

多级蚯蚓生态滤池处理生活污水研究^{*}

郭飞宏^{1,2} 方彩霞^{1,2} 罗兴章³ 张继彪^{1,2} 郑正^{3**}

(1. 南京大学污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京, 210093; 2. 南京大学环境学院, 南京, 210093;

3. 复旦大学环境科学与工程系, 上海, 200433)

摘 要 采用多级蚯蚓生态滤池对生活污水进行处理研究, 考察多级蚯蚓生态滤池对污水中各类污染物的去除效果. 试验结果表明, 多级蚯蚓生态滤池连续运行 80d, 滤池对 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TP 的去除效果良好, 去除率分别为 80.4%—98.6%、95.5%—99.5% 和 93.7%—99.7%, 出水水质符合要求. 但是滤池对 TN 去除效果不稳定, 不加碳源 TN 去除率降低, 最低为 26.0% 左右, 添加碳源后 TN 去除率维持在 60% 左右. 其中进水中 C/N 比为 3.07, 出水中一级滤池、二级滤池和三级滤池的 C/N 比分别为 1.56、0.88 和 0.72, 沿程水样 C/N 比呈逐级下降的趋势. 运行 22d 后, 在二级滤池出水中添加葡萄糖调节 C/N 比为 3—6, 总氮去除率上升. 对 TN 去除研究分析, 推断出碳源不足是 TN 去除率降低的重要原因. 相比单级的蚯蚓生态滤池, 多级蚯蚓生态滤池生活污水处理的更加彻底, 应用前景更加广泛.

关键词 多级蚯蚓生态滤池, 碳源, 生活污水, 去除效果.

近年来, 在工业和城镇污染得到控制后, 量大面广的农村生活污水成为加速湖泊富营养化进程的主要原因之一^[1]. 蚯蚓生态滤池是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, 主要根据蚯蚓能够提高土壤通气透水性能和促进有机物质的分解而设计, 具有投资省、处理效率高、管理简单等优点^[2]. 然而, 单级蚯蚓生态滤池对总氮的去除效果不是很突出. 当进水流量大、污染物较多时, 单级的蚯蚓生态滤池处理效率降低, 影响出水水质. 同时由于单级蚯蚓生态滤池水力停留时间短, 反硝化作用较差, 硝态氮部分积累, 因此单级蚯蚓生态滤池的处理效果难以满足排放要求^[3].

本文针对单级蚯蚓生态滤池的不足, 发展了三级蚯蚓生态滤池(相对于二级蚯蚓生态滤池总氮去除效果好, 相对于四级蚯蚓生态滤池成本低). 试验以南京大学宿舍化粪池出水为研究对象, 系统考察了多级蚯蚓生态滤池对 COD_{Cr} 、N 和 P 的去除效果, 并对机理进行了探讨.

1 实验部分

1.1 多级蚯蚓生态滤池的设计

多级蚯蚓生态滤池试验装置示意图如图 1. 装置材料为 PVC, 由 3 级滤池组成. 1 级和 2 级的尺寸(长×宽×高)为 0.5 m×0.5 m×0.6 m, 3 级的尺寸为 1.1 m×0.65 m×1.2 m. 滤池填料包括土壤、细砂、碎青石和鹅卵石等(由于试验中多级蚯蚓生态滤池无污泥产生, 无需设置泥水分离的沉淀室). 1 级和 2 级基质有效高度为 0.55 m, 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, 10 cm; 粒径 0—2 mm 细砂, 10 cm; 30 cm 土壤层. 3 级基质有效高度为 1.1 m, 从底部至顶部依次填充: 粒径 25—40 mm 鹅卵石, 20 cm; 粒径 5—20 mm 碎青石, 30 cm; 粒径 0—2 mm 细砂, 30 cm; 30 cm 土壤层.

