

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.014

垂直-水平流人工湿地处理农村污水效果及影响因素

董倩倩, 李骏飞, 初振宇

(广东省建筑设计研究院有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 为了提升水环境质量,进一步提高农村分散处理设施的出水水质,构建了垂直-水平流湿地系统对其出水进行深度处理。通过设置沿程采样点,取样检测TN、NH₃-N、TP等水质指标,分析其沿程变化以及季节、水力负荷对去除效果的影响。结果表明,垂直-水平流湿地系统对氮的去除主要发生在垂直流段,去除率达48.5%;磷在垂直流和水平流段均得到有效去除,去除率为41.0%;季节变化影响对氮、磷的去除效果,夏、秋季节TN、NH₃-N、TP去除率高达46%、47%、42%。建议湿地运行过程中的水力负荷<0.5 m³/(m²·d),进水氮负荷<5 g/(m²·d),出水水质基本满足地表Ⅴ类水标准。湿地构建中可填充沸石、石灰石等填料,合理选择植物,以增强对氮、磷的去除。

关键词: 农村污水; 垂直-水平流; 人工湿地; 水力负荷; 污染负荷

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0101-06

Treatment Effect of Vertical-horizontal Flow Constructed Wetland System on Rural Wastewater and Its Influencing Factors

DONG Qian-qian, LI Jun-fei, CHU Zhen-yu

(Guangdong Architectural Design & Research Institute Co. Ltd., Guangzhou 510010, China)

Abstract: In order to improve the quality of water environment and further improve the discharge standard of treatment facilities, a vertical-horizontal flow wetland system was constructed for advanced treatment of tail wastewater. By setting sampling points along the system, the change of TN, NH₃-N, TP and other water quality indicators was analyzed, and the influence of season and hydraulic load on pollutants removal effect was investigated. It was concluded that the removal of nitrogen in the vertical-horizontal flow wetland system mainly occurred in the vertical flow section, with a removal rate of 48.5%; phosphorus was effectively removed in both vertical and horizontal flow sections, with a removal rate of 41.0%. Season affected the removal efficiency of both nitrogen and phosphorus, the removal rates of TN, NH₃-N and TP in summer and autumn were as high as 46%, 47% and 42%, respectively. It was suggested that the hydraulic load of the wetland should be less than 0.5 m³/(m²·d), the nitrogen load of the inlet water should be less than 5 g/(m²·d), which could ensure that the effluent quality basically met the class V standard of the surface water. Zeolite and limestone can be used as the filter materials, and plants can be reasonably selected, which also enhances the removal of nitrogen and phosphorus.

Key words: rural wastewater; vertical-horizontal flow; constructed wetland; hydraulic load; pollution load

近年来由于治水力度的不断加大,珠三角地区主要河涌基本消除了黑臭,但是水环境质量需要进

一步升级,要在消除黑臭的基础上,恢复水体的使用功能,要求水体水质达到Ⅴ类及以上标准。对已进

行治理的河涌水质进行分析,发现氮、磷超标是制约水环境质量提升的主要问题^[1]。

为了解决氮、磷超标问题,大部分城镇污水处理厂开展了提标改造工作,在一定程度上缓解了水体氮、磷超标问题。而珠三角地区大部分农村污水处理工程多采用分散式处理设施,例如一体化MBR、A²O等工艺处理污水,出水就近直排河涌或小微水体,如再进一步提高农村污水处理设施出水水质,将面临投资成本高、运营维护复杂等问题。人工湿地系统具有操作管理方便、建设投资和运行成本低、生态景观价值高的优点^[2],同时能够增加绿地面积,符合海绵城市及低碳理念的要求。尤其系统中微生物的多样性及其硝化和反硝化作用,是人工湿地去除污水中氮的主要途径^[3]。为此,依托已建成运行的某人工湿地项目,开展湿地系统对分散处理设施出水的净化效果及影响因素分析,提出在湿地建设、运行方面的一些建议。

1 湿地处理系统

1.1 进水水质

采用农村分散处理设施出水作为湿地系统的进水,其COD为45~60 mg/L、TN为5.0~22.5 mg/L、NH₃-N为3.5~12.5 mg/L、TP为0.4~1.0 mg/L,进水浓度存在波动性。

