

# 多介质土壤层系统 (MSL) 的材料选配对 生活污水处理效率的影响

邹俊<sup>1,2</sup>, 陈昕<sup>2①</sup>, 张毅敏<sup>2</sup>, 张永春<sup>2</sup>, 周济人<sup>1</sup> (1. 扬州大学水利学院, 江苏扬州 225009; 2. 环境保护部南京环境科学研究所, 江苏南京 210042)

**摘要:** 多介质土壤层系统 (MSL) 是一种适合于农村地区处理生活污水的新型分散式污水处理系统。试验设计了 4 个长、宽、高分别为 50 10 60 cm 的 MSL 系统, 该系统由土壤混合层和透水层交叠成层组成。土壤混合层选用普通砂土, 添加木屑混合木炭/秸秆、铁粒/膨润土按照 7: 2: 1 的干质量比例均匀混合, 透水层选用沸石或者普通砾石。MSL 系统在水力负荷  $500 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$  下连续运行 2 个月。结果表明, 4 个 MSL 系统对  $\text{COD}_c$  的平均去除率差别不大, 为 79.58%~80.22%; 对 TP 去除率为 47.83%~82.60%, 添加沸石和膨润土可以较大程度地增加 TP 去除率; 对 TN 的去除率为 29.74%~57.89%, 透水层为沸石的 MSL 系统去除率明显优于砾石; 木炭混合木屑较秸秆更适合作为 MSL 系统的有机碳源。

**关键词:** MSL 系统; 材料选配; 生活污水; 去除率

中图分类号: X799.3 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2010)S1-0014-05

**Impact of Materials in Multi-Media Soil Layer (MSL) System on Sewage Treatment** ZOU Jun<sup>1,2</sup>, CHEN Xin<sup>2</sup>, ZHANG Yimin<sup>2</sup>, ZHANG Yong-chun<sup>2</sup>, ZHOU Jiren<sup>1</sup> (1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract** Multi-media soil layering (MSL) is a new type of decentralized domestic wastewater treatment system, especially fit for rural areas. In the experiment four MSL systems were constructed in box (50 cm × 10 cm × 60 cm) comprising typically soil mixture layers alternated with permeable layers. The soil mixture layer contained sandy soil, sawdust and charcoal/straw, iron scraps/bentonite mixed at a ratio of 7: 2: 1 by dry weight, and the permeable layer was composed of zeolite and gravel. The MSL systems ran continuously for two months at a hydraulic loading rate (HLR) of  $500 \text{ L} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ . Results show that the four MSL systems did not differ much in average  $\text{COD}_c$  removal rate, varying in the range of 79.58% - 80.22%; and their TP removal rate was in the range of 47.83% - 82.60%, and addition of zeolite and bentonite in the permeable layers increased TP removal rate by a large margin; their TN removal rate varied in the range of 29.74% - 57.89%. Permeable layers of zeolite were better than those of gravel. The mixture of charcoal and sawdust was more suitable as organic carbon source than straw in the MSL systems.

**Key words** MSL system; material matching; domestic sewage; removal rate

近年来,太湖地区不合理的生产生活方式引起的环境问题日益突出,导致太湖水体富营养化程度不断加剧。据统计,随着沿太湖各地污染减排力度不断加大,工业排污总量已呈下降趋势,而农业面源污染、生活污水的比例却呈上升趋势<sup>[1]</sup>。从太湖全流域 TN 和 TP 污染负荷看,生活污水分别占 25% 和 60%<sup>[2]</sup>。因此生活污水的处理对保护太湖流域水环境、减轻太湖富营养化程度有着重要的意义。

农村生活污水的主要特点是: 污染物含量较低,但是水质的时段性和地区性差异大;污水中基本不含重金属和有毒有害物质,含有一定的氮、磷,可生

化性强。农村人口居住分散,产生的生活污水量也较小,但是水量排放随时间变化大;很多农村地区尚无完善的污水排放系统,生活污水一般呈粗放型排放,污水沿道路边沟或路面排放至就近的水体中<sup>[3-5]</sup>。2007 年环境保护部下发的《关于加强农村环境保护工作的意见》一文中明确指出:对于分散居住的农户,鼓励采用低能耗小型分散式污水处理设施<sup>[6]</sup>。因