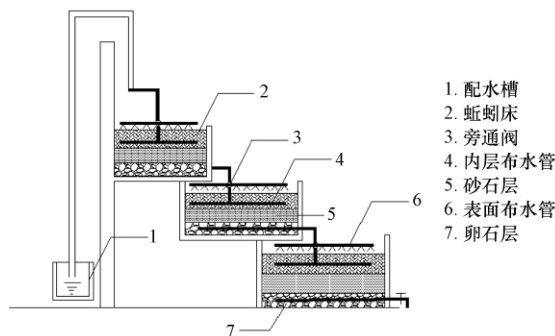


图 1 多级蚯蚓生态滤池结构

Fig. 1 Structure of multistage earthworm ecofilter

2009 年 12 月 10 日收稿.

^{*} 国家水体污染控制与治理科技重大专项“太湖富营养化控制与治理技术及工程示范项目”.

^{**} 通讯联系人, Tel: 13770695594; E-mail: zzheng@nju.edu.cn

每一级滤池表面均栽种吊钟柳,起到二次布水作用缓解水力冲刷对蚯蚓的影响,栽种密度为 $24 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$. 试验使用的蚯蚓为大平 2 号,属于赤子爱胜蚓,蚯蚓生活在土壤层,蚯蚓在土壤中的接种密度为 $4.63 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. 一般蚯蚓的活动温度为 $5^{\circ}\text{C} \sim 35^{\circ}\text{C}$,生长繁殖最适宜温度为 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$. 试验选择在 4 月、5 月、6 月,三个月的平均温度在 $15^{\circ}\text{C} \sim 25^{\circ}\text{C}$ 范围内适于蚯蚓活动.

1.2 试验方法

装置构建于 2009 年 2 月,运行一个月后开始本试验. 采用蠕动泵控制进水,布水由穿孔管完成. 采用间歇进水方式,水力负荷为 $0.25 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,每天进水 6 h,进水与落干的时间(即湿干比)为 1:3^[4]. 试验用水为南京大学学生宿舍化粪池出水,进水水质指标见表 1,该水质在试验期间变化幅度较大.

表 1 多级蚯蚓生态滤池进水水质指标
Table 1 Characteristic of raw water to multistage earthworm ecofilter

$T/^{\circ}\text{C}$	pH	DO $/(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	COD_{Cr} $/(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	TP $/(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	TN $/(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$	$\text{NH}_4^{+}\text{-N}$ $/(\text{mg} \cdot \text{l}^{-1})$
7.0—30.9	7.3—8.3	0.4—1.4	117.9—382.6	5.1—9.9	55.3—93.5	51.8—89.8

1.3 测试分析方法

在系统运行过程中,每 3 d 监测 1 次水质,监测当天上午 10:00 取样,当天分析完毕. 常规水质分析项目的分析方法: 化学需氧量(COD_{Cr})采用快速密闭催化消解法; 氨氮($\text{NH}_4^{+}\text{-N}$)采用纳氏试剂光度法; 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^[5].

2 结果与分析

2.1 COD_{Cr} 去除效果分析

图 2 与图 3 显示多级蚯蚓生态滤池对 COD_{Cr} 的去除效果. 进水 COD_{Cr} 浓度波动较大,最高达到 $382.6 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$,但三级出水 COD_{Cr} 浓度均低于 $50 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$,稳定达到 GB18918—2002 城镇污水一级排放标准. 这表明多级蚯蚓生态滤池具有较强的耐冲击负荷的能力.

一级滤池 COD_{Cr} 的去除率为 $36.0\% \sim 86.5\%$,平均为 60.7% ; 二级滤池去除率 $71.1\% \sim 92.9\%$,平均为 79.9% ; 三级去除率也就是总去除率 $80.4\% \sim 98.6\%$,平均为 91.3% . 可见 COD_{Cr} 的去除主要集中在第一级滤池,第二级和第三级起深度净化的作用. 进入系统中的污水由于滤料的截留和吸附作用,使得其中的大分子有机物吸附在滤料表面. 大分子有机物经过蚯蚓的破碎分解形成小分子有机物,这些小分子有机物迅速被微生物降解利用^[6]. 蚯蚓在土壤中不仅能破碎分解大分子有机物,而且可以其生理活动形成许多土壤孔隙,使得落干时复氧更充分,充足的氧含量进一步促进了微生物对有机物的降解利用^[7].

