

水力负荷和气温对生态滤池处理农户灰水的影响

陈建军^{1,3}, 席银¹, 廖再毅¹, 卢少勇², 刘耀兴¹, 何军^{1,3}

(1.三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊环境研究中心, 洞庭湖生态观测研究站, 湖泊工程技术中心, 北京 100012; 3. 三峡大学农业水土资源可持续利用研究所, 湖北 宜昌 443002)

摘要:在三峡库区一个农户家构建了一套处理单个农户灰水的生态滤池工艺,研究了水力负荷和气温对工艺系统运行效率的影响。结果表明,在 $0.05\sim 0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的变化范围内,随着水力负荷的逐渐升高,工艺系统对 COD_Cr 、 NH_4^+-N 、 TN 、浊度(T)的去除率均呈现逐渐降低的整体变化趋势,而 TP 的去除率则表现出先升高后降低的变化规律。数据分析表明,生态滤池工艺的最佳运行水力负荷约为 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$,在该水力负荷条件下,工艺系统对农户灰水中 COD_Cr 、 TN 、 NH_4^+-N 、 TP 和浊度的平均去除率分别为 75%、58%、72%、50%、80%。工艺系统对灰水中各污染物的去除率平均值均表现为夏季高于冬季,且其在冬季对各项指标的去除率仍然较高。在所监测的各项指标中,气温对 COD_Cr 指标的系统去除率影响相对最大。

关键词:生态滤池;农户;灰水;水力负荷;气温;去除率

中图分类号:X703 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)10-2012-07 doi:10.11654/jaes.2015.10.025

Impacts of Hydraulic Loading Rate and Air Temperature on Eco-Filter Based Treatment of Greywater Generated in a Rural Household

CHEN Jian-jun^{1,3}, XI Yin¹, LIAO Zai-yi¹, LU Shao-yong², LIU Yao-xing¹, HE Jun^{1,3}

(1.College of Hydraulic & Environment Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2.Engineering and Technology Centre of Lake, Dongtinghu Lake Ecological Observation and Research Station (DEORS), Research Centre of Lake Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3.Institute of Sustainable Utilization on Agricultural Water & Soil Resources, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Treating greywater from rural families has recently caused increasing interests. This study was aimed to investigate the effects of hydraulic loading rate (HLR) and air temperature on treatment efficiencies of greywater generated in a typical rural household. An eco-filter based greywater treatment facility was built in a typical rural house located in the Three Gorges Project area. The levels of COD_Cr , TN , NH_4^+-N , TP and turbidity in both influent and effluent were monitored over an entire year. The removal rates of COD_Cr , TN , NH_4^+-N , and turbidity (T) in the greywater gradually declined as HLR increased from $0.05\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ to $0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$. The removal rate of TP increased at first but decreased subsequently. The optimal efficiency of greywater treatment was observed at $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ of HLR, which was 75%, 58%, 72%, 50%, and 80% for COD_Cr , TN , NH_4^+-N , TP , and T , respectively. The average pH in the effluent was 7.9. The facility demonstrated better performance in the summer than in the winter. However the facility was still good enough for the greywater treatment even in the winter. Of monitored indexes, COD_Cr was most influenced by air temperature. These results would provide useful information for further studies on the developments of practical technologies and equipment for grey-water treatment in the Three Gorges Project area.

Keywords: eco-filter; rural household; greywater; hydraulic loading rate; temperature; removal rate

收稿日期:2015-03-31

基金项目:宜昌市自然基础科学研究与应用项目(A14-302-a09);国家青年科学基金(41401586);国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07101-014,2012ZX07105-002)

作者简介:陈建军(1980—),男,湖北黄冈人,博士,副教授,从事水污染治理与生态修复研究。E-mail:jjchen1980s@hotmail.com

农村生活污水是面源污染的重要组成部分,随着经济的发展,城镇化进程加快,农村地区的用水量逐渐增多。但是农村污水处理设施建设滞后,目前我国90%以上的农村地区没有污水处理措施,以致没有经过处理的大量生活污水直接排入沟渠、河流,最终进入湖泊等水体,加剧了水环境污染^[1]。在三峡库区周边,农村生活污水无处理排放是库区水体污染和水质富营养化的重要原因之一^[2]。