基金项目: 公益性科研院所基本科研业务费项目

收稿日期: 2010-11-05

① 通讯联系人 E-mail: chenxin@nies.org

此分散式污水处理技术在我国农村地区具有广阔的应用前景。目前比较常用的分散式污水处理工艺主要包括改良的化粪池系统、水生植物处理系统、人工湿地和土壤处理系统。其中土壤处理法由于造价低,处理效果好,在很多村落已经得到了应用<sup>[7-8]</sup>。

多介质土壤层系统 (multi-media-soil layering MSL)是 20世纪日本开发的一种利用土壤净化原理处理污水的技术。MSL系统由土壤混合层和通水层组成,2部分交替分布,形成好氧和厌氧区域,通过物理过滤、化学吸附和交换以及生物分解等作用,去除污水中 COD、TN和 TP<sup>[9]</sup>。在国外,尤其在日本、泰国和印度尼西亚,已经应用 MSL系统处理各种类型的废水,但是国内对这一技术还没有进行全面的研究。笔者就地取材,选取太湖流域常见的材料为试验原材料,研究不同材料选配对生活污水的处理效率及其影响因素,通过对比试验筛选出 MSL系统中最佳的材料组合,以期对 MSL系统的实际应用提供一定的技术支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 系统结构

图 1是试验采用的 MSL系统的结构。供试的 4个内部结构相同的 MSL试验装置均采用有机玻璃加工而成,长、宽、高各为 50、10和 60 cm。试验设计 MSL系统由土壤混合层和通水层交替成层组成,共有 6层土壤混合层:底部铺设 5 cm 厚的通水层,其上面铺设第 1层土壤混合层,有 3块 12 cm × 4 cm × 10 cm 的土壤混合模块组成,混合模块间的空隙填充通水层材料;再铺设 4 cm 厚的通水层,其上铺设第 2层土壤混合层,有 2块 12 cm × 4 cm × 10 cm 的土壤混

合模块和 2块 6 cm × 4 cm × 10 cm 的半块组成,按此顺序依次往上叠加填充直到第 6层土壤混合层,最上面再铺设 1层 5 cm 厚的通水层。系统顶部不封闭。

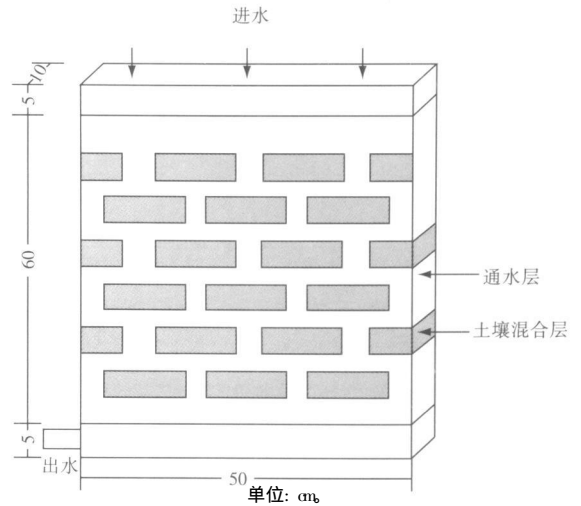


图 1 MSL系统结构

Fig 1 Structure of the multi-media-soil layering system (MSL)

### 1.2 系统材料的组成

4个 MSL系统填充材料组成见表 1。土壤混合层材料所用土壤为普通砂土(取自南京市中山陵山脚),其中根据试验设计添加了木屑(南京市美尔枫木材加工厂提供)、木炭(南京市六合木炭厂提供)、农村秸秆(取自南京市高淳县农村)、铁粒(江苏省常州机床厂提供)或膨润土(购自江苏省镇江市丹徒区茅山沸石厂)。通水层材料为沸石(购自江苏省镇江市丹徒区茅山沸石厂)和普通砾石。