1.2 湿地系统构建

取样测试的项目采用垂直-水平流(VF-HF)复合人工湿地系统,其中垂直流段尺寸为 $L \times B \times H = 21.6 \text{ m} \times 8.65 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$,采用“丰”字形布水集水;水平流段尺寸为 $L \times B \times H = 31.4 \text{ m} \times 8.65 \text{ m} \times 1.1 \text{ m}$,出水排放至农村小微水体。

基质作为垂直流人工湿地的重要组成部分,一方面为植物和微生物的生长提供介质,另一方面也能够通过沉淀、过滤和吸附等作用直接去除污染物^[4],是影响人工湿地水力性能、植物生长和系统堵塞的重要因素。该系统中垂直流湿地填充沸石、砾石混合基质,并采用反配与正配交叉布置结构,分4层进行填充,最上层是直径为16~32 mm的砾石,第二层是直径为10~20 mm的沸石,第三层是直径为16~32 mm的砾石。最上层与第二层采用反级配,以截留悬浮物,并有效除磷,第二层与第三层为正级配,在去除氨氮方面效果显著。最底层由于敷设管道,为防止孔口堵塞,填充直径为40~80 mm的砾石。已有研究表明,沸石和石灰石能有效提高对氮、磷的去除效果^[5-6],因此在湿地床的VF段填充了厚度为50 cm沸石协助脱氮除磷,在HF段填充了长度为27 m、厚度为50 cm的石灰石用于强化除磷。湿地系统布置见图1。

石。已有研究表明,沸石和石灰石能有效提高对氮、磷的去除效果^[5-6],因此在湿地床的VF段填充了厚度为50 cm沸石协助脱氮除磷,在HF段填充了长度为27 m、厚度为50 cm的石灰石用于强化除磷。湿地系统布置见图1。

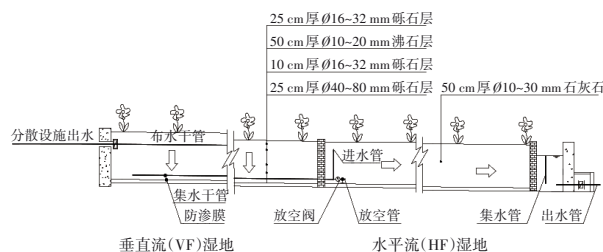


图1 湿地系统布置

Fig.1 Layout of the constructed wetland system

植物的选择遵循以下原则:多年水生植物;根系发达;具有较高的耐污与净化能力;具备观赏性,不引进外源性植物。本系统选取狐尾草、黄花美人蕉、再力花、梭鱼草等植物。湿地系统的建设如图2所示。



图2 复合人工湿地系统

Fig.2 Photos of the vertical-horizontal flow constructed wetland system

1.3 分析项目与方法

为了分析湿地系统对氮、磷的去除效果及其影响因素,在沿程布置了1#~10#采样点,其中1#为进水,根据填料分层特点,垂直流段沿纵向10、25、75、85、110 cm分别布置2#~6#采样点,水平流段沿横向分别在距离起端2、5、29 m处布置7#~9#采样点,10#为出水。取样后采用国家标准分析方法测定TN、NH₃-N、NO₃⁻-N、TP等水质指标,分析其沿程变化以及季节、水力负荷对去除效果的影响。

