

# 蚯蚓生态滤池对生活污水中氮的去除作用

方彩霞,罗兴章,郭飞宏,郑正\*,李喆钦

(南京大学环境学院污染控制与资源化研究国家重点实验室,南京 210093)

**摘要:**研究了单级蚯蚓生态滤池对生活污水中不同形态氮的去除效果,并对其机制进行了探讨。结果表明,处理前进水总氮以氨氮为主,占 83.88%,出水总氮以硝态氮为主,占 76.46%,氮素的形态在处理前后发生了很大的改变;系统对总氮和氨氮的平均去除率分别为 28.08% 和 90.44%,硝态氮大量积累,亚硝态氮少量积累;系统硝化作用强,反硝化作用受到抑制,总体脱氮能力较差,可采取提高湿干比、改进滤池构造、多级滤池串联、后接人工湿地和提高进水碳氮比等手段强化反硝化,以提高滤池总氮的去除效果。

**关键词:**蚯蚓生态滤池;农村生活污水;氮形态;去除效果

中图分类号:X703.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3301(2010)02-0352-05

## Nitrogen Removal in Earthworm Ecofilter Treating Domestic Wastewater

FANG Cai-xia, LUO Xing-zhang, GUO Fei-hong, ZHENG Zheng, LI Zhe-qin

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The removal efficiency of different forms of nitrogen was studied in earthworm ecofilter treating domestic wastewater, and the mechanisms were discussed. Results indicated that, the major form of total nitrogen (TN) in influent water and effluent water were existed as ammonia-nitrogen ( $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ) and nitrate-nitrogen ( $\text{NO}_3^- \text{-N}$ ), respectively.  $\text{NH}_4^+ \text{-N} / \text{TN}$  in influent water and  $\text{NO}_3^- \text{-N} / \text{TN}$  in effluent water were 83.88% and 76.46%, respectively,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  decreased and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  increased during the process. The average removal efficiency of TN and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  were 28.08% and 90.44%, respectively, nitrate-nitrogen accumulated massively and nitrite-nitrogen ( $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ) accumulated a little. It was also observed that nitrification in earthworm ecofilter was strong and the denitrification was inhibited, TN removal was not as obvious as the  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  removal due to the poor denitrification environment. The overall removal of TN can be improved by increasing wet/dry ratio, modifying the structure of filter, multistage filter series, following by constructed wetland, and increasing C/N ratio of the influent water.

**Key words:** earthworm ecofilter; domestic wastewater in rural areas; nitrogen forms; purification performance

随着经济的发展和人口的不断增加,污水排放总量逐年上升,污水排放中的氮、磷是导致湖泊河流富营养化的主要原因<sup>[1-4]</sup>。农村生活污水是太湖水体污染的重要来源,具有量少、分散、远离排污管网、处理率低和管理水平低等特点<sup>[5,6]</sup>,因此,对农村生活污水进行收集处理,研究开发高效率、低成本、低运行费用和低维护要求的农村生活污水处理技术已成为当前十分紧迫的课题<sup>[1]</sup>。

蚯蚓生态滤池是最早由法国和智利发展起来的一项针对城镇生活污水的处理技术,主要根据蚯蚓具有提高土壤通气透水性能和促进有机物质的分解转化等生态学功能而设计,实现滤池通气供氧和解决滤池堵塞等问题<sup>[7,8]</sup>。该技术类似于垂直流人工湿地和土地快速渗滤处理系统,不同之处在于人工强化引入蚯蚓及对填料进行了适当的改进<sup>[9]</sup>。目前蚯蚓生态滤池主要采用陶粒、土壤、锯末、稻壳、谷壳、泥炭、钢渣、煤渣、石英砂和细砂等为填料<sup>[7,9,10-12]</sup>。本试验以人工土壤、细砂、碎青石和鹅卵石为填料,构建了蚯蚓生态滤池小试装置,系统研

究了氮素在蚯蚓生态滤池系统中的转化规律,探讨其除氮机制,以期对蚯蚓生态滤池在太湖流域农村生活污水处理中推广应用提供理论依据与技术支持。

### 1 材料与方法

#### 1.1 蚯蚓生态滤池的构筑

试验装置由 PVC 塑料板黏接而成,单级蚯蚓生态滤池长×宽×高为 30 cm×30 cm×55 cm,滤池填料包括人工土壤、细砂、碎青石和鹅卵石等,基质有效高度为 50 cm。从滤池底部至顶部依次填充:粒径 25~40 mm 鹅卵石,5 cm;粒径 5~20 mm 碎青石,8 cm;粒径 0~2 mm 细砂,3 cm;34 cm 人工土壤