表 1 MSL系统材料组成

Table 1 Material composition of the MSL system

编号	通水层	土壤混合层各组成材料质量 /kg					
		普通砂土	木屑	木炭	铁粒	秸秆	膨润土
MSL1	沸石	7.60 (7)	1.09 (1)	1.09 (1)	1.09 (1)		
MSL2	砾石	7.60 (7)	1.09 (1)	1.09 (1)	1.09 (1)		
MSL3	沸石	7.60 (7)			1.09 (1)	2.18 (2)	
MSL4	沸石	7.60 (7)				2.18 (2)	1.09 (1)

括号内数据为土壤混合层各材料干质量比例。

### 1.3 试验条件

供试原水取自南京市城北污水处理厂,为雨污混流经格栅的生活污水,其水质特征见表 2。在不控制室温的条件下采取连续进水、出水方式运行 MSL系统,水力负荷设定为 500 L · m<sup>-2</sup> · d<sup>-1</sup>,系统

从 2009年 10月 12日开始运行直至 2009年 12月 13日结束,共计运行 2个月。

### 1.4 水样分析方法

系统开始运行后,每周定时采样 1次,取进水和出水进行分析,TP测定采用钼锑抗分光光度法,

TN 测定采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  测定采用纳氏试剂光度法,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 测定采用重铬酸钾氧化法<sup>[10]</sup>。

表 2 供水原水水质特征

Table 2 Characteristics of incoming raw water quality  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

指标	范围	平均值
$\text{COD}_{\text{Cr}}$	119.72~212.10	156.14
TN	13.40~16.23	13.72
$\text{NH}_3 - \text{N}$	7.22~11.31	9.41
TP	0.92~1.73	1.23

## 2 结果与讨论

### 2.1 $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除

在系统整个运行期间, 进水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 质量浓度为 120~ 212  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均值为 156.14  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MSL1~ MSL4系统出水  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 平均质量浓度分别为 30.88、31.06、31.19和 31.88  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均去除率分别为 80.22%、80.11%、80.02%和 79.58%。4个 MSL系统中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除见图 2。

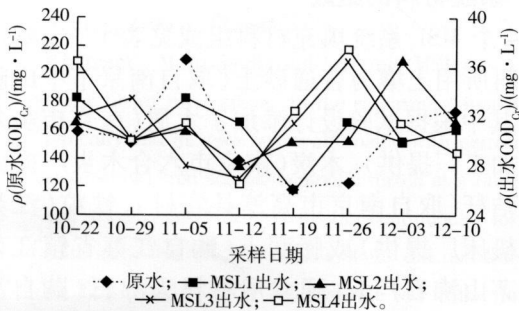


图 2 4个 MSL 系统中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  的去除

Fig 2  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  Removal rates of the four MSL systems

如图 2所示, 4个 MSL系统对污水中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除率差别不大。  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除主要取决于系统的吸附分解作用。污水通过系统中土壤粒子的过滤, 大量有机污染物被土壤微粒吸附后又被土壤中的微生物迅速分解, 该过程一般在好氧条件下进行<sup>[11-12]</sup>。MSL2系统与其他 3个通水层均为沸石的系统相比较, 通水层材料为砾石,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 去除率差别不大, 说明通水层材料不同对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除影响不大。土壤混合层中有机碳源添加物的改变对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除几乎没有影响。另外, 试验运行时间为 10月底到 12月初, 气温比较低, 对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除效果有一定影响。有研究表明, 当气温从 18℃降至 15℃

时,  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除效率下降 10%<sup>[13]</sup>, 所以本试验系统中  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除率可能偏低。只要系统保持足够的好氧状态, 且运行温度不是很低, 4个 MSL系统对  $\text{COD}_{\text{Cr}}$ 的去除效果都较好。