对于基础设施相对落后、居住较分散的农村地区,要求其污水处理方案应具备工艺简单、投资和运行成本低、处理效率高等特点^[3]。近年来,农村生活污水的生态处理工艺受到了较多的关注和研究,但相关技术尚处在研究和示范阶段。已有的相关研究主要针对多家农户集中排放的混合生活污水,对单个农户生活污水的分散生态处理工艺研究鲜见报道^[4-7]。生活污水包括黑水(人畜粪便污水)和灰水,灰水主要包括洗衣废水、沐浴废水、厨房废水等。现场调研表明,三峡库区农户日常生活产生的黑水一般收集于简易的化粪池中并用于菜地施肥,灰水则直接泼洒到地面或通过水池管道排到室外水沟中。目前国内针对农村灰水的研究鲜见报道,而在国外的相关研究相对较多^[8-9]。因此,本课题组在三峡库区某农户家构建了一套处理单个农户灰水的生态滤池工艺,并对其进行了运行监测,分析水力负荷和气温对工艺系统处理农户灰水效能的影响,拟为三峡库区的水环境污染治理工作提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本项目选择宜昌市大树湾村的一家农户作为试验点,构建了一套生态滤池工艺处理农户排放的灰水,试验装置和工艺流程如图1所示。通过构建一套农户灰水收集和生态处理系统,连续监测了工艺进水水质变化。水质监测指标包括化学需氧量(COD_{Cr})、总氮(TN)、氨氮(NH_4^+-N)、总磷(TP)、浊度(T)、pH。指标测定结果见表1。

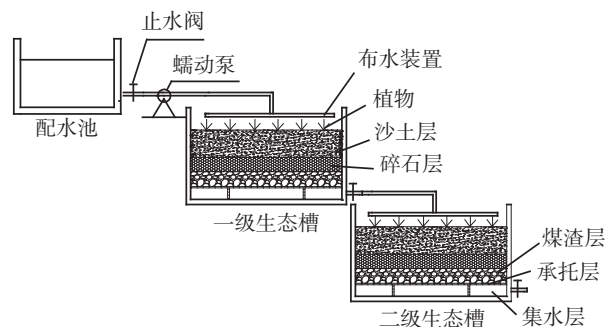


图1 试验装置图

Figure 1 Setup diagram of greywater treatment facility

所构建的生态滤池工艺包括布水装置和两个阶梯式相连的垂直流生态槽(一级生态槽和二级生态槽),两槽的尺寸均为 $0.8 \text{ m} \times 0.6 \text{ m} \times 0.65 \text{ m}$ 。布水装置是一套自行设计的由底部均匀钻孔的PVC排水管连接加工而成的T型装置。生态槽外框采用PVC塑料箱改造而成,从生态槽底部到顶部依次设计了集水层、木板承托层、炉渣层、碎石层、土壤层和植被层,所用的炉渣和碎石均为废弃物,在当地村庄里搜集得到。处理后的炉渣粒径为 $20 \sim 40 \text{ mm}$,碎石的粒径为 $10 \sim 30 \text{ mm}$,所用土壤采自农户附近的山林中,在采集的土壤中按一定比例添加细沙并混合均匀。生态槽土壤层填充完毕后,在沙土中按 $40 \text{ 条} \cdot \text{m}^{-2}$ 的密度接种本地蚯蚓。在生态槽的植被层中构建了草本层和灌木层,运行一年后能够稳定生长的常绿景观植物为草本植物麦冬和灌木杜鹃,麦冬四季常绿且在土地表面的覆盖性好,杜鹃的景观性好且植株较小。

1.2 研究方法

工艺装置构建后开始启动试验,系统的水力负荷为 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,运行100 d后开始水力负荷的优化试验,启动试验设置的目的在于使生态槽的生态系统适应污水并逐渐运行稳定。水力负荷的优化试验期间,水力负荷从 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 逐渐增加到 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。整个运行期间,工艺系统采用间歇式进水方式,通过继电器和蠕动泵自动实现每天上午9:00进水,下午15:00停水,每天进水6 h(即干湿比为3:

表1 试验点农户灰水水质

Table 1 Quality of greywater from a rural household

指标	$\text{COD}_{\text{Cr}}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{TN}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{NH}_4^+-\text{N}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	$\text{TP}/\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	T/NTU	pH
数值	339 ± 145	10.8 ± 6.34	7.65 ± 3.09	0.818 ± 0.391	96.7 ± 38.3	7.61 ± 0.469

注:表中数据为平均值±标准差($n=58$)。

Note: Data are presented as mean±SD($n=58$).

1)。试验期间系统进出水水质监测采样每 2~3 d 一次,监测指标包括 COD_{Cr} 、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP、浊度、pH。水力负荷优化试验结束后,在最优的水力负荷条件下继续运行工艺系统,以研究不同季度下气温对工艺出水的影响,采样频率为每周一次。 COD_{Cr} 、TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TP 的监测分析参照《水和废水监测分析方法(第四版)》,进出水的浊度检测使用浊度仪(WGZ-200,上海精密),pH 的监测采用便携式 pH 计(OHAUS STARTER 300,美国)。

1.3 数据分析

运用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件对生态滤池工艺进出水的氮磷营养盐监测数据进行统计分析,主要进行单因素方差分析(The one-way ANOVA),LSD 法多重比较以及 T 检验。