收稿日期 2009-03-12;修订日期 2009-06-22

基金项目 江苏省太湖水专项(BS2007148);水利部公益性行业科研专项(200801028);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2008ZX07101-004)

作者简介 方彩霞(1979~),女,博士研究生,主要研究方向为水污染控制,E-mail:fangaixia0606@126.com

\* 通讯联系人,E-mail:zzheng@nju.edu.cn

层. 试验采用的蚯蚓为大平 2 号, 属于赤子爱胜蚓, 蚯蚓生活在人工土壤层, 蚯蚓在土壤中的接种密度为  $4.63 \text{ g/L}$ . 采用蠕动泵控制进水, 十字架布水管布水, 工艺流程见图 1. 从 2008 年 3 月中旬系统开始运行, 根据蚯蚓生物特性和系统填料特点, 采用间歇进水方式, 水力负荷为  $0.53 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 每天进水 4 h, 进水与落干的时间(即湿干比)为 1:5.

## 1.2 进水水质状况

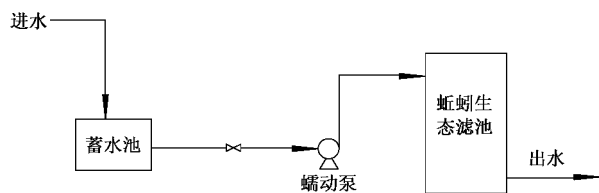


图 1 蚯蚓生态滤池小试装置流程示意

Fig. 1 Flow diagram of the process

本试验供试用水取自南京大学学生宿舍化粪池出水, 进水水质指标见表 1. 可以看出, 试验期间进水水质变化幅度较大, 供试用水 pH 值呈弱碱性, COD 值较低, 平均值为  $218.88 \text{ mg/L}$ , 而 TN 和 TP 的含量相对较高, 平均值分别为  $71.48 \text{ mg/L}$  和  $6.25 \text{ mg/L}$ , C/TN 为 2.97, C/TP 为 35, 属南方城市典型低碳高氮磷污水.

## 1.3 检测项目与方法

pH 采用玻璃电极法; COD 采用快速密闭催化消解法; 氨氮( $\text{NH}_4^+-\text{N}$ )采用纳氏试剂分光光度法; 总氮(TN)采用碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法; 总磷(TP)采用过硫酸钾氧化-钼锑抗分光光度法; 硝态氮( $\text{NO}_3^- -\text{N}$ )采用紫外分光光度法; 亚硝态氮( $\text{NO}_2^- -\text{N}$ )采用 *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法测定; TN 与  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- -\text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- -\text{N}$  之差即为有机氮. 以上方法均参照文献 [13].

表 1 蚯蚓生态滤池进水水质指标/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Properties of the influent feed to earthworm ecofilter/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

pH	COD	TP	TN	$\text{NH}_4^+-\text{N}$	$\text{NO}_3^- -\text{N}$	$\text{NO}_2^- -\text{N}$
7.34 ~ 8.02	79.36 ~ 490.19	3.25 ~ 7.70	36.87 ~ 129.79	34.59 ~ 77.07	0.03 ~ 4.33	0.03 ~ 0.71

## 2 结果与分析

### 2.1 污水经蚯蚓生态滤池处理前后氮形态的变化

在 93 d 的试验期间, 进水中 TN 浓度范围为  $36.87 \sim 129.79 \text{ mg/L}$ , 平均为  $71.48 \text{ mg/L}$ ; 出水中 TN 浓度范围为  $15.15 \sim 74.34 \text{ mg/L}$ , 平均为  $47.78 \text{ mg/L}$ . 对不同形态的氮进行分析结果如图 2 所示, 进水中 TN 主要以  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  为主, 平均占 83.88%,

有机氮约占 14.23%, 而  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  和  $\text{NO}_2^- -\text{N}$  之和所占比例仅为 1.89%; 出水氮素则呈  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和有机氮减少,  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  和  $\text{NO}_2^- -\text{N}$  增加的态势, TN 以  $\text{NO}_3^- -\text{N}$  为主, 平均占 76.46%,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  约占 13.15%, 有机氮约占 8.17%,  $\text{NO}_2^- -\text{N}$  仅占 2.22%. 从图 2 可以看出, 氮素的形态在处理前后发生了很大的改变, 进水中的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  大多数转化为  $\text{NO}_3^- -\text{N}$ , 这表明在本试验条件下, 微生物活动以硝化作用为主.