### 2.2 N 的去除

#### 2.2.1 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除

在系统整个运行期间, MSL1~ MSL4系统的进水  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均质量浓度为 9.38  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均出水质量浓度为 4.58、6.59、5.48和 3.95  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率分别为 51.17%、29.74%、41.58%和 57.89%。4个 MSL系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除见图 3。

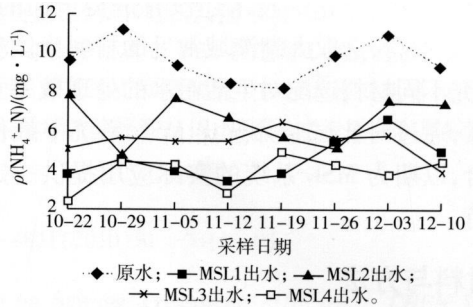


图 3 4个 MSL 系统中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的去除

Fig 3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  removal rate of the four MSL systems

污水中 N 主要以  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的形式存在,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 在 MSL系统中主要被沸石吸附后通过土壤的硝化作用转化为  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 得以去除<sup>[14]</sup>。所以通水层材料的阳离子交换量 (CEC) 以及土壤层的好氧环境是影响  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除率的主要因素<sup>[15]</sup>。从图 3可以看出, MSL2系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率明显低于其他 3个系统, 仅为 29.74%。这是因为 MSL2的通水层材料为砾石, CEC 含量较低, 其他系统均为沸石, CEC 含量较高。MSL4系统对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率最高, 原因是 MSL4系统中不仅有沸石通水层, 还在土壤混合层中添加了膨润土, 膨润土比表面较大, 具有黏结性、吸附性、阳离子交换性等多种性能。土壤混合层中保持良好的通气条件有利于硝化作用的进行, 从而有利于  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除<sup>[16]</sup>。

#### 2.2.2 TN 的去除

在系统整个运行期间, 进水 TN 平均质量浓度为 13.71  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MSL1~ MSL4系统平均出水质量浓度为 6.54、10.20、7.63和 7.22  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , TN 平均去除率分别为 52.30%、25.60%、44.33%和 47.34%。4个 MSL系统中 TN 的去除见图 4。

TN 的去除是一个十分复杂的过程, 生活污水中

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$  在系统内部好氧条件下进行硝化作用转化成  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ , 然后,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  在厌氧条件下进行反硝化作用, 主要形成  $\text{N}_2$  释放, 使  $\text{N}$  得以去除。TN 的去除和系统的好氧、厌氧状态及反硝化碳源密切相关。MSL 系统中通水层材料与土壤混合层交替布局, 保证水流畅通, 无淤积水, 使系统有着良好的好氧环境, 硝化作用得以顺利进行。所以本试验中, TN 的去除主要取决于反硝化作用, 系统的厌氧环境显得十分重要。有机碳源材料将影响 TN 去除过程中微生物的反硝化作用, MSL1 与 MSL3 系统的区别在于土壤混合层中有机碳源添加物不同, MSL1 为木屑混合木炭, MSL3 为秸秆, 去除率分别为 52.30% 和 44.35%。由于木屑混合木炭较秸秆的粒径更小, 更容易被微生物分解利用<sup>[17]</sup>, 对 N 的吸附作用也较强; 再加上粒径小, 系统更容易产生厌氧环境, 有利于反硝化作用的进行, 因此 MSL1 系统对 TN 的去除效果优于 MSL3。

