

# 分层填料土地渗滤系统处理生活污水

罗仙平, 赖兰萍, 封丹, 严群, 韩磊, 李健昌

(江西理工大学资源与环境工程学院, 江西赣州 341000)

**摘要:**为提高土地渗滤系统水力渗透性能, 构建了2套不同填料的渗滤系统, 1#装置由红壤与砂分层装填, 2#装置由红壤与煤渣分层装填, 并将二者分别用于处理生活污水。在水力负荷  $10 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$  运行下, 1#装置对COD、总磷、氨氮的去除率分别为91.1%、97.6%、80.1%, 2#装置为94.9%、98.3%、89.0%; 1#装置出水硝氮和亚硝氮的平均浓度分别为54.7 mg/L和0.09 mg/L, 2#装置为60.3 mg/L和0.15 mg/L。试验结果表明, 2#装置对COD、总磷和氨氮的去除效果稍优于1#装置, 但1#装置更利于硝氮和亚硝氮的脱除, 进一步说明分层装填能充分利用填料性能, 有效地提高了土地渗滤系统的水力渗透性能且保持了良好的去除污染物的能力。

**关键词:**土地渗滤系统; 红壤; 砂; 煤渣; 生活污水

**中图分类号:** X172      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1674-4764(2009)06-0132-05

## Analysis of Domestic Wastewater Treatment by Infiltration System with Layered-filling

LUO Xian-ping, LAI Lan-ping, FENG Dan, YAN Qun, HAN Lei, LI Jian-chang

(College of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, P. R. China)

**Abstract:** In order to improve the hydraulic permeability of wastewater infiltration system, two installations were designed with two different fillers for treating domestic wastewater at laboratory. 1# installation was filled with layers of red soil and sand, while 2# with layers of red soil and cinder. At the load of  $10 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ , the average removal efficiency of COD, TP,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  were obtained 91.1%, 97.6%, 48.7% and 80.1%, respectively by 1# installation; and 94.9%, 98.3% and 89.0%, respectively by 2#. The average effluent concentrations of nitric and nitrite were 54.7mg/L and 0.09mg/L by 1# installation; and 60.3mg/L and 0.15mg/L by 2#. It was found that the removal efficiency of COD, TP and  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  by 2# installation were better than those of 1#, whilst 1# installation was more favourable for the removal of nitric and nitrite. The results further implied that layered-filling can make good use of its filling performance. The hydraulic permeability of wastewater infiltration system and the removal of pollutants can also be effectively improved.

**Key words:** Infiltration System; red soil; sand; cinder; domestic wastewater

土地渗滤系统是一种集自然生态净化与人工工  
艺于一体的小规模原位污水净化技术。它源自古老

的灌溉, 继承并发展了污灌技术简便、可资源化的优  
点, 是对其存在的不足(如处理能力和处理效率低、

收稿日期: 2009-06-16

基金项目: 江西省教育厅科学技术研究项目(赣教技字[2007]216号); 江西省自然科学基金项目(2007GQH0655); 江西省青年科学家(井冈之星)培养对象计划项目(2007DQ00400)

作者简介: 罗仙平(1973-), 男, 教授, 主要从事土地渗滤系统和矿冶环境工程研究, (E-mail)lxp9491@163.com.

易堵塞、对周围环境造成危害等)则通过工程技术手段加以改进的技术<sup>[1]</sup>。该技术具有操作简便、基建投资低(为传统二级处理系统的1/3~1/2)、能耗少(一般不需运行费用或费用低)、净化效率高、去除N、P有效和再生水可回用等特点。作为解决水污染和污水回用问题的一种新型污水处理技术,它一直是世界各国关注的环保热点<sup>[2-3]</sup>。