2 结果与分析

2.1 水力负荷对生态滤池出水 COD_{Cr} 、TP 的影响

水力负荷优化试验期间,生态滤池工艺的一级槽和整个系统对灰水中 COD_{Cr} 、TP 的去除效果均较明显(图2)。系统出水中 COD_{Cr} 和 TP 浓度的变化相对较

稳定,其浓度波动幅度均明显小于一级出水,随着水力负荷的提高,系统出水中 COD_{Cr} 和 TP 浓度均略有升高。在水力负荷优化试验阶段的第 0~20、20~40、40~70、70~100 d,进水水力负荷分别设置为 0.05、0.1、0.2、0.4 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。随着水力负荷的升高,工艺系统对污水中 COD_{Cr} 和 TP 的去除率表现出不同的变化趋势:系统对进水 COD_{Cr} 的去除率在水力负荷提高至 0.4 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 后,开始出现明显的下降;而系统对 TP 的去除率在水力负荷提高至 0.2 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 时开始明显上升,在水力负荷提高至 0.4 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 后出现明显下降。系统对进水 COD_{Cr} 和 TP 的系统去除率均明显高于一级槽去除率,在水力负荷为 0.2 $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的工况下,系统对进水 COD_{Cr} 和 TP 的去除率分别为 75% 和 50%。

2.2 水力负荷对工艺出水 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的影响

由图3可知,整个试验运行期间,工艺系统进水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 TN 的浓度明显高于系统的一级出水,一级出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 的浓度明显高于系统出水,与 TN 相比较,生态槽对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效率更高,出水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的含量相对稳定,且指标数值的波动范