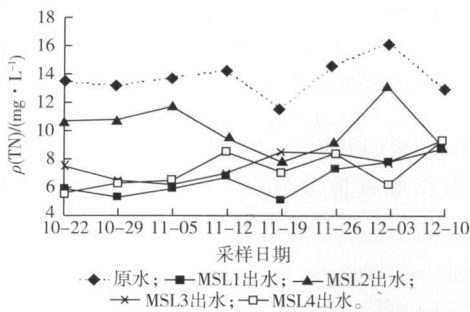


图 4 4 个 MSL 系统中 TN 的去除

Fig 4 TN removal rate of the four MSL systems

MSL2 系统对 TN 的去除率明显低于其他 3 个系统, 仅为 25.60%。砾石的 CEC 含量较低, 对  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附能力弱, 不宜作为系统通水层的脱 N 材料<sup>[18]</sup>。MSL3 与 MSL4 系统 TN 的去除率差别不大, 可见, 添加膨润土, 并没有明显提高系统的脱 N 效率<sup>[19]</sup>。总之, TN 的去除主要取决于材料对污水中  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的吸附以及系统中好氧厌氧状态的平衡。如果系统处于不利于反硝化作用进行的状态, 出水  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量较高, 将会影响污水中 TN 的去除。

### 2.3 TP 的去除

在系统整个运行期间, 进水 TP 平均质量浓度为  $1.15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , MSL1 ~ MSL4 出水质量浓度分别为  $0.20$ 、 $0.60$ 、 $0.36$  和  $0.24 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , 去除率分别为 82.60%、47.83%、68.70% 和 79.13%。4 个 MSL 系统中 TP 的去除见图 5。

TP 是通过土壤黏土中本身含有的氢氧化铁吸附去除的, 土壤混合层中添加铁或膨润土进一步增强了系统的磷酸吸附能力<sup>[20]</sup>。添加的铁在土壤层中被氧化成 2 价铁, 在沸石表面被进一步氧化成不溶性的 3 价氢氧化铁, 污水中的磷酸即被吸附<sup>[21]</sup>。膨润土中的蒙脱石主要通过吸附和沉淀作用去除磷。从 MSL4 与 MSL3 系统对 TP 去除率的对比来看, 膨润土比铁对磷酸的吸附效果更为明显。MSL2 系统对 TP 的去除效果明显低于其他 3 个系统, 说明添加沸石也能提高磷酸的去除率。天然沸石是自然界中广泛存在的一种硅铝酸盐矿物, 它为特殊的四面体结构, 具有较高的离子交换能力和吸附能力。但是, 由于其表面净电荷为负值, 所以对阴离子的结合能力较弱。虽然沸石对磷酸盐的吸附能力较弱, 但可以看出沸石对 TP 的去除效果明显优于砾石, 关于沸石对磷酸盐的吸附机理国内的研究还不多, 尚需进一步开展。

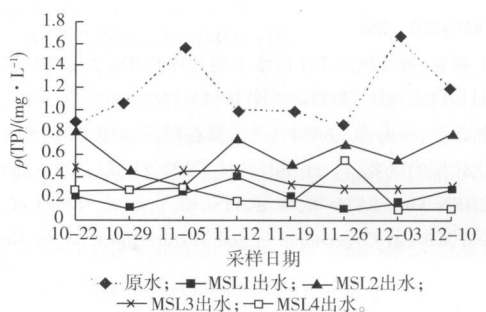


图 5 4 个 MSL 系统中 TP 的去除

Fig 5 TP removal rate of the four MSL systems

## 3 结论

土壤混合层中的有机碳源添加物——木屑混合木炭或秸秆, 对污水中  $\text{COD}_c$  的去除几乎没有影响, 但对 TP 和 TN 的去除影响较为明显, 木屑混合木炭或秸秆作为有机碳源时对 TP 和 TN 去除率分别为 82.60%、52.30% 或 68.70%、44.35%。

通水层材料不同对污水中  $\text{COD}_c$  去除影响不大, 系统的好氧状态是影响  $\text{COD}_c$  去除的关键。通水层材料不同对 TN 去除影响较为明显, 通水层材料的 CEC 是影响  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  吸附能力的重要指标。另外, 系统的好氧、厌氧状态也是 TN 去除效果重要的影响因子。污水中 TP 的去除与系统的好氧状态有关, 添加沸石和膨润土可以增加 TP 的去除率。