2 结果与讨论

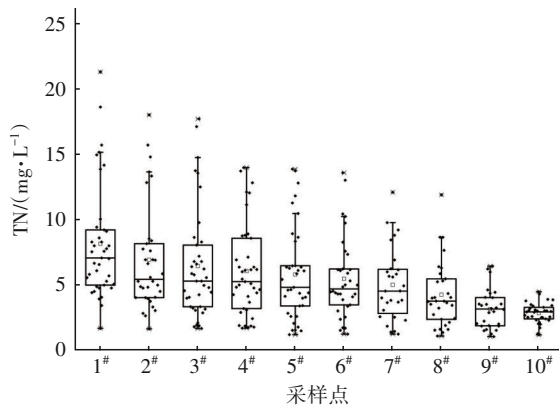
2.1 沿程氮、磷去除效果

湿地系统沿程N、P浓度的变化见图3。在人工湿地中,氮的去除途径主要包括植物吸收、基质吸附、微生物降解三部分,其中微生物降解起主要作

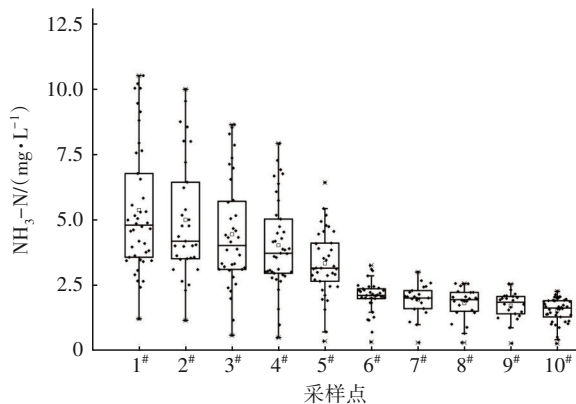
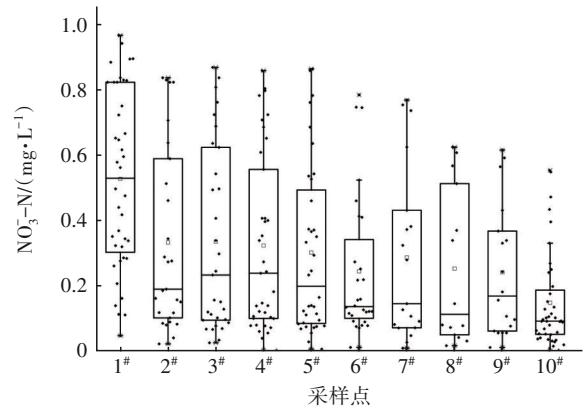
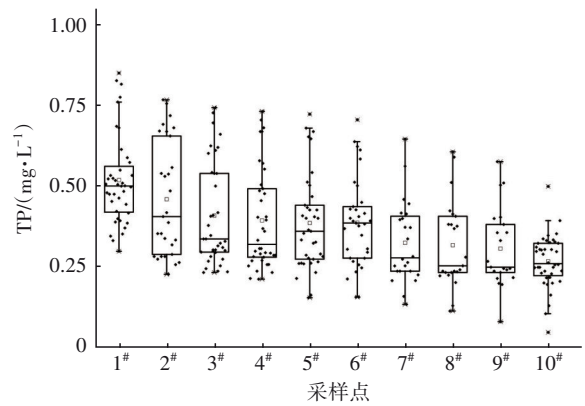
用^[7]。由图3(a)可知,在垂直流湿地的0~25 cm深度TN浓度下降最快(1[#]~3[#], $F=39.73$, $P<0.001$),此刻其TN去除率占湿地系统TN总去除率的49.3%,这是由于该段营养物质充分,植物、微生物生长较快,吸收、降解大量氮,快速降低了湿地系统的氮负荷。水平流湿地大部分处于厌氧和缺氧状态,微生物反硝化能力强, TN 浓度稳步下降(7[#]~10[#], $F=12.72$, $P<0.001$)。

总体来说,沿程 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度不断降低,在垂直流湿地进水至75 cm处, $\text{NH}_3\text{-N}$ 去除率达31%,至深度为110 cm处去除率为48.5%(1[#]~6[#], $F=27.08$, $P<0.001$);进入水平流段后, $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度缓慢降低(7[#]~10[#], $F=58.52$, $P<0.001$),但最终出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较垂直流末端没有较明显降低,说明 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要在垂直流段完成。分析原因是垂直流湿地溶解氧充足,利于微生物好氧硝化反应的进行,使 $\text{NH}_3\text{-N}$ 得到迅速氧化降解,转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 或 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,加之垂直流段填充了沸石,增强了对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的吸附。