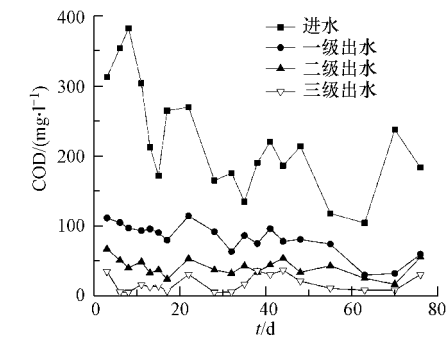


图 2 多级蚯蚓生态滤池进出水 COD_{Cr} 浓度变化
Fig. 2 Variations of influent and effluent COD_{Cr} concentration through multistage earthworm ecofilter

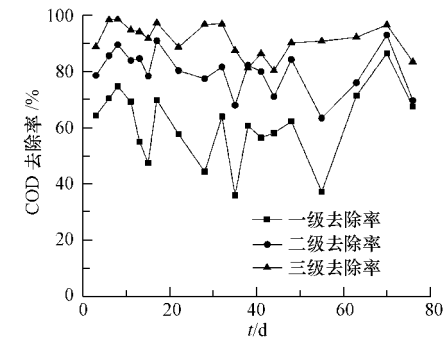
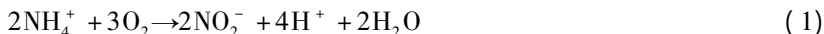


图 3 多级蚯蚓生态滤池 COD_{Cr} 去除率
Fig. 3 COD_{Cr} removal efficiency of multistage earthworm ecofilter

2.2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果分析

从图4和图5可以看出,进水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化大,最高可达 $89.8 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$,平均为 $67.4 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$;一级和二级滤池出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化较大,三级滤池出水的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 均低于 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$;虽然一级和二级滤池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率波动较大,但三级滤池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率却稳定达到95%以上。由此可见,多级蚯蚓生态滤池对氨氮具有很好的去除效果,显示出系统对氨氮具有很强的抗冲击能力和稳定性。系统 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除途径主要有填料的吸附与截留、微生物的作用和氨的挥发^[8-9]等。由于人工土颗粒和蚓粪颗粒表面均带有负电荷,带正电的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 很容易被填料颗粒吸附截留。在好氧环境中,如方程式(1)和(2)所示被吸附截留的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在微生物的作用下通过硝化作用转化为 NO_2^- 和 NO_3^- ,使填料迅速恢复对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的吸附能力^[10]。



蚯蚓在土壤层的活动,可以提高填料中氧的含量,更利于硝化作用的进行。氨的挥发在本试验中可以忽略不计,因为进水 pH 值在 7.3—8.3 之间,而氨的挥发需在 pH 大于 8.0 的情况下发生^[11-12]。

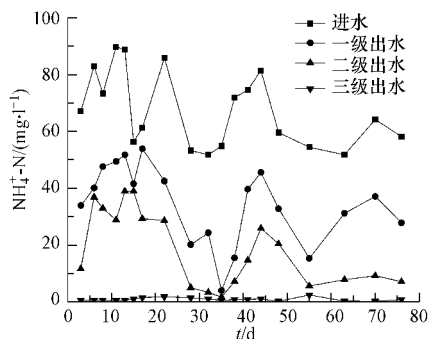


图4 多级蚯蚓生态滤池进出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 4 Variations of influent and effluent $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration through the multistage earthworm ecofilter