目前对土地渗滤系统的研究主要集中在以纯土壤为填料,由于纯土壤水力渗透性能较小,水力负荷过高,易堵塞,因此以纯土壤为填料的渗滤系统所能承受的水力负荷较低,占地面积较大。国内外开展了采用不同填料渗滤系统处理污水的研究,Pell等<sup>[1]</sup>采用砂层厚度为75 cm的渗滤系统处理城镇污水,水力负荷为 $6.7 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ ,出水COD去除率可达91.0%;罗仙平等<sup>[4]</sup>采用赣南典型的红土处理赣州城市生活污水,COD去除率达90%以上;严群等<sup>[5-6]</sup>采用上海的粘性土壤与草炭混合后与煤渣分层的毛管渗滤系统处理生活污水,COD、总磷、氨氮、总氮的去除率在水力负荷 $10 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 时分别为69.6%、89.5%、96.3%、25.7%,在水力负荷 $20 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 时分别为71.0%、62.1%、93.5%、29.7%,煤渣及草炭的添加有效地改善了土地毛管渗滤系统的水力渗透性能并保证了良好的污水处理效果。为此,针对江西特有的粘性红壤,该文采用对磷吸附能力较强、粒度较粗、孔隙率较多的煤渣和水力渗透性能较好的河砂替换部分红壤,以期提高土地渗滤系统的水力渗透性能,同时比较红壤与砂分层和红壤与煤渣分层两种装填方式对污水处理效果的影响。

## 1 试验概况

### 1.1 试验装置

试验装置包括储水箱、穿孔布水管和土地渗滤装置等3部分,见图1。其中储水箱的作用相当于化粪池系统,从储水箱流入装置的水相当于初级处理后出水;而穿孔布水管和土地渗滤装置构成土地渗滤系统。污水由储水箱通过恒流泵投配到土地渗滤装置中,然后进入埋在装置中的穿孔布水管和渗滤沟,缓慢地向周围土壤浸润、渗透和扩散,经过土壤的物理作用、化学作用和微生物的生化作用得到处理和净化<sup>[7-9]</sup>。

采用两套装置进行平行试验,1#、2#装置的尺寸及内部填料结构见表1。1#、2#装置内部填料装填结构见图2。装置内部采用16 mm的PVC布水管。管两侧根据长度均匀布置1.5 mm的出水孔。

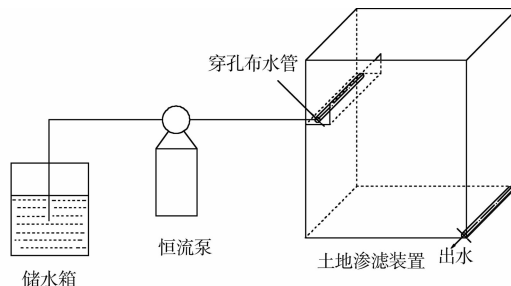


图1 试验装置运行示意图

表1 装置结构尺寸及填料装填方式

序号	长×宽×高/cm	填料装填方式
1#	100×45×110	装置最底层铺10 cm砾石,从下往上依次铺20 cm红壤,20 cm砂,10 cm红壤,30 cm砂子,10 cm红壤。布水槽铺20 cm砂,20 cm砾石。每层都用无纺布隔开,装置四周铺上海绵。
2#	100×45×110	装置最底层铺10 cm砾石,从下往上依次铺20 cm红壤,20 cm煤渣,10 cm红壤,30 cm煤渣,10 cm红壤。布水槽铺20 cm砂,20 cm砾石。每层都用无纺布隔开,装置四周铺上海绵。

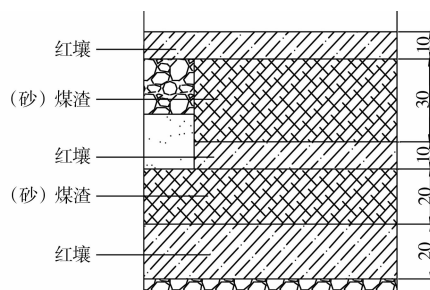


图2 1#、2#装置填料装填结构示意图

### 1.2 进水水质与试验方法

试验污水取自某生活小区的化粪池,主要的水质指标见表2。

试验过程中的水质分析项目包括COD、氨氮、硝氮、亚硝氮和总磷,分别采用重铬酸钾法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法、N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法和钼锑抗分光光度法测定<sup>[10]</sup>。

表2 原水水质指标/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )

