

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0640

李飞翔, 岳琛, 张超月, 等. 人工湿地去除水产养殖尾水中氮磷的影响因素识别[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(7): 925-932.

LI Fei-xiang, YUE Chen, ZHANG Chao-yue, et al. Identification of Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Removal from Aquaculture Wastewater by Constructed Wetlands[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(7): 925-932.

人工湿地去除水产养殖尾水中氮磷的影响因素识别

李飞翔^{1,2}, 岳琛^{2,3}, 张超月^{2,3}, 张瑞瑞², 杨丽阳¹, 穆景利², 黄亚玲^{2①} (1. 福州大学环境与安全工程学院, 福建福州 350108; 2. 闽江学院海洋研究院, 福建福州 350108; 3. 福建农林大学资源与环境学院, 福建福州 350002)

摘要: 以水产养殖尾水中氮、磷为研究对象, 基于 4 种流态 3 种类型人工湿地小试系统, 探讨水力停留时间、草本盐生植物——海马齿、生物质炭、水流方式、季节和环境因子等因素对总磷、总氮和氨氮去除效果的影响。结果表明, 水力停留时间为 0~3 d 时, 水力停留时间越长, 氮、磷去除效果越好, 且出水电导率和 pH 逐渐增大; 水力停留时间为 3 d 时, 种植海马齿在一定程度上提高了总氮、总磷和氨氮去除率; 在以沸石为主的系统中添加生物质炭, 系统总氮和氨氮去除率显著提高, 但出现磷析出现象; 在 4 种流态中, 上行垂直潜流人工湿地系统对氮、磷的去除效果最佳。电导率、溶解氧和 pH 均分别与总氮和总磷去除率呈显著正相关, 且 pH 与氨氮去除率也呈显著正相关; 对于不同季节而言, 夏季总氮和总磷去除效率最高, 春季氨氮去除效率最高, 水温与总氮、总磷和氨氮去除率均呈显著正相关。

关键词: 人工湿地; 养殖尾水; 氮磷; 氨氮

中图分类号: X703.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2022)07-0925-08

Identification of Influencing Factors of Nitrogen and Phosphorus Removal from Aquaculture Wastewater by Constructed Wetlands. LI Fei-xiang^{1,2}, YUE Chen^{2,3}, ZHANG Chao-yue^{2,3}, ZHANG Rui-rui², YANG Li-yang¹, MU Jing-li², HUANG Ya-ling^{2①} (1. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Institute of Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 3. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: This study investigated various factors affecting the removal of nitrogen and phosphorus from aquaculture wastewater. Specifically, how hydraulic retention time (HRT), herbaceous halophyte (*Sesuvium portulacastrum*), biomass carbon, water flow pattern, seasonal and environmental factors affecting the removal of total phosphorus (TP), total nitrogen (TN), and ammonia nitrogen ($\text{NH}_4^+\text{-N}$) in 12 constructed wetland systems. The results show that by setting up the HRT in the range of 0 to 3 days, the removal rates of nitrogen and phosphorus increased with the increase of HRT, meanwhile the conductivity and pH of effluent increased gradually. When the HRT was 3 days, *S. portulacastrum* plants could improve the removal rates of TN, TP, and $\text{NH}_4^+\text{-N}$ to a certain extent. Adding biomass carbon into zeolite-based system could significantly improve the removal rates of TN and $\text{NH}_4^+\text{-N}$, however, the biomass carbon played a negative role in the removal of TP in the system. Among the four water flow patterns used in this study, the upward vertical-flow wetland systems resulted in the best removal rates of nitrogen and phosphorus. Conductivity, dissolved oxygen, and pH were significantly and positively correlated with the removal rate of TN and TP, while pH was significantly and positively correlated with the removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$. The removal efficiencies of TN and TP were the highest in summer, and the efficiency for removal of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ was the highest in spring. The water temperature was positively correlated with the removal of TN, TP and $\text{NH}_4^+\text{-N}$.

Key words: constructed wetland; aquaculture wastewater; nitrogen and phosphorus; ammonia nitrogen

收稿日期: 2021-10-20

基金项目: 福建省自然科学基金(2020J05174); 福州市科技计划(2019-S-64); 福建省中青年骨干教师教育科研项目(科技类)(JAT190629)

① 通信作者 E-mail: yluang@mju.edu.cn

我国是水产养殖大国,2019年水产养殖产量占全国水产品产量的78%^[1]。水产养殖对于我国食物蛋白质的稳定提供具有不可替代的贡献,但随着养殖规模增加,养殖废水排放造成的环境污染问题日益突显。残余饵料和养殖排泄物等排放会增加水体中氮磷等污染物含量,导致水体富营养化,从而影响生态环境,制约社会经济的可持续发展。近年来,我国大力发展绿色水产养殖业,养殖废水污染控制受到社会各界高度重视。因此,探寻低能耗、低运行成本、操作简单、生态安全且适用范围广的养殖废水处理技术具有十分重要的生态和生产意义。

人工湿地作为一种废水处理技术,具有成本低、操作简单、不会形成二次污染等特点^[2]。人工湿地对污染物的去除能力主要是通过植物吸收、基质截留和微生物降解,即一系列物理化学和生物的共同作用完成^[3]。有研究^[4-5]表明芦苇对养殖尾水中总氮和总磷有较好的去除效果。人工湿地系统中基质主要通过吸附作用去除污染物,且不同基质的吸附效果也有差异^[6]。程丽芬等^[7]探究不同基质(活性炭与炉渣、陶粒和火山岩)净化养殖尾水的效果,结果表明这3种基质对总磷均有很好的净化作用。此外,不同水流方式的人工湿地对污染物的净化效能也存在一定差异。高春芳等^[8]通过构建表面流人工湿地、潜流人工湿地和地下渗滤3级组合生态处理工艺对比了不同水流方式去除率的差异,结果表明垂直潜流人工湿地对污染物的去除率高于水平潜流。