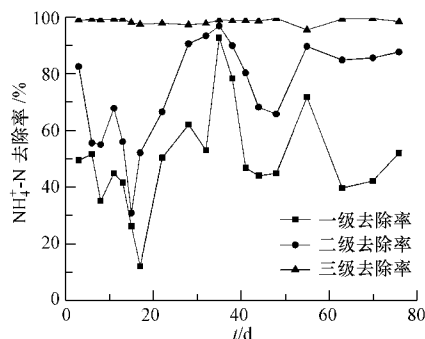
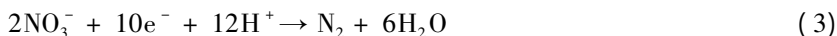


图5 多级蚯蚓生态滤池对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率

Fig. 5 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ removal efficiency of the multistage earthworm ecofilter

2.3 TN 的去除效果分析

污水中的氮主要以氨氮形式存在,氮是污水土地处理系统中最难以去除的物质^[13]。总氮(TN)的去除主要包括氨氮的吸附截留,吸附的氨氮在有氧条件下经硝化细菌作用,转化为硝态氮和亚硝态氮,硝态氮和亚硝态氮由于带负电,不能被带负电的填料颗粒吸附,只能由反硝化细菌在厌氧或缺氧条件下还原为气态氮化物(N_2)。还有一部分氮被植物吸收转化^[14],如方程式(3)所示。



因此系统的氧化还原环境、碳源和硝化反硝化菌群的生态活性在氮素去除中起决定性作用^[15]。

由图6和图7可以看出,TN去除率先下降后增加,平均去除率为26.0%—82.1%,变化幅度较大。系统运行初期,TN去除率很高,可以达到80%以上,随后TN去除率逐步下降,运行至第35天时,TN去除率达到最低值(26%),之后,随着时间的推移,TN去除率逐步升高,运行55d后,TN去除率基本维持在60%以上。产生这种现象的原因在于系统对氨氮具有很好的吸附效果,运行初期被吸附的氨氮转化速率较低,随着系统的运行,吸附的氨氮大量转化成硝态氮。而由于进水、一级出水、二级出水和三级出水的平均C/N比分别为3.07、1.56、0.88和0.72(由图2和图7计算而得),呈逐级下降的趋势,其中二级出水碳源消耗最为严重,碳源供应不足是反硝化作用的限制因素^[16]。因此反硝化作用受到抑制,硝态氮大量积累,不能从系统中除去,造成TN去除率降低。为了解决碳源供应不足的问题,运行22d后,在二级滤池出水中添加葡萄糖(每天加20g葡萄糖)调节C/N比为3—6,经过20d的适应驯化后,总氮去除率基本保持在60%左右。在本系统中,反硝化作用是整个生物脱氮过程的限速步骤,而碳源不足是导致反硝化受到抑制的重要原因,因此提高沿程水样的C/N比,碳源供应充足,是保证反硝化脱氮顺畅进

行的重要举措^[17].

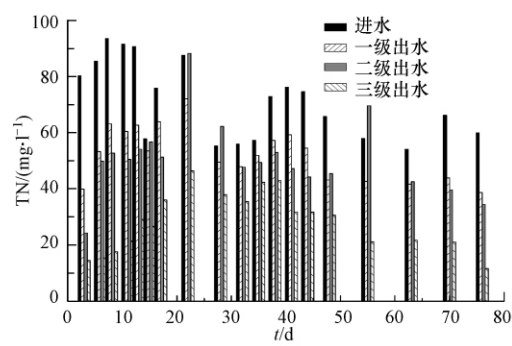


图6 多级蚯蚓生态滤池进出水 TN 浓度变化

Fig.6 Variations of influent and effluent TN concentration through the multistage earthworm ecofilter

