

# 串联式垂直流生态滤池处理农村生活污水的试验研究

王永谦<sup>1,2</sup>, 杨林章<sup>1\*</sup>, 冯彦房<sup>1,2</sup>, 李天玲<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要:** 对串联式垂直流生态滤池处理农村生活污水进行了为期 5 个月的现场试验研究。结果表明: 通过该工艺, 污水中的 COD、氨氮、总氮和总磷等污染物均得到了有效去除, 在进水 COD、氨氮、总氮和总磷平均质量浓度为 73.19、25.08、48.55、0.55 mg·L<sup>-1</sup> 时, 平均去除率依次为 65.6%、71.6%、58.7%、86.9%。COD、氨氮和总磷的去除主要发生在第一级生态滤池的进水 0~40 cm 阶段, 而总氮浓度基本呈均匀下降趋势。串联式生态滤池对各污染指标较好的去除效果也证明了其是一种适合农村分散式污水处理、解决农村污水肆意排放的新途径。

**关键词:** 串联式垂直流生态滤池; 生活污水; 分散式污水; 农村地区

**中图分类号:** X799.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2011) 02-0332-05

近年来, 太湖水污染尤其是富营养化日趋严重, 当地农村人口密集, 排污量大, 农村生活污水排放对太湖污染的贡献率中氮占 25%、磷占 34%<sup>[1-2]</sup>。在工业和城镇污染得到控制后, 量大而面广的农村生活污水成为加速太湖富营养化进程的主要原因。因此, 研究开发高效脱氮除磷的农村生活污水治理技术具有迫切而现实的意义。

生态滤池处理工艺类似于人工湿地, 是一项以基质、植物及微生物协同通过物理、化学和生物作用进行污水处理的微型生态系统, 其工艺设备简单、建造运行费用低、运行维护管理方便, 适合用在分散农户及相对集中型农村生活污水治理中<sup>[2-5]</sup>。本试验构建了串联式生态滤池小试装置, 以农村生活污水为处理对象, 系统研究了污染物沿水流方向的沿程变化趋势, 试图揭示生态滤池体系对污染物的净化机理, 以为生态滤池在太湖流域处理农村分散式生活污水的处理提供技术参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 生态滤池构建及采样点的设置

串联式垂直流人工湿地系统如图 1 所示, 由柱体 A 和 B 串联而成, 滤池池体均由内径 40 cm 的 PVC 柱制成, 滤池底部设有 30 cm 的排水层; 从底向上依次装填为 10 cm 卵石层、10 cm 碎石层、10 cm 细砂层、土壤填料层(池体 A, 40 cm; 池体 B, 20 cm); 土壤填料是特殊配置的人工土, 由当地土壤、锯木屑及铁矿粉渣按照体积比 10 : 3 : 1 配成; 实验通过添加锯末屑提高土壤有机质, 以改善进水 C/N 比较低的问题, 为反硝化菌提供碳源<sup>[6-8]</sup>; 同时通过添加铁矿粉渣提高系统的除磷效果<sup>[9-10]</sup>。生态滤池 A 底部种植美人蕉(*Canna generalis*), 生态滤池 B 无

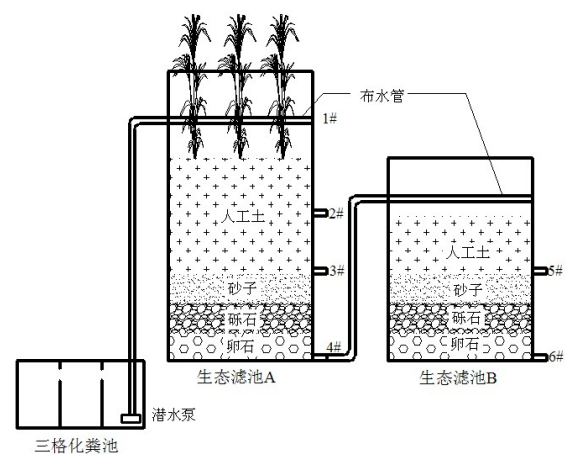


图 1 串联式垂直流生态滤池组合工艺流程

Fig. 1 Structure of serial vertical-flow filters

植物种植。生态滤池 A 自低向上 50、30、0 cm 沿程设 3 根水样采集管, 分别为采样口 2#、3#、4#, 生态滤池 B 自底以上 30、0 cm 设置 2 根水样采集管, 分别为采样口 5#、6#。