在水平流段 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度降低缓慢, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度增加(7[#]~10[#], $F=12.72$, $P=0.104$), TN 浓度也缓慢降低,说明反硝化能力不足,可能存在硝态氮的累积。



a. TN 浓度沿程变化

b. $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度沿程变化c. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度沿程变化

d. TP 浓度沿程变化

图3 氮、磷沿程浓度变化箱线图

Fig.3 Boxes of N and P concentration along the constructed wetland system

从进水至垂直流10 cm深处, TP 浓度略微升高,在进水端25 cm处TP有个快速吸附降解的过程,由初始的0.52 mg/L快速降低至0.31 mg/L(1[#]~3[#], $F=54.58$, $P<0.001$),在垂直流底部受悬浮物沉积的影响,总磷浓度升高(4[#]~5[#], $F=4.62$, $P=0.04$)。进入水平流段后,由于植物和微生物(主要是聚磷菌)的吸收转化,加之石灰石填料对磷的吸附沉淀,水中磷浓度不断下降(7[#]~10[#], $F=18.65$, $P<0.001$),水平流段末端去除率达41.0%,最终出水满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的V类水标准。

通过沿程数据分析可知,垂直-水平流湿地系统对TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除主要发生在垂直流段,发生快速降解的深度在沸石填料底部,去除率达48.5%;TP在垂直流和水平流段均得到有效去除,去除率达41.0%。经对1[#]~10[#]数据进行显著性分析, TN、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP 沿程浓度差异显著($P<0.001$),且污染物浓度沿程不断降低,说明3种污染物在湿地系统沿程一直得到有效去除。

根据上述讨论,建议在复合人工湿地设计中适当增加垂直流段深度,形成沿程好氧、缺氧和厌氧环境,有利于微生物的硝化、反硝化;基质填充沸石、石灰石等填料,以增强对氮、磷的去除。

2.2 季节变化对去除效果的影响

结合季节变化从系统取样测试,同一季节多次取样,得到不同季节的进水 TN、NH₃-N、TP 浓度及其去除率,结果见图4~6。

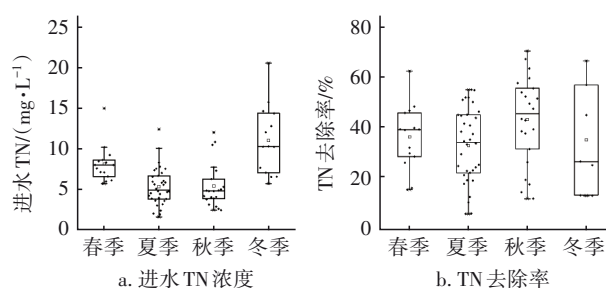


图4 不同季节进水 TN 浓度及其去除率

Fig.4 TN removal in different seasons

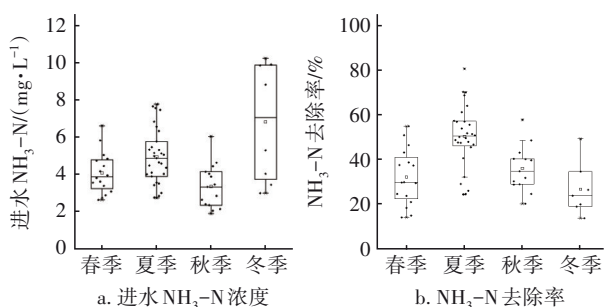


图5 不同季节进水氨氮浓度及其去除率

Fig.5 NH₃-N removal in different seasons

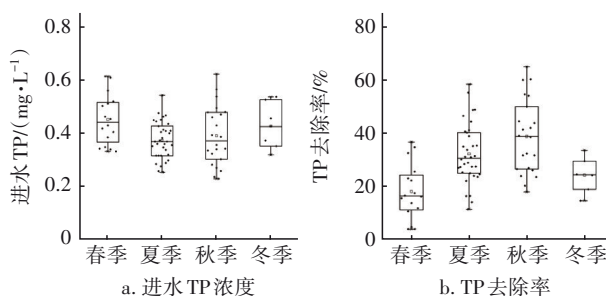


图6 不同季节进水 TP 浓度及其去除率

Fig.6 TP removal in different seasons

由图4可知,不同季节的 TN 去除率不同,排序为秋季>春季>夏季>冬季,去除率均值分别为46%、38%、34%、25%,季节性差异显著($F=3.97$, $P=0.014$)。