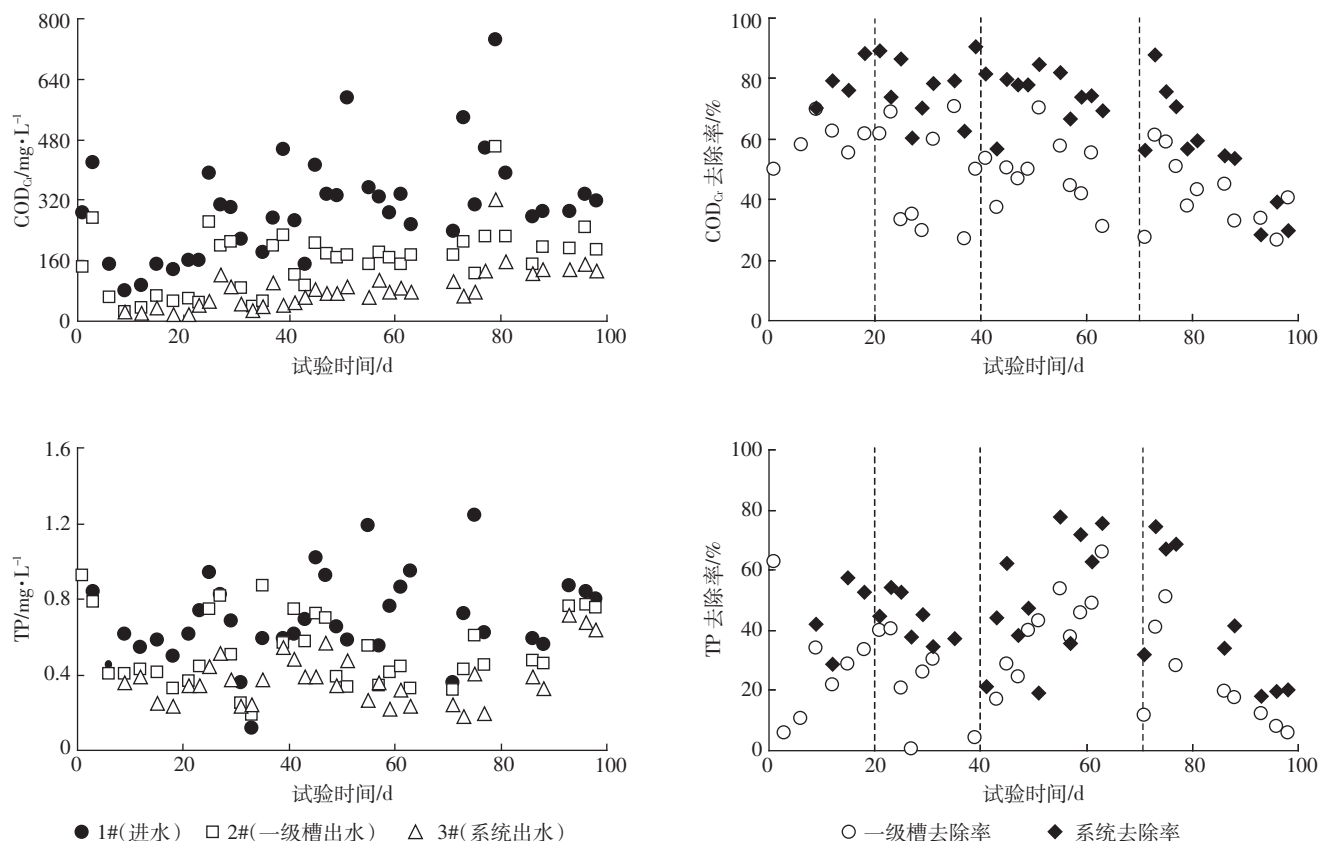


图2 工艺系统进出水的 COD_{Cr} 、TP 浓度和去除率变化

Figure 2 Content and removal rates of COD_{Cr} and TP in both influent and effluent

围较小。随着水力负荷的升高,出水的 NH_4^+-N 和 TN 含量都有逐渐升高的趋势,系统对 NH_4^+-N 和 TN 的去除率均表现出逐渐降低的变化规律。当水力负荷从 $0.05 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高至 $0.1 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, TN 的去除率开始下降;从 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 提高至 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, TN 去除率出现了更明显的下降。仅当水力负荷提升至 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时, NH_4^+-N 的去除率才出现了明显

的下降。在水力负荷为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的工况下,工艺系统对进水 TN 和 NH_4^+-N 的去除率分别为 58% 和 72%。

2.3 进出水的 pH 及浊度去除率变化

试验期间,工艺系统出水的 pH 值相对稳定,进水的 pH 波动变化明显较大(图 4)。进水的 pH 变化范围为 7~9, 均值为 7.61; 出水的 pH 值变化范围为

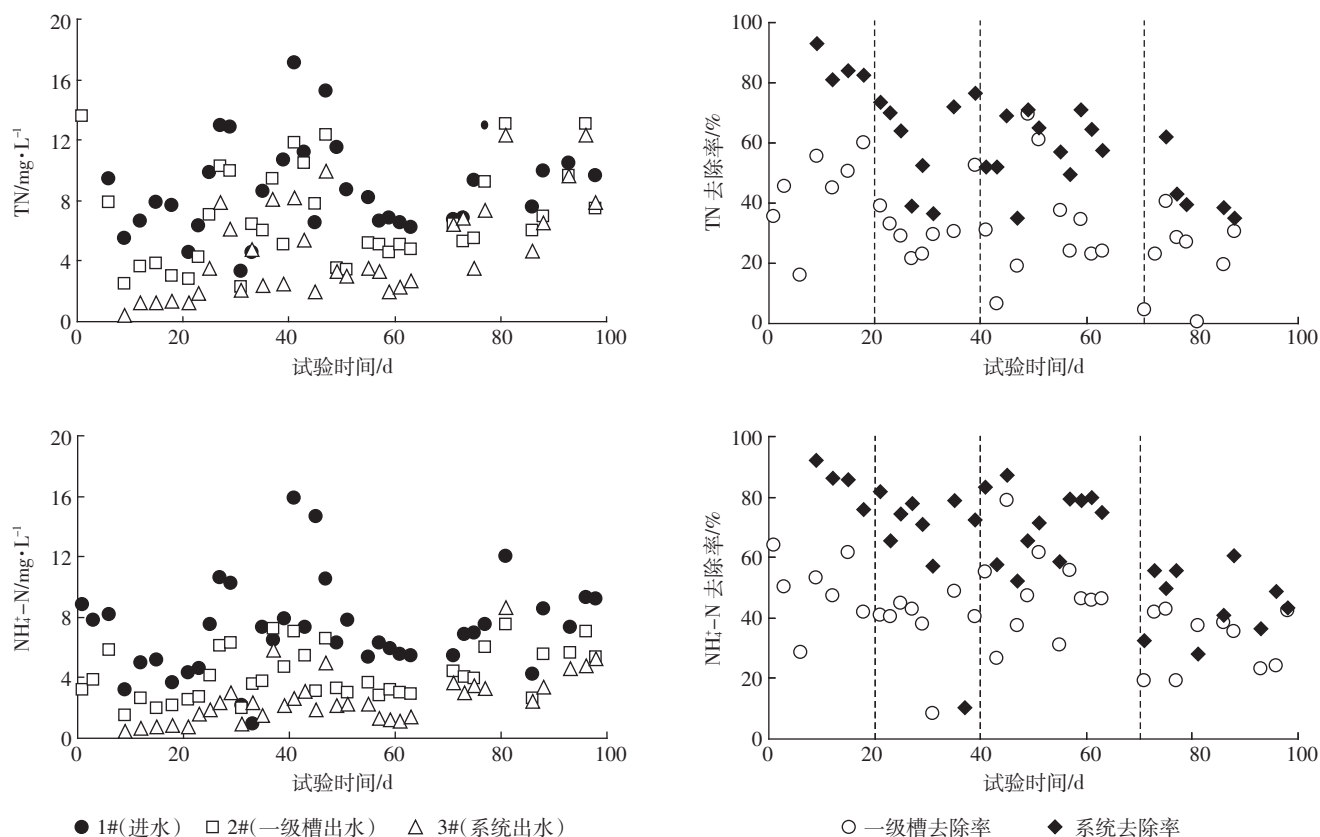


图 3 工艺系统进出水的 TN、 NH_4^+-N 浓度和去除率变化

Figure 3 Content and removal rates of TN and NH_4^+-N in both influent and effluent