### 1.2 试验设置及工艺流程

该试验设置在江苏省无锡市胡埭镇龙延村居民生活区。该居民区的废水管道收集系统较为完善, 每 1~2 户共享 1 个化粪池。实验流程如图 1 所示。居民生活污水首先经管道汇集至三格化粪池; 污水再经泵提升进入第一级垂直流生态滤池 A 进行初降解, 并长期保持池体 A 的 55 cm 淹水状态; 废水反应结束后, 生态滤池 A 的底部出水, 在经重力压差布水后, 再次从 50 cm 高的第二级生态滤池 B 顶部进水。系统出水经取样分析后排放。系统采用间歇式进水、连续出水, 水力负荷 30 cm·d<sup>-1</sup>, 单

**作者简介:** 王永谦(1985 年生), 男, 博士研究生, 主要从事人工湿地与面源污染控制研究。

\*通信作者: 杨林章。E-mail: lzyang@issas.ac.cn

收稿日期: 2011-01-06

次布水时间和落干时间之比 1 : 7 (每 4 h 进水 30 min)。

### 1.3 测定方法及统计方法

测定方法: COD, 重铬酸钾消解法;  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN, Skalar 公司 SA-4000 型流动分析仪; TP, 钼蓝比色法。

统计方法: 采用 SPSS 13.0 进行单因素方差分析(the one-way ANOVA)。

## 2 结果与讨论

实验于 2009 年 8 月运行, 于 2010 年 3—7 月对实验进水和出水进行了每周 1 次的分析检测, 结果如表 1 所示。

### 2.1 COD 的去除

串联式垂直流生态滤池对于 COD 有着较理想的处理效果, 如表 1 所示, 试验期间进水 COD 质量浓度在  $91.04\sim 521.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值  $212.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ; 系统出水质量浓度为  $30.95\sim 114.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均质量浓度变为  $73.19\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 系统的 COD 平均去除率为 65.6%。生活污水在经过一级生态滤池后, 平均质量浓度变为  $122.3\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其对整个系统去除 COD 的平均贡献率为 64.8%; 二级生态滤池对系统降解 COD 的平均贡献率为 35.2%。一级生态滤池对污水的 COD 去除占较为主要的作用, 究其原因一方面在于土壤填料对于污水中的杂质颗粒的机械截留作用, 更重要的还是土壤基质表面生物膜的接触絮凝、生物氧化作用。同时, 第一级生态滤池所种植的美人蕉也是造成这一差异的原因, 植物通过根系供养、根系分泌物质等行为改变滤池微生境, 促进有机污染物的氧化分解<sup>[11,16]</sup>。

沿程采样的结果表明, 如图 2 所示, 串联式垂直流生态滤池对有机物的降解主要集中在进水端的 0~40、70~120 cm 段, 进水前后有显著的质量浓度差异( $P_{1,3}=0.006$ ,  $P_{4,6}=0.150$ )。这种降解规律主要是与生态滤池表层较好充氧能力有关: 系统采用推流式进水, 填料表层不断布水落干, 适合异养好氧菌的大量快速的繁殖, 从而获得比较高的 COD 降解效率。而在一级生态滤池的 40~70 cm 阶段, COD 值出现了略有上升的趋势, 这是因为上层未降解的有机质在垂直流系统的底端区域沉积, 影响了出水水质<sup>[9]</sup>, 但统计学结果表明这一阶段的 COD 值增加