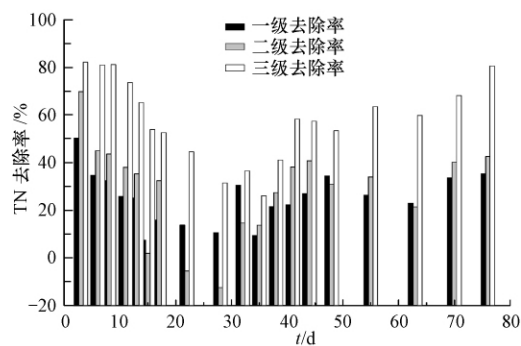


图7 多级蚯蚓生态滤池 TN 去除率

Fig.7 TN removal efficiency of the multistage earthworm ecofilter

2.4 TP 去除效果分析

磷是造成水体富营养化的限制性营养物质,必须严格控制.从图8和图9可以看出进水中TP含量较高,波动性大,而三级出水TP浓度几乎为零,三级去除率稳定达到93%以上,表现出很高的除磷能力.

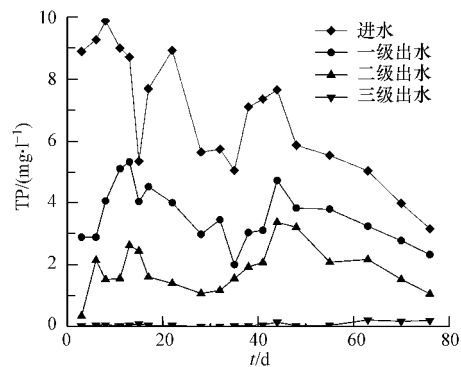


图8 多级蚯蚓生态滤池进出水 TP 浓度变化

Fig.8 Variations of influent and effluent TP concentration through the multistage earthworm filter

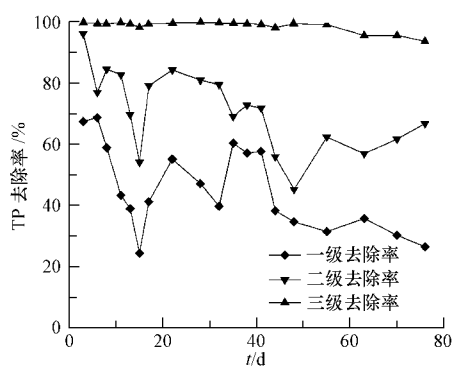


图9 多级蚯蚓生态滤池 TP 去除率

Fig.9 TP removal efficiency of the multistage earthworm ecofilter

污水或土壤溶液中的磷酸根离子很容易与土壤中大量存在的Ca²⁺、Al³⁺等离子发生反应,生成各种难溶性磷酸盐,因此系统对磷通常有很高的去除率.

多级蚯蚓生态滤池除磷的途径有填料的吸附作用、化学沉淀反应、共沉、离子交换和微生物同化作用^[18],而最主要的途径为填料的吸附作用和化学沉淀反应,这些途径取决于填料的理化性质.蚯蚓的活动形成管道和团粒状蚯蚓粪,具有毛细作用强和吸附容量大等特点,对TP亦具有较好的吸附作用^[19].

3 结论

- (1) 多级蚯蚓生态滤池对COD_{Cr}、NH₄⁺-N和TP有更好的去除效果,去除率分别达到了80.4%—98.6%、95.5%—99.5%和93.7%—99.7%,达到国家污水综合排放一级标准,具有推广示范作用. TN去除率变化较大,这主要是沿程中C源的消耗造成的.为此,在二级出水末端外加C源,去除率明显上升.
- (2) 多级蚯蚓生态滤池的一级池、二级池、三级池在去除氮、磷和有机物时,发挥的主要作用各不相同.污水首先进入一级池,去除有机物(COD_{Cr})时一级滤池作用最为突出.同时,三级滤池在氮的去除方面发挥作用较大.磷的去除主要是靠填料的吸附作用和化学沉淀,三个滤池的作用基本相同.
- (3) 多级蚯蚓生态滤池由于成本低、运行管理简单、占地面积少等优点,具有很好的市场前景.