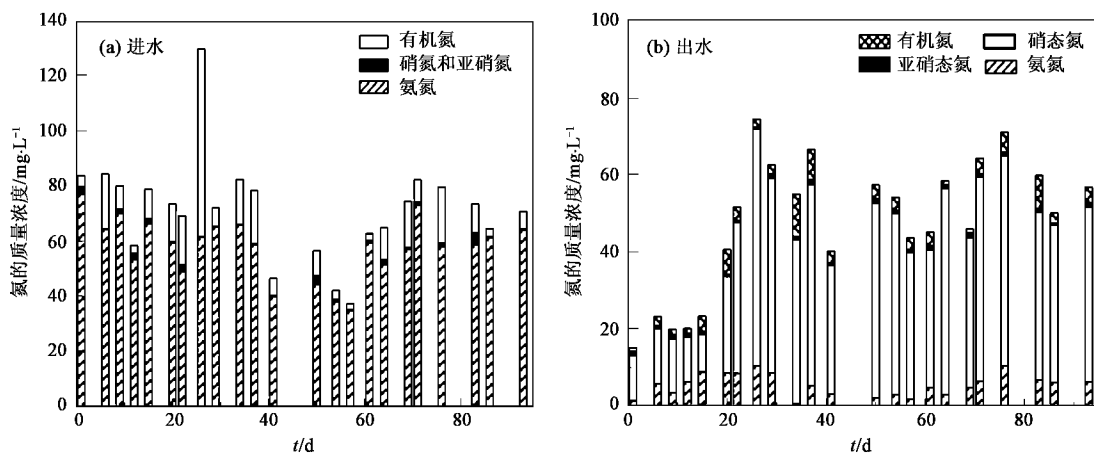


图 2 蚯蚓生态滤池进出水中各形态氮素浓度分布

Fig. 2 Distribution of various nitrogen species in inflow and outflow of earthworm ecofilter

### 2.2 滤池对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除作用

由图3可见,滤池出水平均NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N浓度为5.51 mg/L,可稳定达到GB 18918-2002的一级排放标准,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率均在80%以上,平均去除率为90.44%,总体去除效果良好。

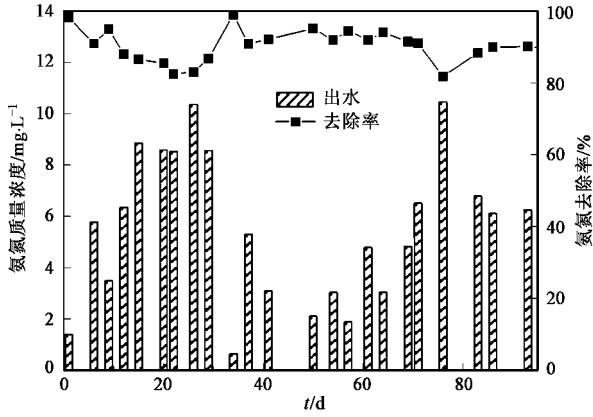


图3 蚯蚓生态滤池对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除效果

Fig. 3 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N removal efficiency by earthworm ecofilter treatment system

系统NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的去除途径主要有基质的吸附、微生物的作用、氨的挥发等。由于土壤胶体和蚯蚓排泄产生的蚓粪均带有负电荷,对污水中带正电荷的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N具有强烈的吸附作用<sup>[14]</sup>,当污水中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N进入系统后,很容易被土壤颗粒和蚓粪的活性位点所吸附截留,延长其滞留时间<sup>[15-17]</sup>。吸附在填料介质中的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N在好氧环境中,可通过硝化细菌的作用转化为NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,从而使介质恢复对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的吸附能力,实现基质和微生物协同去除NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N。