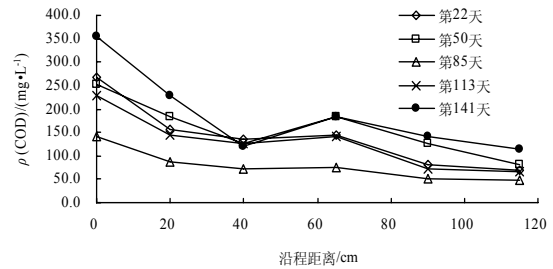
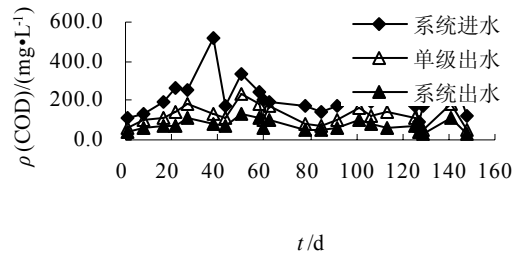


图 2 COD 的质量浓度变化曲线

Fig.2 The Changes of COD concentration

量并不显著( $P_{3,4}=0.182$ ), 这一结论需在今后的实验研究中进一步证明。

### 2.2 氮的去除

实验期间的总氮质量浓度与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度均起伏较大, 一级滤池出水及系统出水的总氮质量浓度与  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  质量浓度变化如表 1 及图 3、图 4 所示。实验期进水总氮平均质量浓度为  $117.6\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  平均质量浓度为  $88.37\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 一级生态滤池去除了进水中 49.4% 的总氮、51.3% 的氨态氮, 二级生态滤池进一步去除了 9.3% 的总氮和 20.3% 的  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 。表 1 的去除贡献率的结果表明, 系统对总氮的去除主要发生在一级生态滤池, 而  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  在两级生态滤池中均有不同程度的去除。系统对  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的去除主要是依靠好氧微生物的硝化作用, 系统进水采用间歇式进水的方式, 滤池土壤填料维持着淹水-下渗-闲置-再淹水的过程, 有利于氧气在介质空隙中的传递, 同时第一级滤池植物的根系供氧作用<sup>[16]</sup>, 有利于铵根离子在滤池内部发生硝化作用。而水体总氮的去除过程, 除无机氮首先通过硝化作用转化为  $\text{NO}_x\text{-N}$ , 还需再进一步通过反硝化作用最终转化为气体, 在第二级生态滤池中 TN 去除率不高, 说明其并没有提供一个适合反

表 1 串联式垂直流生态滤池工艺处理效果

Table 1 Treatment effect of combined process

项目	$\rho(\text{进水})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{单级出水})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho(\text{系统出水})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	系统去除率/%	一级滤池贡献率/%	二级滤池贡献率/%
COD	212.84	122.33	73.19	65.6	64.8	35.2
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	88.37	43.03	25.08	71.6	71.6	28.4
Total N	117.66	59.54	48.55	58.7	84.1	15.9
Total P	4.20	1.23	0.55	86.9	81.2	18.8

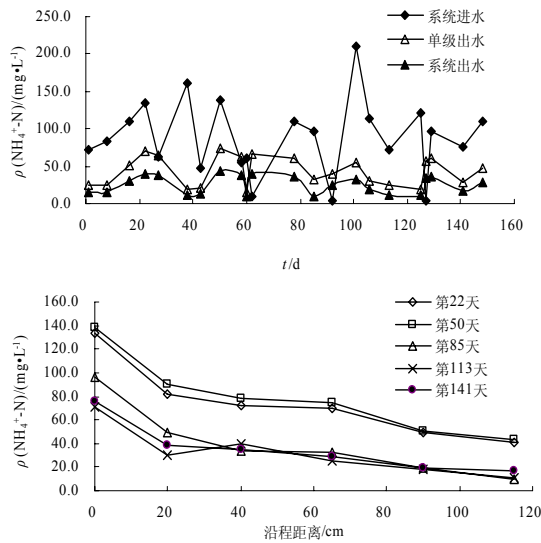
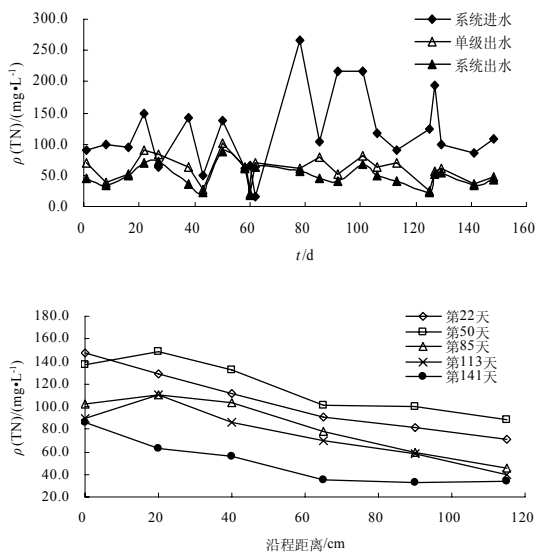
图3  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度变化曲线Fig.3 The Changes of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  concentration