参 考 文 献

- [1] 金相灿,叶春,颜昌宙,等.太湖重点污染控制区综合治理方案研究[J].环境科学研究,1999,12(5):1-5
- [2] 梁祝,倪晋仁.农村生活污水处理技术与政策选择[J].中国地质大学学报(社会科学版),2007,(3):18-22
- [3] 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
- [4] 方彩霞,罗兴章,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,(01):22-25
- [5] 国家环保总局编.水和废水监测分析方法(第四版)[M].北京:中国环境科学出版社,2002:102-284
- [6] Whalen J K, Parmelee R W, McCartney D A, et al. Movement of N from decomposing earthworm tissue to soil, microbial and plant N pools, Soil Biol [J]. Biochem 1999, 31(4):487-492
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Zou J L, Dai Y, Sun T H, et al. Effect of amended soil and hydraulic load on enhanced biological nitrogen removal in lab-scale SWIS [J]. Hazard Mater, 2009, 163(2/3):816-822
- [10] Ye F X, Li Y. Enhancement of nitrogen removal in tower hybrid constructed wetland to treat domestic wastewater for small rural communities [J]. Ecol Eng, 2009, 35(7):1043-1050
- [11] Kadam A M, Nemade P D, Oza G H, et al. Treatment of municipal wastewater using laterite-based constructed soil filter [J]. Ecol Eng, 2009, 35(7):1051-1061
- [12] Zurita F, Anda J D, Belmont M A. Treatment of domestic wastewater and production of commercial flowers in vertical and horizontal subsurface-flow constructed wetlands [J]. Ecol Eng, 2009, 35(5):861-869
- [13] 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
- [14] 韩润平,杨健.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):451-454
- [15] Lin Y F, Jing S R, Lee D Y, et al. Nitrate removal from groundwater using constructed wetlands under various hydraulic loading rates [J]. Bioresour Technol, 2008, 99(16):7504-7513
- [16] 杨新萍,周立祥,戴媛媛,等.潜流人工湿地处理微污染河道水中有机物和氮的净化效率及沿程变化[J].环境科学,2008,29(8):2177-2182
- [17] Healy M G, Rodgers M, Mulqueen J. Treatment of dairy wastewater using constructed wetlands and intermittent sand filters [J]. Bioresour Technol, 2007, 98(12):2268-2281
- [18] 叶建锋,徐祖信,李怀正,等.模拟钢渣垂直潜流人工湿地的除磷性能分析[J].中国给水排水,2006,22(9):62-64
- [19] 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

STUDY ON MULTISTAGE EARTHWORM ECOFILTER FOR SEWAGE TREATMENT

GUO Feihong^{1,2} FANG Caixia^{1,2} LUO Xingzhang³ ZHANG Jibiao^{1,2} ZHENG Zheng³

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;

2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing, 210093, China;

3. Department of Environmental Science and Engineering, Fudan University, Shanghai, 200433, China)

ABSTRACT

Under the condition of sewage treatment with the use of a multistage earthworm ecofilter, removal efficiencies of various pollutants were investigated. The results showed that in continuous operation for 80 days, the multistage earthworm ecofilter removal efficiency for COD_{Cr} , NH_4^+-N , TP was 80.4%—98.6%, 95.5%—99.5%, 93.7%—99.7% respectively, and the effluent quality met the national standards. However, removal efficiency of TN was unstable ranging from 26% to 60%. TN removal efficiency was as low as 26% without carbon source, but could be maintained at 60% after addition of carbon source. C/N ratio decreased along the multistage earthworm ecofilter. The average ratio for the influent, first stage, second stage and third stage was 3.07, 1.56, 0.88, 0.72, respectively. After 22 days operation, C/N ratio was adjusted to 3—6 by adding glucose, and TN removal efficiency reversed to increase slowly. It was postulated that lack of carbon source was the main reason for lowered TN removal efficiency. Compared to single-stage filter, multistage earthworm ecofilter basically meets the requirements of advanced treatment, and has a broad application prospect.

Keywords: multistage earthworm ecofilter, carbon source, sewage, removal efficiency.