### 参考文献:

[1] 史龙新, 李向阳, 王宁, 等. 太湖地区农村面源污染控制技术与

- 对策 [J]. 中国水利, 2006(17): 11-13
- [2] 闫丽珍, 石敏俊, 王磊. 太湖流域农业面源污染及控制研究进展 [J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(1): 99-107.
- [3] 沃飞, 陈效民, 吴华山, 等. 太湖流域典型地区农村水环境氮磷污染状况的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 819-825.
- [4] 范成新, 季江, 陈荷生. 太湖富营养化现状、趋势及其综合整治对策 [J]. 上海环境科学, 1997, 16(8): 4-7.
- [5] 许亚萍, 吴昊, 梅凯. 太湖流域农村生活污水治理工程建设探讨 [J]. 西南给排水, 2009, 31(5): 16-21.
- [6] 李斌, 杨继富. 我国农村人居环境现状及对策 [J]. 中国农业水利水电, 2009(6): 36-41.
- [7] 李慧, 王俊玲. 污水的土地处理特性分析 [J]. 北方环境, 2004, 29(5): 36-38.
- [8] 孙铁珩, 周恩毅. 城市污水土地处理技术指南 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997: 2-9.
- [9] CHEN X in, LUO Air cheng, SATO K, *et al*. An Introduction of a MultiSoilLayering System: A Novel Green Technology for Wastewater Treatment in Rural Areas [J]. Water and Environment Journal 2009, 23(4): 255-262.
- [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 [M]. 3 版. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 210-284.
- [11] 王德春, 孙凌帆. 浅议污水土地处理 COD<sub>Cr</sub>去除率的影响因素 [J]. 广东化工, 2009, 36(8): 144-145.
- [12] 刘远金, 卢维盛, 李华兴, 等. 沸石对污水中 BOD<sub>5</sub>和 COD<sub>Cr</sub>净化效果的研究 [J]. 土壤与环境, 2002, 11(3): 323-324.
- [13] CHEN X in, SATO K, WAKATSUKI T, *et al*. Effect of Aeration and Material Composition in SoilMixture Block on the Removal of Colored Substances and Chemical Oxygen Demand in Livestock Wastewater Using MultiSoilLayering Systems [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2007, 53(4): 509-516.
- [14] 钱福国, 陈天虎, 瞿丽. 安徽宣城天然斜发沸石深度处理氨氮废水研究 [J]. 非金属矿, 2008, 31(2): 62-68.
- [15] ATTANANDANA T, LUANMANEE S, SAITHITIB, *et al*. A Comparative Study of Zeolite With Other Materials as the Components of the MultiSoilLayering System for Wastewater Treatment [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2000, 46(2): 1-11.
- [16] BOONSOOK P, LUANMANEE S, ATTANANDANA T, *et al*. A Comparative Study of Permeable Layer Materials and Aeration Regime on Efficiency of MultiSoilLayering System for Domestic Wastewater Treatment in Thailand [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2003, 49(6): 873-882.
- [17] 高龙军. 玉米秸秆代替木屑作为生态厕所反应基质的可行性研究 [D]. 长春: 东北师范大学环境科学学院, 2005.
- [18] 龚增荣. 天然沸石去除水中低浓度氨氮的研究 [J]. 企业导报, 2009(1): 156-158.
- [19] 李淑静, 宋中庆. 膨润土在污水处理中的应用展望 [J]. 化学世界, 2002(4): 211-213.
- [20] 肖举强, 李玉金, 郑辉. 沸石除磷性能研究 [J]. 甘肃环境研究与监测, 2003, 16(3): 252-254.
- [21] 赵桂瑜, 周琪. 沸石吸附去除污水中磷的研究 [J]. 水处理技术, 2007, 33(2): 34-37.

作者简介: 邹俊 (1985-), 女, 湖北宜昌人, 硕士生, 主要从事水污染控制方面的研究。E-mail: zoujun0927@yahoo.com.cn