NH₃-N 去除率的季节变化规律为夏季>秋季>春季>冬季,去除率分别为47%、36%、32%、26%,季

节性差异显著($F=7.55$, $P<0.001$)。

TP 去除效果波动比较大,排序为秋季>夏季>冬季>春季,去除率分别为42%、36%、25%、18%,季节性差异显著($F=15.24$, $P<0.001$)。

对 N、P 而言,夏、秋季节的去除率较高,分析原因是:①夏、秋季节,美人蕉、再力花等植物处于生长期,植物根系对氮、磷、有机物有较强的吸收能力,同时植物根系为微生物的生长提供了附着位点;②水生植物的根系分泌物促进了植物与微生物之间的协同进化,植物根系从环境中摄取营养物质,同时向环境中释放分泌物,这些根系分泌物极大地改变了根际微区的理化环境,提高了微生物的多样性,更有利于氮、磷的降解^[8]。

夏、秋季节 NH₃-N 去除率相对较高,达47%,主要是因为夏、秋季湿地系统中植物生长、微生物大量繁殖,植物吸收氨氮用于自身生长,此时,微生物硝化作用也较强。冬季温度降低,植物收割,微生物数量及种类减少,NH₃-N 去除率仅为26%。

季节变化主要影响湿地系统内部温度,温度对湿地脱氮性能的影响主要包含两个方面:一是温度对植物生长的影响;二是温度对微生物硝化和反硝化作用的影响。冬季温度降低,植物随之枯萎或死亡,植物吸收能力减弱。微生物的硝化作用对温度极具敏感性,温度降低,硝化细菌繁殖慢且活性降低,直接影响脱氮能力。

湿地系统对磷的去除主要依靠植物吸收、基质吸附、微生物降解。夏、秋季植物生长好,对磷的吸附能力强,有机磷微生物转化作用好;冬季植物收割,微生物活动降低,影响对磷的吸附和降解。

综上所述,湿地构建中建议选择生长期长、对温度适应范围广、氮磷吸收能力强的植物,保证根系微生物种类多、代谢快、活性高,增强对氮、磷的去除,并适当考虑冗余设计,提高冬季去除率。

2.3 水力负荷对氮素去除效果的影响

考察了不同水力负荷下,湿地对 TN、NH₃-N 去除效果的影响因素,并通过调试运行参数得到满足 V 类水的运行条件。出水 TN 和 NH₃-N 浓度与污染负荷的关系分别见图7和图8。在不同水力负荷下,湿地对 TN、NH₃-N 的去除效果受进水污染负荷的影响。对于 TN 而言,当水力负荷为0.5 m³/(m²·d)、污染负荷<10 g/(m²·d)时,出水浓度基本保持稳定,表明该湿地系统具有一定的抗 TN 冲击负荷能力;当

水力负荷 $\geq 1.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、污染负荷 $>10 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水浓度随水力负荷的增加而增大。

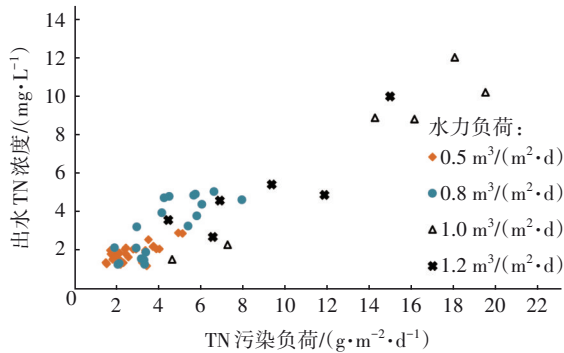


图7 TN污染负荷与出水浓度的关系

Fig.7 Relation of pollution load and TN concentration in the effluent

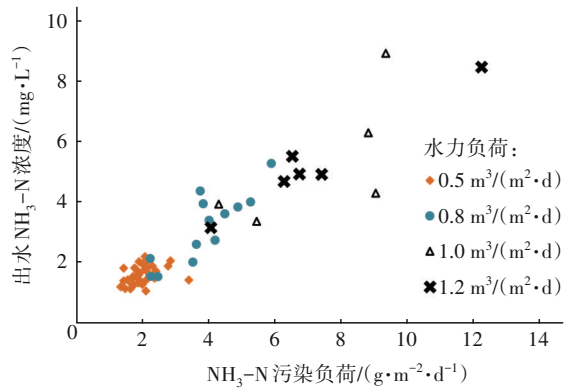


图8 $\text{NH}_3\text{-N}$ 污染负荷与出水浓度的关系

Fig.8 Relation of pollution load and $\text{NH}_3\text{-N}$ concentration in the effluent