图4 TN 的质量浓度变化曲线

Fig.4 The Changes of Total N concentration

硝化细菌的生长环境, 缺氧和厌氧环境相对较弱, 反硝化作用受到限制; 而第一级生态滤池除考虑到滤池植物对水中的总氮的吸收能力<sup>[12]</sup>, 由于其基质层较高, 在滤池中下部易形成缺氧环境, 且底部的淹水深度延长了水力停留时间, 某种程度上增加了反硝化过程的反应时间, 这些条件都有利于总氮的去除。

由沿程去除曲线可知(图3),  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的沿程去除趋势与 COD 的去除曲线类似,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的质量浓度也随水流的推进而呈现逐级下降的趋势,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的显著去除阶段亦在 0~40 cm 段( $P_{1,2}=0.040$ ,

$P_{2,3}=0.017$ ), 这两端基质层由于进水充氧及植物根系输氧作用使的表层滤池的溶解氧质量浓度较高, 有利于  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  的氧化降解而转化成  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  或  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 。在一级生态滤池的 20~40 cm 基质层, 个别出现了升高的现象, 这是由于进水中的有机氮经过氨化作用转化成了  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , 动力学角度而言, 氨化过程比硝化快, 因此出现了氨氮质量浓度有沿着水流流向增加的趋势<sup>[15]</sup>。而 TN 的沿程变化曲线见图 4, TN 质量浓度沿程呈现较均匀的下降趋势, 基质层之间的进出水差异均不显著( $P_{1,2}=0.980$ ,  $P_{2,3}=0.483$ ,  $P_{3,4}=0.216$ ,  $P_{4,5}=0.605$ ,  $P_{5,6}=0.510$ ), 有研究表明, 湿地系统中 85% 以上的氮的去除来自反硝化作用<sup>[8,14]</sup>, TN 去除与基质层的缺氧/厌氧状态有关, 而理论上湿地沿程均具有反硝化能力, 所以 TN 质量浓度沿程呈现了这种变化趋势。

### 2.3 磷的去除

试验期间的进水总磷质量浓度在 0.82~7.98  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  之间, 平均质量浓度为 4.20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其进出水的质量浓度随时间变化, 如图 5 所示, 试验所用污水的总磷质量浓度波动较大, 但系统出水较为稳定。当污水进入一级生态滤池后, 总磷质量浓度降为 0.19~4.38  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均质量浓度为 1.23  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 较进水中总磷质量浓度有平均 70.7% 的去除; 系统出水质量浓度为 0.30~1.20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 平均值为 0.55  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ , 系统对进水总磷的平均去除率为 86.9%。

沿程采样的结果表明(图 5), 系统对于总磷的去除主要发生在进水后的 40 cm ( $P_{1,2}=0.010$ ,  $P_{2,3}=0.006$ )。普遍认为, 磷的主要去除途径是填料吸附、植物固定和生物聚集三种方式, 但实际研究表明, 植物固定和生物聚集对湿地系统污水处理磷