蚓粪不仅可以吸附NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,而且由于蚓粪中的微生物具有更高的活性,能促使有机氮的氨化和氨氮的硝化作用,同时蚯蚓在滤池中的穿梭觅食,不仅能疏通填料,还能增加滤池氧含量<sup>[10,18]</sup>,从而为被吸附的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的硝化创造更好的条件。滤池表面氨的挥发需要在系统pH>8.0的情况下发生,而本试验进水pH值在7.3~8.0之间,因此通过挥发损失的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N可以忽略不计<sup>[19]</sup>。

### 2.3 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的浓度动态变化

从图4可以看出,系统出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度比进水高很多,最高达61.47 mg/L,出水NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N也比进水要高,最高达1.36 mg/L,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N均表现出不同程度的积累。系统中积累的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N,主要是由被吸附在土壤颗粒和蚓粪中的氨氮的硝化作用所产生,它们的积累原因主要在于:①试验所用污水中的氮主要以NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N形态存在,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N的大量存在,一定程度上促进了硝化作用的进行,使得NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N的生成速率大于其去除速率,从而造成积累<sup>[20]</sup>;②填料对负电荷的NO<sub>3</sub><sup>-</sup>和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>没有吸附截留能力,不能被填料以离子交换、吸附等方式结合<sup>[7,45]</sup>;③蚯蚓在土壤层的活动改善了通风条件;④本试验采用干湿交替的运行方式,系统落干可以使渗滤介质中的空隙水排干,外界空气得以进入,利于空气中的氧向介质中扩散,促进附着在介质表面的微生物膜对氧的吸收和利用,从而加强了系统复氧,使得滤池厌氧条件较差;⑤C/N较低,可供利用的有机碳源少,无法满足反硝化作用的需要<sup>[2,3,21,22]</sup>;⑥由于滤池总有效高度只有50 cm,污水经过填料层的流速快,渗透性强,水力停留时间

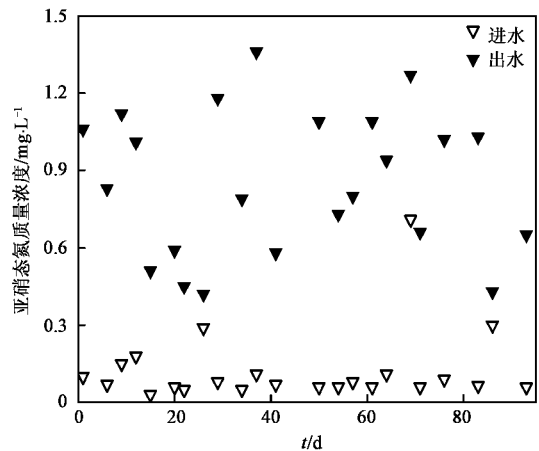
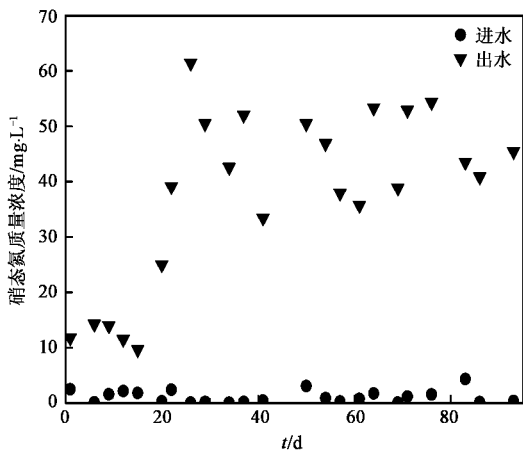


图4 蚯蚓生态滤池进出水NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N浓度变化

Fig. 4 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N concentration in influent and effluent of earthworm ecofilter

短,以致  $\text{NO}_3^-$  和  $\text{NO}_2^-$  来不及经过反硝化,随水流淋滤下移出滤池.综合以上分析可知,滤池反硝化过程受到限制,无法将  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 完全转化去除,从而造成积累.

## 2.4 滤池对 TN 的去除作用

蚯蚓生态滤池 TN 去除途径主要有有机氮的氨化、 $\text{NH}_4^+$ -N 的吸附截留、 $\text{NH}_4^+$ -N 的硝化及  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的反硝化脱氮等.进水 TN 以  $\text{NH}_4^+$ -N 为主,  $\text{NH}_4^+$ -N 的迁移、转化和降解是 TN 降解的主导原因<sup>[23]</sup>.