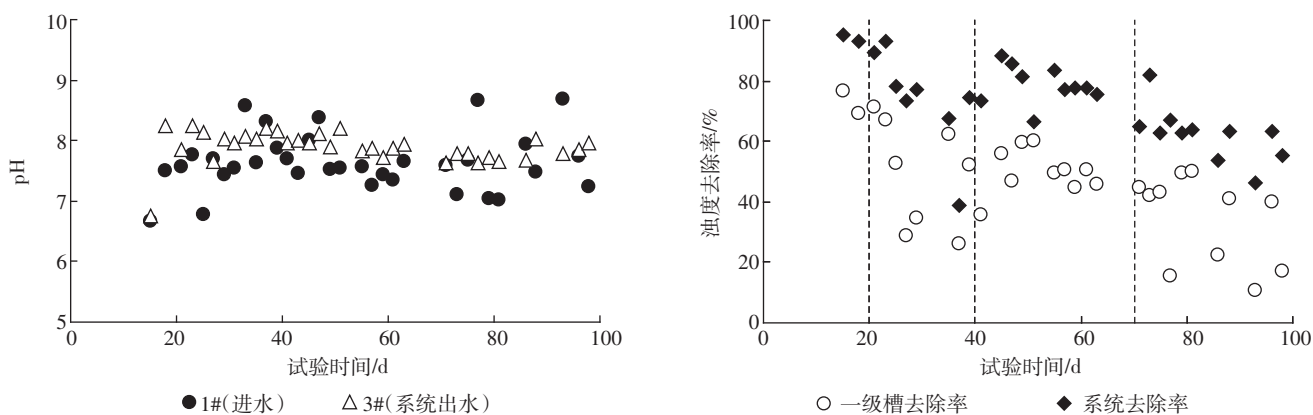


图 4 工艺进出水的 pH 和浊度去除率变化

Figure 4 Variations of pH and turbidity removal rate in both influent and effluent

7.5~8.2,均值为7.88。随着水力负荷的升高,浊度的去除率也表现出逐渐下降趋势,在水力负荷为 $0.4 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 时,去除率的下降更加明显。在水力负荷为 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 的工况下,工艺系统对进水浊度的去除率均值约为80%。