对于 $\text{NH}_3\text{-N}$ 而言,当水力负荷为 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、污染负荷 $<5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 时,出水氨氮浓度低于 2.0 mg/L ,出水水质较好;随水力负荷升高、污染负荷增大,出水 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度增加。这是因为水力负荷较小时,植物与微生物对氮的吸收利用充分,硝化和反硝化也能充分进行。随着水力负荷增大,污水停留时间不足,植物、微生物、硝化和反硝化作用不充分,氮去除率降低。因此为了保证氮、磷的去除,建议湿地选择适当的水力负荷,保证足够的停留时间。本研究构建的湿地系统通过不断调试,建议控制水力负荷 $<0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、进水氮污染负荷 $<5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,出水水质基本可满足地表V类水标准。

2.4 湿地系统连续运行效果

结合主要影响因素,在湿地系统的运行过程中不断调试水力负荷,最终将其稳定在 $0.5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 左右。结合季节变化对植物进行维护及收割,连续

监测2月—12月的进出水水质,结果见图9~11。

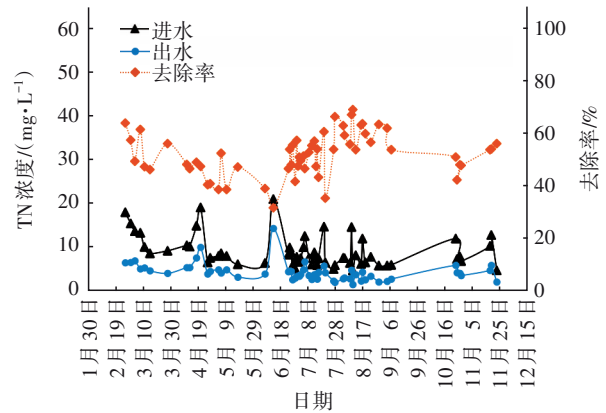


图9 湿地对TN的去除效果

Fig.9 Removal of TN by the wetland system

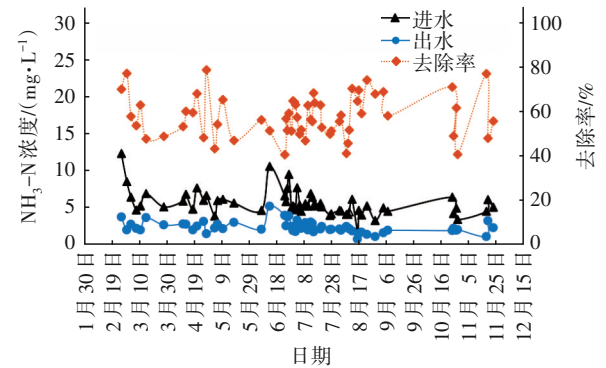


图10 湿地对 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除效果

Fig.10 Removal of $\text{NH}_3\text{-N}$ by the wetland system

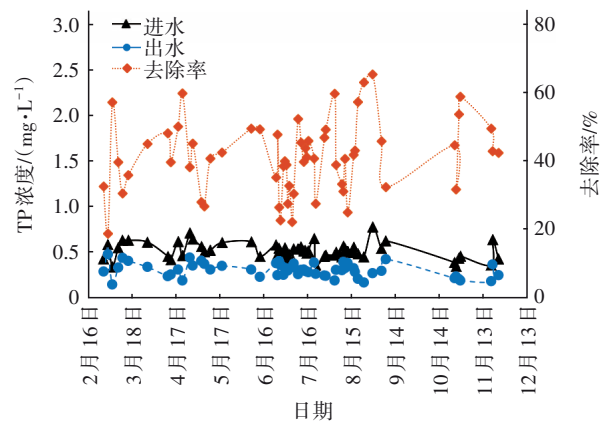


图11 湿地对TP的去除效果

Fig.11 Removal of TP by the wetland system

从检测数据可知,尽管进水水质存在一定波动,但出水水质相对稳定,说明湿地系统对污染物具有一定的抗冲击负荷能力。经湿地系统处理后, TN 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 TP 去除率分别可达49.6%、57.8%、41.0%。由此可见,采用垂直-水平流湿地处理现状