由图 5 可以看出,滤池对 TN 的去除动态趋势为先下降后缓慢增加,出水 TN 浓度波动较大, TN 平均去除率为 28.08%. 系统运行初期, TN 去除率较高,可以达到 60% 以上,这是因为系统对氨氮具有很好的吸附效果,而此时好氧硝化条件尚未完全形成,吸附的氨氮未被大量硝化.随着时间的推移,系统逐渐稳定,好氧硝化条件形成,被吸附的  $\text{NH}_4^+$ -N 大量转化为  $\text{NO}_3^-$ -N,系统中硝态氮和亚硝态氮含量迅速增加,而此时系统反硝化作用受到抑制,  $\text{NO}_3^-$ -N 大量积累,这样使得 TN 的去除率大为降低.系统运行至 50~60 d 时,大量的  $\text{NO}_3^-$ -N 被释放出来, TN 达到负去除率.60 d 后, TN 去除率缓慢回升,但依然不稳定.

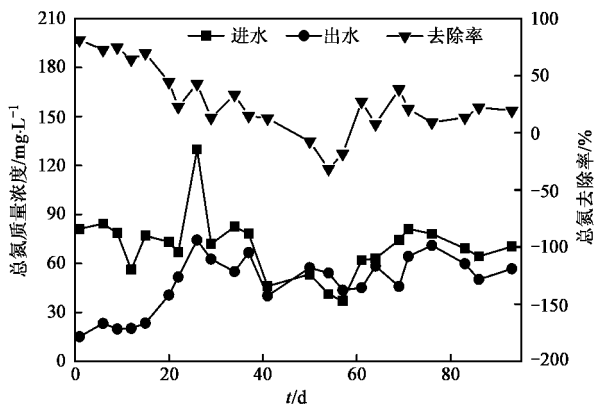


图 5 蚯蚓生态滤池对 TN 的去除效果

Fig. 5 TN removal effect in earthworm ecofilter

## 2.5 强化蚯蚓生态滤池总氮去除效果的途径分析

TN 的去除需要一个好氧-缺氧-厌氧交替的填料环境,从运行数据来看,氨氮去除率远高于总氮去除率, TN 去除率一直不高,说明滤池并没有提供一个适合反硝化菌的生长环境,缺氧和厌氧环境相对较弱,反硝化作用受到一定的限制,造成  $\text{NO}_3^-$ -N 和  $\text{NO}_2^-$ -N 的积累,从而使得出水 TN 含量较高.为提高

蚯蚓生态滤池总氮的去除效果,须加强硝态氮的去除能力<sup>[23]</sup>,以下一些措施可以强化系统硝态氮的去除:①改变湿干比,将湿干比由 1:5 提高至 1:3,减少落干时间,从而降低大气复氧,为反硝化创造较好的缺氧和厌氧环境;②延长基质的有效高度,将滤池加深,滤池中下部可以创造缺氧厌氧环境;③改变系统的出水管,系统出水在池底收集后,从滤池中部排出,这样可以延长水力停留时间,使得硝态氮有充足的时间进行反硝化反应;④将多级滤池串联,形成塔式蚯蚓生态滤池,可以提高脱氮效果;⑤提高进水 C/N,增加反硝化所需的有机碳源;⑥后接人工湿地,对滤池出水进行深度脱氮处理<sup>[3]</sup>.以上措施的采取,能有效改善 TN 的去除效果,从而达到强化脱氮的目的.

## 3 结论

(1) 进水 TN 为 36.87~129.79 mg/L,以  $\text{NH}_4^+$ -N 为主,平均占到 83.88%;出水 TN 为 15.15~74.34 mg/L,以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主,平均占到 76.46%,氮素的形态在处理前后发生了很大的改变.

(2) 蚯蚓生态滤池对不同形态氮的去除效果存在差异,其中对  $\text{NH}_4^+$ -N 的去除率均大于 80%,平均去除率为 90.44%,而  $\text{NO}_3^-$ -N 却大量积累,  $\text{NO}_2^-$ -N 有少量积累.

(3) 滤池对 TN 去除率波动较大,平均为 28.08%,整个系统硝化作用强,反硝化作用受到抑制,总体脱氮能力较差.可采取提高湿干比、改进滤池的构造、多级滤池串联、后接人工湿地和提高进水 C/N 等手段加以强化反硝化效果,提高整体的脱氮效果.