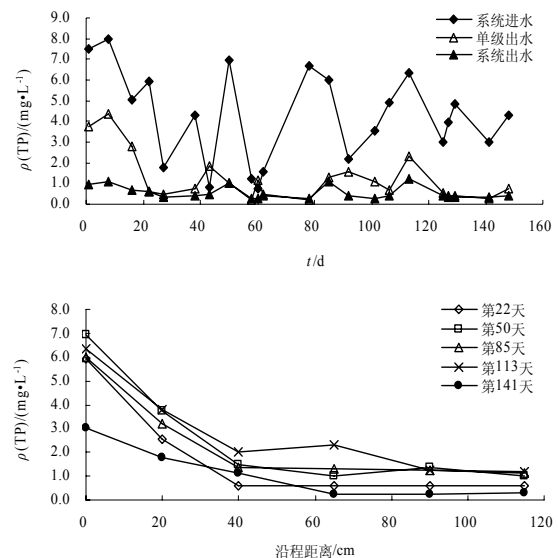


图5 TP 的质量浓度变化曲线

Fig.5 The Changes of Total P concentration

的去除贡献其实并不大<sup>[16-17]</sup>, 主要还是通过基质吸附沉淀的方式。试验所采用的人工土壤填料中因为含有铁矿废渣, 对 TP 吸附降解作用很大。有研究表明<sup>[13]</sup>, 污水中可溶性磷酸盐容易与基质中的 Fe<sup>3+</sup>、Al<sup>3+</sup>、Ca<sup>2+</sup>等金属离子、金属氧化物和氢氧化物以及粘土矿物通过配位体交换作用发生吸附和沉淀反应, 生成难溶性磷酸盐而固定下来, 铁矿废渣中含有大量的铁铝元素<sup>[9]</sup>, 其中的 Fe、Al 氧化物能于大量的 P 元素共价结合形成较为稳定的 Fe-P、Al-P 结构, 从而达到吸附除磷的作用。

### 3 结论

(1) 实验运行期间, 农村化粪池废水经过串联式垂直流生态滤池的处理后, 在进水 COD、总氮、氨氮和总磷平均质量浓度为 73.19、25.08、48.55、0.55 mg·L<sup>-1</sup> 时, 平均去除率依次为 65.6%、71.6%、58.7%、86.9%。

(2) 串联式生态滤池的污水处理组合工艺中, 由于污染物被截留、基质吸附作用及植物对滤池微环境的促进作用, 第一级生态滤池对污染物的去除效率明显高于第二级。同时, COD、氨氮和总磷的去除主要发生在第一级生态滤池的进水 0~40 cm 阶段, 而由于沿程均发生反硝化作用, TN 质量浓度基本呈均匀下降趋势。

(3) 在整个实验阶段, 系统进水波动较大, 但出水各项指标基本稳定, 这主要是由于它的结构设计为微生物提供了适宜的生存环境, 系统通过两级滤池串联, 沿程经过好氧、缺氧和厌氧环境, 有利于异养菌、硝化菌、反硝化菌的生长繁殖。而 TP 的去除则主要依靠基质的吸附沉淀。同时, 各污染指标较好的去除效果也证明了其是一种适合农村分散式生活污水处理系统。

### 参考文献:

[1] 王青颖. 中国农村生活污水处理技术应用现状及研究方向[J]. 污染防治技术, 2007, 20(5): 37-41.  
WANG Qingying. Present Situation and Prospect on Rural Sewage Treatment in China[J]. Pollution Control Technology, 2007, 20(5): 37-41.

[2] 李军状, 罗兴章, 郑正, 等. 塔式蚯蚓生态滤池处理集中型农村生活污水工程设计[J]. 中国给水排水, 2005, 25(4): 35-38.  
LI Junzhuang, LUO Xingzhang, ZHENG Zhen, et al. Design of Tower Earthworm Ecofilter System for Treatment of Centralized Rural Domestic Sewage[J]. China Water & Wastewater, 2005, 25(4): 35-38.

[3] 吴树彪, 胡静, 翟旭, 等. 家庭人工湿地组合系统处理农村生活污水的试验研究[J]. 水处理工程, 2009, 35(3): 94-98.  
WU Shubiao, HU Jing, ZHAI Xu, et al. Household constructed wetland for rural family wastewater treatment[J]. Technology of Water

Treatment, 2009, 35(3): 94-98.

[4] 韩润平, 刘晨湘, 石杰, 等. 不同结构生态滤池处理城镇污水研究[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 309-312.  
HAN Runding, LIU Chenxiang, SHI Jie, et al. Research on microbial-earthworm ecofilter system for sewage treatment[J]. with different structure, 2009, 35(3): 94-98.