农村污水处理设施出水,可以进一步降低氮、磷等污染物浓度,有效减轻受纳水体污染。

3 结论

① 人工湿地系统对农村分散处理设施出水具有较好的净化效果,对TN、NH₃-N、TP的去除率分别可达49.6%、57.8%、41.0%。

② 垂直-水平流湿地系统对氮的去除主要发生在垂直流段,去除率达48.5%;磷在垂直流和水平流段均得到有效去除,去除率达41.0%。

③ 水力负荷影响湿地系统处理效果,建议控制水力负荷<0.5 m³/(m²·d)、氮污染负荷<5 g/(m²·d),出水水质基本满足地表V类水标准。在湿地构建中可填充沸石、石灰石等,并合理选择植物,以增强对氮、磷的去除能力。

④ 季节变化影响对氮、磷的去除,夏、秋季对TN、NH₃-N、TP的去除率分别高达46%、47%、42%。

参考文献:

- [1] 李骏飞,李欢,杨磊三. 粤港澳大湾区创新治水模式分享[J]. 中国给水排水,2020,36(8):1-6.
LI Junfei, LI Huan, YANG Leisan. Brief discussion on the innovative water pollution control mode in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36 (8) : 1-6 (in Chinese).
- [2] 林卉,姜忠群,冒建华. 人工湿地在农村生活污水处理中的应用及研究进展[J]. 中国农业科技导报,2020,22(5):129-136.
LIN Hui, JIANG Zhongqun, MAO Jianhua. Application and research of constructed wetlands in rural wastewater treatment [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2020, 22(5):129-136(in Chinese).
- [3] 祝志超,缪恒锋,崔健,等. 组合人工湿地系统对污水处理厂二级出水的深度处理效果[J]. 环境科学研究,2018,31(12):2028-2036.
ZHU Zhichao, MIAO Hengfeng, CUI Jian, et al. Advanced treatment performance of combined constructed wetland system on secondary effluent from wastewater treatment plant [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31 (12) : 2028-2036 (in Chinese).
- [4] 肖海文,刘馨瞳,翟俊,等. 人工湿地类型的选择及案例分析[J]. 中国给水排水,2021,37(22):11-17.
XIAO Haiwen, LIU Xintong, ZHAI Jun, et al. Type selection of constructed wetlands and related design case analysis [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(22): 11-17 (in Chinese).
- [5] 张美兰,何圣兵,陈雪初,等. 天然沸石和硅酸钙滤床的脱氮除磷效能[J]. 水处理技术,2007,33(11):71-74.
ZHANG Meilan, HE Shengbing, CHEN Xuechu, et al. Removal of ammonia and phosphate by filtration bed packed with natural zeolite and calcium silicate [J]. Technology of Water Treatment, 2007, 33 (11) : 71-74 (in Chinese).
- [6] 赵东源,张生,赵胜男,等. 基于除磷效果的人工湿地基质组合筛选及影响因素的动力学分析[J]. 环境污染与防治,2018,40(10):1085-1089.
ZHAO Dongyuan, ZHANG Sheng, ZHAO Shengnan, et al. Screening of construct wetland matrix combinations base on phosphorus removal efficiency and kinetics analysis of different effect factors [J]. Environmental Pollution & Control, 2018, 40 (10) : 1085-1089(in Chinese).
- [7] 王宇娜,国晓春,卢少勇,等. 人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展:效果、机制和影响因素[J]. 农业资源与环境学报,2021,38(5):722-734.
WANG Yuna, GUO Xiaochun, LU Shaoyong, et al. Review of nitrogen removal in low-polluted water by constructed wetlands: performance, mechanism, and influencing factors [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38 (5) : 722-734 (in Chinese).
- [8] 李峰平,魏红阳,马喆,等. 人工湿地植物的选择及植物净化污水作用研究进展[J]. 湿地科学,2017,15(6):849-854.
LI Fengping, WEI Hongyang, MA Zhe, et al. Research progress of selection of plants for constructed wetlands and effect of plants purification on sewage [J]. Wetland Science, 2017, 15 (6) : 849-854 (in Chinese).

作者简介:董倩倩(1986-),女,山东临清人,硕士,高级工程师,从事给水排水设计工作。

E-mail:554040948@qq.com

收稿日期:2022-06-28

修回日期:2022-08-01

(编辑:李德强)