指标	COD	总磷	氨氮	硝氮
平均值	227.8	6.8	40.0	1.8
变化范围	65.0~561.6	2.0~28.1	8.5~70.0	0.0~3.6

### 1.3 运行工况

2装置运行均采用间歇进水方式,每天进水1次,12 h进水12 h停水。土地渗滤系统采用的水力负荷不超过土壤饱和渗透系数的4%~10%。2装置内分别装填红壤、煤渣和砂子,试验测得红壤、煤渣和砂子的饱和水力渗透系数分别为 $0.17/(\text{cm} \cdot \text{h}^{-1})$ 、

254.7/(cm·h<sup>-1</sup>)和 118.4/(cm·h<sup>-1</sup>),可算得红壤、煤渣和砂子的渗滤系统所能承受的最高水力负荷分别为 0.16 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)、244.5 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)和 113.6 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)。在实际应用中采用纯红壤土地渗滤系统处理污水时,由于孔隙率过小容易堵塞,且日处理水量很小从而使占地面积较大;若土地渗滤系统采用纯煤渣或者纯砂子,导致污水在系统内部的停留时间不足和配水不均匀而影响处理效果。因此,选择水力负荷为 10 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)运行,进水速度 62 mL/min。

砂和煤渣质地均匀,内部孔隙率大且具有很好的渗透性能,表面易形成生物膜且不易堵塞,使其水力渗透性能增加,而土壤的孔隙率小很多,微生物的生长易形成堵塞现象,不利于污水的渗透,影响处理效果。在经过一年的运行之后,试验测得 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置的出水速度分别为 54 mL/min、51 mL/min,渗透性能良好,这主要由于分层装填充分利用煤渣和砂良好的透水通气性能和中间红壤层均匀布水功能,提高了装置的抗堵塞能力。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 COD 的去除效果分析

在水力负荷为 10 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)的运行条件下,2 装置对 COD 的处理效果见图 3。由图 3 可知,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置对 COD 都具有良好的处理效果,出水 COD 平均去除率分别为 91.1%和 94.9%,平均浓度分别为 19.1 mg/L 和 12.3 mg/L。

Quanrud<sup>[11]</sup>的研究表明对于二级和三级进水,经过土地渗滤系统处理后的出水有机物浓度基本上是一致的,说明土地渗滤系统对进水有机负荷有很大的缓冲能力。由图 3 可知,2 装置在水力负荷为 10 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)运行时,其出水 COD 浓度不随进水 COD 浓度的变化而波动,说明 2 装置对进水中有机物浓度的冲击负荷具有良好的承受能力。

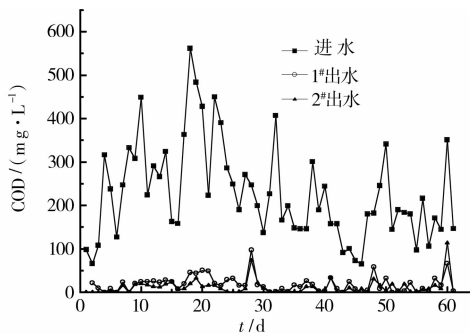


图 3 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置 COD 去除效果

但由图 3 亦可知,采用不同填料,装置的处理效

果还是有一定的差别。土壤与煤渣分层装置去除有机物的效果更好,其原因可能是该装置填料煤渣的孔隙率高,上层的透气性好,内部易形成优越的好氧条件,利于内部好氧微生物降解有机物活动的发生;尽管砂子作为填料在一定程度上也改善系统的复氧性能,但其内部间的孔隙比煤渣少,水力渗透性能也随之下降,因此表现出稍差的有机物去除效果。

研究实践表明,对于处理某些易生物降解工业废水的土地处理系统,进水中的 BOD<sub>5</sub> 浓度达到 1 000 mg/L 或更高都不会影响系统的正常运行,但 USEPA(2002)<sup>[12]</sup>所推荐的地下渗滤系统最高水力负荷仅为 6.6 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d),而实验在水力负荷为 10 cm<sup>3</sup>/(cm<sup>2</sup>·d)运行,因此 2 系统有效地提高了土地渗滤系统的水力渗透性能且保持了良好的去除有机污染物的能力。