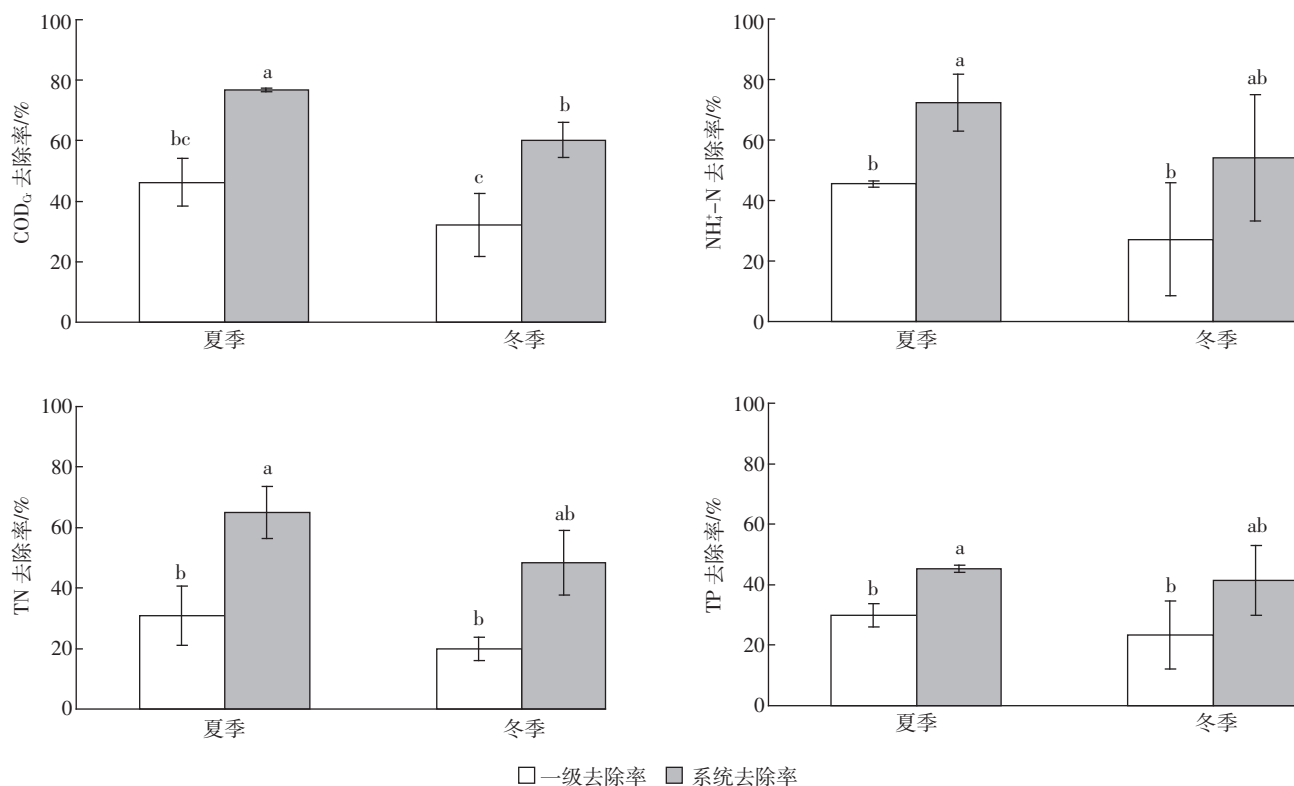
2.4 气温对生态滤池去除率的影响

根据前期的试验结果,将系统的水力负荷调整至 $0.2 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,并在此工况下对系统进行了为期半年多的系统进出水指标监测(图5)。试验期间,试验区域内夏季白天的平均气温为 $21 \sim 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$,秋季冬季的平均气温为 $5 \sim 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对夏季、冬季监测指标去除率数据分析表明,夏季对 COD_G 、TN、 NH_4^+-N 、TP的系统去除率均值分别为76.7%、65.0%、72.3%、45.3%;在冬季,工艺对农户灰水中各项指标的去除率仍然较好,对 COD_G 、TN、 NH_4^+-N 、TP的系统去除率均值分别为60.2%、48.3%、54.1%、41.44%。结合数据分析来看,所有检测指标在夏季的一级槽去除率均高于冬季,但一级槽去除率均未表现出季节之间的显著性差异。工艺的系统去除率均值也表现为夏季高于冬季,且只有 COD_G 的系统去除率在夏季和冬季表现出显著的差

异性($P < 0.05$)。这说明工艺系统在冬季对各项指标的去除率仍然较好,且气温对工艺系统的 COD_G 去除率影响相对最大。在夏季,所有指标的一级槽去除率和系统去除率均值都表现出显著性差异($P < 0.05$);在冬季,只有 COD_G 、TN的一级槽去除率和系统去除率表现出显著性差异($P < 0.05$)。这也说明生态槽在夏季对进水污染物的去除效率比其在冬季要高。在冬季,第二级生态槽对系统进水中 COD_G 、TN两个指标去除贡献率相对较高。

3 讨论

在水力负荷为期三个月的启动试验中,主要是观察生态槽中植物和蚯蚓的成活和生长情况。在一个月后,观察到植物和蚯蚓正常存活,于是开始监测第一级生态槽的出水水质变化。启动试验的监测期为60 d,在试验监测期间,一级生态槽对 COD 、TN、 NH_4^+-N 、TP的去除率平均值分别为63%、64%、77%、59%。由于当时没有排除地表雨水的混入,进水水质的各项指标均有逐渐被雨水稀释而变小的趋势,但其中 COD_G 、 NH_4^+-N 、TN的去除率仍较稳定,而TP的去除率下降



图中不同小写字母表示各处理间差异显著($P < 0.05$)

Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$) between different treatments

图5 气温对生态滤池工艺去除率的影响

Figure 5 Effect of air temperature on removal rates of greywater quality indexes

较明显,可能是因为进水中 TP 的本底浓度已相对偏低。与见诸报道的城市家庭以及农户灰水水质指标数据相比较^[8,10-11],本工艺的进水 COD_G 、TN、 NH_4^+-N 、浊度等指标的数据均在同一变化范围内,但 TP 含量数值相对明显偏低,可能与近两年来试验地区无磷洗衣粉的广泛使用有关。