[5] SABBABH I, GHATTAS B, HAYEEK A, et al. Intermittent sand filtration for wastewater treatment in rural areas of the Middle East—a pilot study[J]. Water Science & Technology, 2003, 48(11/12): 147-152.

[6] LANCE J C. Effect of sludge additions on nitrogen removal in soil columns flooded with secondary effluent[J]. Journal of Environmental Quality, 1986, 15 (3): 298-301.

[7] LANCE J C, WHISLER F D. Stimulation of denitrification in soil columns by adding organic carbon to wastewater [J]. Journal of Water Pollution Control Federation, 1976, 48(2): 346-356.

[8] MAGESAN G N, WILLIAMSON J C. Wastewater C: N ratio effect s on soil hydraulic conductivity and potential mechanisms for recovery[J]. Bioresource Technology, 2000, 71 (1):21-27.

[9] VYMAZA J. The use of subsurface constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic: 10 years experience[J]. Ecological Engineering, 2002, 18: 633-646.

[10] KORKUSUZ E A, MERYEM B, GOKSEL N D. Comparison of the treatment performances of blast furnace slag-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for domestic wastewater treatment in Turkey [J]. Ecological Engineering, 2005, 24: 187-200.

[11] WANDA H, VACCAB G, KUSCHKB P, et al. Removal of bacteria by filtration in planted and unplanted sand columns[J]. Water Research, 2007, 41(1): 159-167.

[12] 李林峰, 年跃刚, 蒋高明. 植物吸收在人工湿地脱氮除磷中的贡献[J]. 环境科学研究, 2009, 22(3): 337-342.  
LI Linfeng, NIAN Yuegang, JIANG Gaoming. Contribution of Macrophytes Assimilation in Constructed Wetlands to Nitrogen and Phosphorous Removal[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(3): 337-342.

[13] PROCHASKA C A, Zouboulis A I. Performance of intermittently operated sand filters: a comparable study, treating wastewaters of different origins [J]. Water Air and Soil Pollution, 2003, 147:367-388.

[14] ALBERT J O. Nitrogen removal in constructed wetlands treating nitrified meat processing effluent [J]. Water Science & Technology, 1995, 32(3):137-147.

[15] 尹军, 崔玉波. 人工湿地污水处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006: 67-86.  
YIN Jun, CUI Yubo. Wastewater Treatment with Constructed Wetland System[M]. Beijing, China: Chemical Industry Press, 2006: 67-86.

[16] BRIX H. Functions of macrophytes play a role in constructed wetlands[J]. Water Science & Technology, 1994, 29(4): 71-78.

[17] BRIX H. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetland[J]. Water Science & Technology, 1997, 35(5): 11-17.

## Experimental study on treatment of rural domestic sewage with serial vertical-flow filters

WANG Yongqian<sup>1,2</sup>, YANG Linzhang<sup>1\*</sup>, FENG Yanfang<sup>1,2</sup>, LI Tianling<sup>1,2</sup>

1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** The domestic wastewater in rural areas was treated by serial vertical flow ecofilters in this pilot study. The results of 5 months showed that the pollutants, e.g., chemical oxygen demand (COD), ammonium-nitrogen ( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ), total nitrogen(TN) and total-phosphate (TP) in the domestic wastewater was effectively removed by the serial vertical flow filters. When the concentrations in the influent were  $212.84 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  for COD,  $88.37 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  for  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,  $117.66 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  for TN and  $4.20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  for TP, the average removal efficiencies of the serial vertical flow eco-filters were 65.6%, 71.6%, 58.7% and 86.9% for COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TN and TP, respectively. Due to deposition and adsorption, most of pollutants such as COD,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ , TP were removed in the first stage (from inlet to 40 cm) of the serial vertical flow eco-filters. The removal of TN in the domestic wastewater was steady, with an even process along with the serial vertical flow eco-filters was steady. These results implied that the serial vertical flow eco-filters are capable for treating diffuse domestic wastewater, and have significantly potential to reduce wastewater pollution and protect environments in rural and similar areas.

**Key words:** serial vertical flow filters; domestic wastewater; diffuse wastewater; rural areas