### 2.2 总磷的去除效果分析

两装置对总磷的去除效果见图 4。由图 4 可知,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置对总磷均有良好的去除效果,出水总磷浓度一直很稳定,分别为 0.12 mg/L 和 0.09 mg/L,平均去除率分别为 97.6%和 98.3%,均低于 GB 18918—2002 一级 B 排放标准(≤1 mg/L),受进水总磷浓度波动的影响较小。分析原因可能是采用分层装填方式,渗透性能不同的填料在垂直方向上的交错分布,使污水能更为均匀的分布到系统中,和内部填料进行充分的接触,提供了更理想且稳定的磷去除性能。2 装置相比,2<sup>#</sup>装置效果更佳,进一步说明在土地渗滤系统中采用煤渣作为填料更有利于总磷的去除。

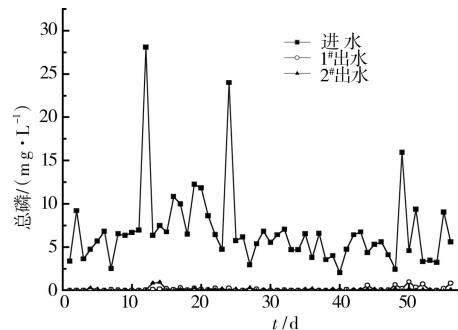


图 4 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置总磷去除效果

许多学者研究了土壤和煤渣对磷的去除效果,邵长飞<sup>[13]</sup>研究了昆明红土壤的磷吸附性能,实际固磷能力达 0.7 mg/g,饱和时间为 6.2 年;李培培等<sup>[14]</sup>研究了碎石、煤渣、石膏和紫砂的磷吸附特性,煤渣的最大吸附量为 0.6 mg/g;黄玲<sup>[15]</sup>采用了煤渣处理 pH 在 5~9,浓度高达 50 mg/L 的磷酸盐溶液,去除率始终在 97%以上。由此可见,在土地渗

滤系统中利用煤渣或者砂替换部分土壤进行污水处理,不但提高了系统的水力渗透性能,而且促进了对磷的去除作用,提高了系统的使用寿命。

### 2.3 氮的去除效果分析

土地渗滤系统的脱氮机理主要是硝化和反硝化作用,而硝化是由化能自养型好氧微生物(统称为硝化菌)将水中的、由有机氮氮化而来的氨氮和亚硝氮转化为硝氮;反硝化即硝酸盐呼吸<sup>[16]</sup>,是在缺氧条件(DO<0.5 mg/L)下,以硝酸盐为电子受体,在硝酸盐还原酶、亚硝酸盐还原酶、一氧化氮还原酶和一氧化二氮还原酶作用下将硝酸盐还原亚硝酸盐,再转化为氮气的过程<sup>[16-17]</sup>。

2装置对氨氮的处理效果如见图5。由图5可知,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置对氨氮均有较好的去除效果,出水氨氮平均去除率分别为80.1%、89.0%,平均浓度分别为9.3 mg/L、4.6 mg/L。2<sup>#</sup>装置的氨氮去除效果比1<sup>#</sup>装置好,其出水氨氮平均浓度比1<sup>#</sup>低,这可能2<sup>#</sup>装置填料中的煤渣孔隙率较砂子大,复氧能力比砂子层强,利于硝化反应的进行;而1<sup>#</sup>装置经过一年的运行,填料被压缩,砂层孔隙率减少,污水在填料中不能及时排出而滞留在系统内,从而不利于系统的复氧,硝化细菌的生长受到较大的影响,直接导致硝化反应去除氨氮性能的下降。