在水力负荷的优化试验期间,构建了灰水收集管道,对地表雨水径流的混入进行控制后,进水的水质波动幅度明显变小。水力负荷优化试验为 100 d,运行时间在 7—9 月,在此期间每 2~3 d 取样监测一次。随着进水水力负荷从 $0.05\sim 0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的逐步升高, COD_G 、TN、 NH_4^+-N 、TP 和浊度的系统去除率表现出不同的变化规律。 COD_G 、TN、 NH_4^+-N 和浊度的去除率表现出逐渐下降的变化趋势,其中 TN 下降趋势出现较早,而 TP 的系统去除率则表现出明显的先升后降变化趋势。随着水力负荷的升高,污水在生态槽内的水力停留时间逐渐缩短,导致大部分指标的系统去除率出现逐渐下降的变化趋势,另外水力负荷太高也会影响蚯蚓的生命活动^[12-13]。本研究中,磷的去除率变化与以往的报道有所不同。湿地系统对磷的去除主要是靠基质的吸附沉淀作用,在一定范围内填料对磷的最大吸附量随着水溶液中磷浓度的升高而升高^[14-15]。因此,当水力负荷在 $0.05\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 范围内升高时,TP 的去除率有逐渐升高的变化趋势可能是因为第一和第二个水力负荷工况下进水磷浓度偏低。当水力负荷从 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 继续升高时,TP 去除率均出现了较明显下降则是因为水力停留时间太短。

生态滤池工艺的最佳水力负荷为 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。在该工况下,工艺对 COD_G 、浊度、TN、 NH_4^+-N 、TP 的去除率均值分别为 75%、80%、58%、72%、50%。将系统出水各指标的平均值与 GB 18918—2002 进行对照表明,系统出水中的 NH_4^+-N 、TP 和 TN 指标值均低于一级 A 排放标准值, COD_G 和浊度指标值低于或接近二级排放标准值,因此出水基本达标,但还应在后续的研究中进一步强化和提升工艺系统的 COD_G 和浊度去除率。与已有的相关研究比较,本工艺中 COD 、TN、 NH_4^+-N 的系统去除率与王永谦等^[7]的数据非常接近,稍低于李军状等^[6]和郭飞宏等^[4]的数据;而 TP 的系统去除率与以上相关研究差距较大,约偏低了 30 个百分点。这可能是本工艺进水 TP 含量(均值约 $0.8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)比文献报道的工艺进水 TP 含量(均值约 $4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)低很多所致,因为本系统的进水为灰水,而文献报道主要是灰水和黑水混合的生活污水。

气温对生态滤池的去除污染物效率的影响分析表明, COD_G 、TN、 NH_4^+-N 指标在夏季的去除率均高于冬季,与已有的报道结论一致^[16];所有指标在夏季的一级槽去除率和系统去除率的差异更大,说明在第二级生态槽对系统去除率的贡献率在夏季相对更高。本工艺构建的生态槽对污水处理的作用较为复杂:对污染物的去除可包括土壤层、填料层的过滤吸附作用,土壤层植物根系的截留生化作用,根际微生物、土壤微生物、蚯蚓的生物化学作用。另外,蚯蚓的活动对土壤层中植物、微生物去除污染物也有促进作用^[17]。因此,生态滤池工艺对农户灰水中污染物的去除应该主要靠生态槽的小型生态系统的综合作用,在夏季,植物、微生物和蚯蚓等生物生命活动的增强是促进该生态系统净化污水能力增强的主要原因。本工艺系统对 TP 的去除率在夏季和冬季的差异不明显,可能与进水的总磷浓度偏低有关^[15,17],在进水 TP 浓度较低的情况下,系统对磷的去除潜力难以得到充分体现。在本研究中,只有 COD_G 去除率在不同的季节气温下表现出显著性差异($P<0.05$),其他各指标在夏季和冬季的系统去除率差异并不显著,可能是因为这些指标中只有进水的 COD_G 浓度相对比较高,污染负荷比较大。在冬季,工艺系统对各指标的去除率仍然较好,可能是因为生态槽内种植的灌木和草本都是常绿型的,在冬季仍有一定的生命活动,同时冬季时期麦冬在土壤表面的覆盖也提供了一定的保温功能。

4 结论

在 $0.05\sim 0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的范围内,随着水力负荷的升高,工艺对 COD_G 、 NH_4^+-N 、TN、浊度的系统去除率均表现出逐渐降低的整体变化趋势。在 $0.05\sim 0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 的水力负荷变化范围内,TP 的去除率表现出逐渐上升的规律,而在水力负荷提高至 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 后出现了明显的下降。当水力负荷从 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 提高至 $0.4\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 后,各监测指标的系统去除率均表现出明显的下降趋势。因此,生态滤池工艺的最佳运行水力负荷约为 $0.2\text{ m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

工艺系统在夏季对进水污染物的去除效率比其在冬季要高;在所监测的各项指标中,气温对 COD_G 的系统去除率影响相对最大。

参考文献:

- [1] 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, 7(3): 18-22.

