国民经济和社会发展统计公报[Z]. 2010. National Bureau of Statistics of China. Statistic of Economic and Social Development in China 2009[Z]. 2010.
- [4] 余建朋,郑泽根. CRI 工艺在三峡库区小城镇污水处理厂中的应用[J]. 给水排水, 2008, 34(增刊): 69-71.
YU Jian-peng, ZHENG Ze-gen. Application of constructed rapid infiltration process in small town wastewater treatment plant in Three Gorges Reservoir Region[J]. *Water & Wastewater*, 2008, 34(Suppl): 69-71.
- [5] 齐瑶,常杪. 小城镇和农村生活污水分散处理的适用技术[J]. 中国给水排水, 2008, 24(18): 24-27.
QI Yao, CHANG Miao. Technical applicability for decentralized sewage treatment in small towns and rural areas[J]. *China Water & Wastewater*, 2008, 24(18): 24-27.
- [6] 王禄,喻志平,赵智杰. 人工快速渗滤系统氨氮去除机理[J]. 中国环境科学, 2006, 26(4): 500-504.
WANG Lu, YU Zhi-ping, ZHAO Zhi-jie. The removal mechanism of ammoniac nitrogen in constructed rapid infiltration system[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(4): 500-504.
- [7] 张永华,张金炳,殷淑华,等. 水力负荷周期对人工快渗系统污染物去除效果的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(3): 68-71.
ZHANG Yong-hua, ZHANG Jin-bing, YIN Shu-hua, et al. The influence of hydraulic loading cycle on the removal effect of constructed rapid infiltration system[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2004, 25(3): 68-71.
- [8] 郭劲松,王春燕,方芳,等. 湿干比对人工快渗系统除污性能的影响[J]. 中国给水排水, 2006, 22(17): 9-12.
GUO Jin-song, WANG Chun-yan, FANG Fang, et al. Influence of wet/dry ratio on pollutants removal performance by rapid infiltration system[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(17): 9-12.
- [9] 李英华,李海波,孙铁珩,等. 干湿交替运行对地下渗滤系统脱氮效果的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(10): 2081-2085.
LI Ying-hua, LI Hai-bo, SUN Tie-heng, et al. Effects of alternate dry-ing-wetting on nitrogen removal efficiency of subsurface infiltration system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(10): 2081-2085.
- [10] 张子云,温可,王冬波,等. 生态-人工渗滤技术在高速公路收费站生活污水中的应用[J]. 环境工程学报, 2010, 4(2): 360-364.
ZHANG Zi-yun, WEN Ke, WANG Dong-bo, et al. Application of eco-CRI filter system in highway toll-gate domestic sewage treatment[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010, 4(2): 360-364.
- [11] 张金炳,张永华,杨小毛,等. 用人工快速渗滤系统处理受污染河水的试验研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2004, 25(3): 65-67.
ZHANG Jin-bing, ZHANG Yong-hua, YANG Xiao-mao, et al. On-site experimental study on the treatment of polluted river water by constructed rapid infiltration system[J]. *Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power*, 2004, 25(3): 65-67.
- [12] 陈俊敏. 人工快速渗滤系统机理及其在农村生活污水处理中的应用研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
CHEN Jun-min. A study on the mechanism of constructed rapid infiltration system and the application for rural domestic sewage treatment[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [13] 孙铁珩,李宪法. 城市污水自然生态处理与资源化利用技术[M]. 北京:化学工业出版社, 2006.
SUN Tie-heng, LI Xian-fa. Ecological treatment and utilization technology of urban sewage[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [14] Zhang Z Y, Lei Z F, Zhang Z Y, et al. Organics removal of combined wastewater through shallow soil infiltration treatment: A field and laboratory study[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 149: 657-665.
- [15] 刘家宝,杨小毛,王波,等. 改进型人工快渗系统处理污染河水中试[J]. 中国给水排水, 2006, 22(13): 14-17.
LIU Jia-bao, YANG Xiao-mao, WANG Bo, et al. Pilot-scale study on improved constructed rapid infiltration system for polluted river water treatment[J]. *China Water & Wastewater*, 2006, 22(13): 14-17.
- [16] 赵联芳,朱伟,赵建. 人工湿地处理低碳氮比污染河水时的脱氮机理[J]. 环境科学学报, 2006, 26(11): 1821-1827.
ZHAO Lian-fang, ZHU Wei, ZHAO Jian. Nitrogen removal mechanism in constructed wetland used for treating polluted river water with lower ratio of carbon to nitrogen[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(11): 1821-1827.
- [17] 赵桂瑜,杨永兴,杨长明. 人工湿地污水处理系统脱氮机理研究进展[J]. 四川环境, 2005, 24(5): 64-67.
ZHAO Gui-yu, YANG Yong-xing, YANG Chang-ming. Advances in nitrogen removal mechanism study on constructed wetland wastewater treatment[J]. *Sichuan Environment*, 2005, 24(5): 64-67.