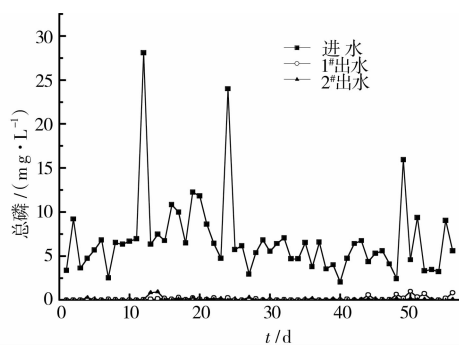


图5 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>装置氨氮去除效果

依据 GB 18918—2002 一级 B 排放标准( $\leq 8$  mg/L),2<sup>#</sup>装置的出水达标率为100%。

硝氮是生物硝化反硝化反应的中间产物,对其浓度变化进行分析可进一步了解土地渗滤系统中的生物脱氮过程。2装置的进、出水硝氮和亚硝氮浓度变化见图6和图7。

由图6整体趋势可知,两装置运行稳定后,出水硝氮浓度分别为54.7 mg/L和60.3 mg/L,1<sup>#</sup>装置出水硝氮浓度比2<sup>#</sup>装置低,这和1<sup>#</sup>装置对氨氮的去除率不高有关。氮化反应生成的氨氮量少,随之由硝化反应生成的硝氮和亚硝氮的量也不多。由图7可知,1<sup>#</sup>装置运行5 d出水亚硝氮浓度趋于稳定,

为0.09 mg/L,而2<sup>#</sup>装置运行17 d出水亚硝氮浓度趋于稳定,为0.15 mg/L。这说明2<sup>#</sup>装置更不利于反硝化反应的顺利进行,主要是由于2<sup>#</sup>装置煤渣孔隙大,底部的复氧效果更好,厌氧环境不佳,不利于反硝化细菌的繁殖,因此2<sup>#</sup>装置亚硝氮出水浓度偏高且进入反硝化的周期要比1<sup>#</sup>装置长。

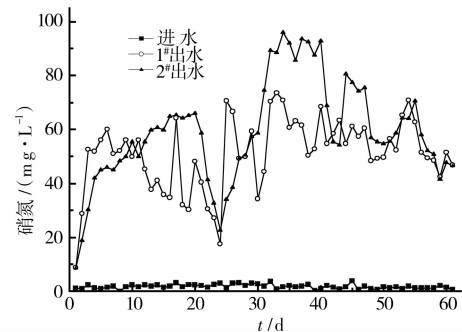


图6 进、出水硝氮浓度的变化

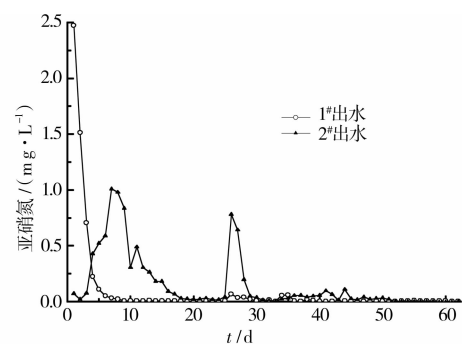


图7 出水亚硝态氮浓度的变化

## 3 结 语

1)在水力负荷为 $10 \text{ cm}^3/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$ 的运行条件下,1<sup>#</sup>装置对COD、总磷和氨氮的去除率分别为91.1%、97.6%和80.1%,出水COD、总磷和氨氮的平均浓度分别为19.1 mg/L、0.12 mg/L和9.3 mg/L;2<sup>#</sup>装置对COD、总磷和氨氮的去除率分别为94.9%、98.3%和89.0%,出水COD、总磷和氨氮的平均浓度为12.3 mg/L、0.09 mg/L和4.6 mg/L。两装置对COD、总磷和氨氮的去除率都较高。

2)1<sup>#</sup>装置出水硝氮和亚硝氮的平均浓度分别为54.7 mg/L和0.09 mg/L,2<sup>#</sup>装置出水硝氮和亚硝氮的平均浓度分别为60.3 mg/L和0.15 mg/L。2<sup>#</sup>装置对COD、总磷和氨氮的去除效果稍优于1<sup>#</sup>装置,但是1<sup>#</sup>装置更利于反硝化反应进行,更利于硝氮和亚硝氮的脱除。

3)从污水处理效果综合表明,以红壤与煤渣分层装填的2<sup>#</sup>装置对污染物的去除效果优于以红壤与河砂分层装填的1<sup>#</sup>装置。分层装填充分利用煤