- LIANG Zhu, NI Jin-ren. Treatment technologies and approaches for rural domestic sewage[J]. *Journal of China University of Geosciences: Social Sciences Edition*, 2007, 7(3):18-22.
- [2] 彭绪亚, 张 鹏, 贾传兴, 等. 重庆三峡库区农村生活污水排放特征及影响因素分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):758-763.
- PENG Xu-ya, ZHANG Peng, JIA Chuan-xing, et al. Discharge characteristic of the rural domestic-wastewater and its influencing factors in the Three Gorges Reservoir Region of Chongqing[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):758-763.
- [3] 许加星, 徐力刚, 姜加虎, 等. 生化生态组合湿地系统对农村生活污水的净化效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(9):1815-1822.
- XU Jia-xing, XU Li-gang, JIANG Jia-hu, et al. Treatment effect of combined ecological and biochemistry wetlands on disposing rural domestic sewage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(9):1815-1822.
- [4] 郭飞宏, 汪龙眠, 张继彪, 等. 蚯蚓生态滤池对农村生活污水的深度净化效果[J]. 环境工程学报, 2012, 6(3):714-718.
- GUO Fei-hong, WANG Long-mian, ZHANG Ji-biao, et al. Study of earthworm ecology filter for rural sewage purification[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(3):714-718.
- [5] 李海明. 农村生活污水分散式处理系统与实用技术研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(9):177-181.
- LI Hai-ming. Distributed rural sewage treatment system and practical technology[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(9):177-181.
- [6] 李军状, 罗兴章, 郑 正, 等. 蚯蚓生态滤池处理农村生活污水现场试验研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12):11-16.
- LI Jun-zhuang, LUO Xing-zhang, ZHENG Zheng, et al. Study on rural sewage treatment by animalcule-earthworm eco-filter in field tests[J]. *Environmental Pollution & Control*, 2008, 30(12):11-16.
- [7] 王永谦, 杨林章, 冯彦房, 等. 串联式垂直流生态滤池处理农村生活污水的试验研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2):332-336.
- WANG Yong-qian, YANG Lin-zhang, FENG Yan-fang. Experimental study on treatment of rural domestic sewage with serial vertical-flow filters[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(2):332-336.
- [8] Boyjoo Y, Pareek V K, Ang M. A Review of greywater characteristics and treatment processes[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 67(7):1403-1424.
- [9] Ghunmi L, Zeeman G, Fayyad M, et al. Grey water treatment systems: A review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2011, 41(7):657-698.
- [10] 顾 丽, 汪 翔, 冯 骞, 等. 人工快滤系统处理小区洗衣废水的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2006, 29(10):4-6, 115.
- GU Li, WANG Hui, FENG Qian, et al. Treatment of domestic laundry wastewater in a constructed rapid infiltration system[J]. *Environmental Science and Technology*, 2006, 29(10):4-6, 115.
- [11] 王少勇, 陈洪斌. 灰水处理与回用进展[J]. 中国沼气, 2007, 25(6):5-9, 24.
- WANG Shao-yong, CHEN Hong-bin. Review on grey water treatment and reuse[J]. *China Biogas*, 2007, 25(6):5-9, 24.
- [12] 褚其英, 肖继波, 王慧明, 等. 水力负荷对生态槽深度处理农村生活污水的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2013, 30(6):914-920.
- CHU Qi-ying, XIAO Ji-bo, WANG Hui-ming, et al. Hydraulic loading rate for rural domestic sewage treatment with an eco-tank[J]. *Journal of Zhejiang A & F University*, 2013, 30(6):914-920.
- [13] 杨 健, 赵丽敏, 陈巧燕, 等. 水力负荷对滤池中蚯蚓生态生理适应性的影响[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2009, 37(8):1049-1054, 1084.
- YANG Jian, ZHAO Li-min, CHEN Qiao-yan, et al. Ecological and physiological adaptabilities of earthworm in vermifilter under different hydraulic loading[J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2009, 37(8):1049-1054, 1084.
- [14] 卢少勇, 金相灿, 余 刚. 人工湿地的磷去除机理[J]. 生态环境, 2006, 15(2):391-396.
- LU Shao-yong, JIN Xiang-can, YU Gang. Phosphorus removal mechanism of constructed wetland[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2):391-396.
- [15] 谭洪新, 周 琪. 湿地填料的磷吸附特性及潜流人工湿地除磷效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2):353-356.
- TAN Hong-xin, ZHOU Qi. Characterization of adsorption on phosphorus in stuffings and removal in substratum in wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2):353-356.
- [16] Zhao Y, Yan C, Li Y, et al. Effect of C/N ratios on the performance of earthworm eco-filter for treatment of synthetics domestic sewage[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2012, 19(9):4049-4059.
- [17] Comber S, Gardner M, Georges K, et al. Domestic source of phosphorus to sewage treatment works[J]. *Environmental Technology*, 2013, 34(10):1349-1358.