## 参考文献:

- [1] 冯华军. 分散式生活污水处理工艺开发及机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] Bachand P A M, Horne A J. Denitrification in constructed free water surface wetlands: I. Very high nitrate removal rates in a macrocosm study [J]. *Ecol Eng*, 1999, **14**(1-2): 9-15.
- [3] Baker L A. Design considerations and applications for wetland treatment of high-nitrate waters [J]. *Wat Sci Tech*, 1998, **38**(1): 389-395.
- [4] Gabriel M L, Maranger R, Brisson J, et al. Nitrogen transformations and retention in planted and artificially aerated constructed wetlands [J]. *Wat Res*, 2009, **43**(2): 535-545.
- [5] 李旭东, 周琪, 黄翔峰, 等. 高效藻类塘系统处理太湖地区农村生活污水[J]. *水处理技术*, 2006, **32**(6): 61-64.
- [6] 孙亚兵, 冯景伟, 田园春, 等. 自动增氧型潜流人工湿地处理农村生活污水的研究[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(3):

- 404-408.
- [ 7 ] 陈旻,肖亿群,邱江平. 蚯蚓生物滤池处理城市污水初步试验 [ J ]. 上海交通大学学报( 农业科学版 ), 2003, 21( 4 ): 336-339.
- [ 8 ] 郝桂玉,黄民生,徐亚同. 蚯蚓及其在生态环境保护中的应用 [ J ]. 环境科学研究, 2004, 17( 3 ): 75-77.
- [ 9 ] 杨健,王凤,杨键,等. 蚯蚓复合床渗滤系统去除污水中污染物的性能 [ J ]. 环境科学学报, 2008, 28( 10 ): 2000-2005.
- [ 10 ] 杨健,杨键,杨居川,等. 水力负荷对蚯蚓生物滤池污水处理效果的影响 [ J ]. 环境科学, 2008, 29( 7 ): 1890-1896.
- [ 11 ] Li Y S, Robin P, Cluzeau D, *et al.* Vermifiltration as a stage in reuse of swine wastewater: Monitoring methodology on an experimental farm [ J ]. *Ecol Eng*, 2008, 32( 4 ): 301-309.
- [ 12 ] Taylor M, Clarke W P, Greenfield P F. The treatment of domestic wastewater using small-scale vermicompost filter beds [ J ]. *Ecol Eng*, 2003, 21( 2-3 ): 197-203.
- [ 13 ] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [ M ]. ( 第四版 ). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 102-284.
- [ 14 ] 吉方英,罗固源,周健,等. 蚯蚓与污水土地处理试验研究 [ J ]. 重庆环境科学, 1998, 20( 4 ): 12-15.
- [ 15 ] 张军,周琪,何蓉. 表面流人工湿地中氮磷的去除机理 [ J ]. 生态环境, 2004, 13( 1 ): 98-101.
- [ 16 ] 张建,黄霞,施汉昌,等. 地下渗滤系统在污水处理中的应用研究进展 [ J ]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3( 4 ): 47-51.
- [ 17 ] 张政,付融冰,顾国维,等. 人工湿地脱氮途径及其影响因素分析 [ J ]. 生态环境, 2006, 15( 6 ): 1385-1390.
- [ 18 ] 韩润平,陆雍森,杨健,等. 复合床生态滤池处理城市污水中试研究 [ J ]. 环境科学学报, 2004, 24( 3 ): 450-454.
- [ 19 ] 方彩霞,罗兴章,郑正,等. 改进型蚯蚓生态滤池处理生活污水研究 [ J ]. 中国给水排水, 2009, 25( 1 ): 22-25.
- [ 20 ] 张志勇,冯明雷,杨林章,等. 人工模拟污水净化系统去除生活污水氮、磷效果的比较研究 [ J ]. 土壤学报, 2008, 45( 3 ): 466-475.
- [ 21 ] Huett D O, Morris S G, Smith G, *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands [ J ]. *Wat Res*, 2005, 39( 14 ): 3259-3272.
- [ 22 ] 谭洪新,刘艳红,周琪,等. 添加碳源对潜流 + 表面流组合湿地脱氮除磷的影响 [ J ]. 环境科学, 2007, 28( 6 ): 1209-1215.
- [ 23 ] 黄翔峰,闻岳,何少林,等. 高效藻类塘对农村生活污水的处理及氮的迁移转化 [ J ]. 环境科学, 2008, 29( 8 ): 2219-2226.