渣和砂良好的透水通气性能和中间红壤层均匀布水功能,有效地提高了土地渗滤系统的水力渗透性能且保持了良好的去除污染物的能力。

#### 参考文献:

- [1] PELL M, NYBERG F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand filter system: Reduction of organic matter and phosphorus [J]. *Environ. Qual.*, 1989, 18:452-457.
- [2] SANTIAGO V. Recent developments on biological nutrient removal processes for wastewater treatment [J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2004, 3(2):171-183.
- [3] STEPHEN E. Applicability of a septic tank/engineered wetland coupled system in the treatment and recycling of wastewater from a small community [J]. *Environmental Management*, 2005, 35(1):99-108.
- [4] 罗仙平, 谢明辉, 杨坤. 采用土地处理系统处理城市生活污水的实验室模拟研究 [J]. *江苏环境科技*, 2006, 19(2):14-16.  
LUO XIAN-PING, XIE MING-HUI, YANG KUN. Simulated experiment study on municipal wastewater by soil treatment technique [J]. *Jiangsu Environmental Science and Technology*, 2006, 19(2): 14-16.
- [5] 严群, 吴一蓁, 董卫华, 等. 强化填料土地毛管渗滤系统处理生活污水的研究 [J]. *环境污染与防治*, 2008, 30(5):18-21.  
YAN QUN, WU YI-FAN, DONG WEI HUA, et al. Filling enhanced capillary seepage system for treatment of domestic wastewater. *Environmental Pollution and Control*, 2008, 30(5):18-21.
- [6] 杨健, 严群, 吴一蓁, 等. 分层填料土地毛管渗滤系统处理生活污水的研究 [J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(6):107-110.  
YANG JIAN, YAN QUN, WU YI-FAN, et al. Treatment of domestic wastewater by layered-filling subsurface capillary seepage system [J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 31(6):107-110.
- [7] WESTERHOFF P, PINNEY M. Dissolved organic carbon transformation during laboratory-scale groundwater recharge using lagoon-treated wastewater [J]. *Waste Management*, 2000, 20(1):75-83.
- [8] 高拯民, 李宪法. 城市污水土地处理利用设计手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [9] FELDE K V, KKUNST S. N and COD removal in vertical-flow systems [J]. *Wat. Sci. Tech.*, 1997, 36(5):79-85.
- [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 (第4版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:210-280.
- [11] QUANRUD D M, ARNOLD R G, WILSON L G, et al. Fate of organics during column studies of soil aquifer treatment [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 1996, 122(4):314-321.
- [12] USEPA. Manual of onsite wastewater treatment systems [R]. EP r625/R-00/008 2002, 02.
- [13] 邵长飞. 地下渗滤系统处理滇池流域村镇生活污水的试验研究 [D]. 青岛: 青岛建筑工程学院, 2003.
- [14] 李培培, 郑正. 人工湿地填料的磷吸附特性研究 [J]. *河南科学*, 2008, 26(1):88-91.  
LI PEI-PEI, ZHENG ZHENG. Phosphorus adsorption characteristics of four materials for use as substrates in constructed wetland [J]. *Henan Science*, 2008, 26(1): 88-91.
- [15] 黄玲. 处理含磷废水吸附剂的实验研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2004, 1(2):25-26.  
HUANG LING. Laboratory study on phosphorus removal for sewage treatment with absorbent [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2004, 1(2):25-26.
- [16] 王淑莹, 孙洪伟, 杨庆, 等. 传统生物脱氮反硝化过程的生化机理及动力学 [J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(5):732-73.  
WANG SHU-YING, SUN HONG-WEI, YANG QING, et al. Biochemical reaction mechanism and kinetics of denitrification [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2008, 14(5): 732-736.
- [17] 毛玉红, 高军锋. 生物脱氮机理及应用 [J]. *中国资源综合利用*, 2008, 26(6):21-23.  
MAO YU-HONG, GAO JUN-FENG. Principle and application of biological removal of nitrogen [J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2008, 26(6):21-23.

(编辑 胡玲)