近年来,人工湿地处理技术被广泛应用于工业污水、生活污水和养殖废水等。由于人工湿地对污染物的净化效能受到水流方式、水力停留时间(HRT)、基质种类、植物种类和气候等多方面因素的影响,不同研究得到的去除效率不尽相同。此外,大部分研究针对单一变量,无法系统辨识各因素对人工湿地净化效能的影响程度^[9-10]。因此,该研究综合考虑水力停留时间、水流方式、植物、生物质炭、季节和环境因子(电导率、pH和溶解氧)等因素,系统探讨不同因素对人工湿地处理养殖尾水中氮、磷去除效率的影响,以期筛选出去除效率最优的组合条件,为人工湿地系统参数优化与应用提供理论基础和实践经验。

1 材料与方法

1.1 人工湿地系统参数

人工湿地采用课题组已构建的12套人工湿地

小试系统。人工湿地系统共设置无植物组、植物组和生物质炭组(植物加生物质炭)3种类型以及表面流、水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流4种流态。湿地单元材质为玻璃钢,其中,表面流和水平潜流的反应器为长方体(长80 cm,宽60 cm,高80 cm),垂直潜流的反应器为圆柱体(直径为80 cm),水位统一控制为60 cm,侧面设置3个采样口,统一从最底部采样口采样。

人工湿地基质为粒径9~16 mm小沸石、粒径16~33 mm大沸石、粒径6~9 mm麦饭石、粒径3~5 cm砾石和生物质炭(500℃裂解温度条件下制备的玉米秸秆)。表面流人工湿地系统基质铺设从下到上分别为5 cm厚砾石、30 cm厚小沸石,水平潜流和下行垂直潜流人工湿地系统基质铺设从下到上分别为5 cm厚砾石、20 cm厚大沸石、30 cm厚小沸石和10 cm厚麦饭石,上行垂直潜流人工湿地系统基质铺设从下到上分别为5 cm厚砾石、25 cm厚小沸石、25 cm厚大沸石和10 cm厚麦饭石。此外,在各系统出水管和进水管均铺设有一定量的砾石,防止进、出水管堵塞。

人工湿地系统水力停留时间主要参照HJ 2005—2010《人工湿地污水处理工程技术规范》进行设计,为了探究不同水力停留时间对污染物去除效率的影响,主要考察水力停留时间为1、2和3 d时的污染物去除效率。

人工湿地系统植被选择多年生且生命力顽强耐干旱,可以在淡水和海水中生存的草本盐生植物——海马齿,以保证其修复季节的连续性^[11-12]。选取的海马齿均为生长良好的植株,高度在15~20 cm之间,叶片数和叶片大小基本一致,种植密度为40株·m⁻²。

1.2 试验方案

所用废水来源于福建省淡水养殖良种繁育科研中试基地产生的养殖废水,试验周期为2020年9月—2021年9月,试验步骤包括:系统清洗阶段,采用24 h连续进水,水力负荷为10 L·h⁻¹,该阶段运行时间为1个月,进水为清水,以去除基质表面杂质;系统挂膜阶段,采取连续进水方式对湿地单元内基质进行微生物挂膜,进水为养殖尾水,该阶段运行时间为1个月;实验阶段,采用间歇式进水,即进水—排水—空置—进水的方式,进水时间为10 min,出水时间为15 min,空置时间为6 h,进水周期为4 d,进水系统运行1个月后,对其相关参数进行测定,待系统各参数稳定后开始采样。样品采集后装于1 000 mL聚乙烯瓶中,在现场采用WTW便携

式多参数水质测定仪(WTW Multi3630,德国)测定水温、pH、溶解氧和电导率后,用4℃采样箱贮存样品并立即运输至实验室。主要监测指标为总氮、氨氮和总磷浓度,所有指标分析严格按照文献[13]执行。采用2021年1月—2021年9月监测数据进行后续分析。

1.3 数据处理与分析

采用 one-way ANOVA 单因素方差分析研究不同组别水质指标和去除率总体分布的差异显著性,当 $P < 0.05$ 时表示呈显著差异;采用 Spearman 相关分析识别总氮、氨氮和总磷去除率与环境因子(溶解氧、pH、电导率)之间的关系;采用 Excel 2019、SPSS 26 和 Origin 28 软件进行数据预处理、统计分

析和作图。

2 结果与分析

2.1 人工湿地系统进出水水质状况

人工湿地系统进水水温、pH、溶解氧和电导率平均值分别为 $(20.5 \pm 8.4)^\circ\text{C}$ 、 6.75 ± 0.26 、 $(7.87 \pm 2.16) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(75.5 \pm 19.8) \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。在3种水力停留时间条件下,出水平均水温略低于进水,电导率和 pH 随着水力停留时间增加而逐渐增大,溶解氧浓度变化规律则相反。进水总氮、总磷和氨氮平均浓度分别为 (3.49 ± 1.56) 、 (1.41 ± 0.81) 、 $(0.54 \pm 0.19) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (表1)。

表1 不同水力停留时间(HRT)人工湿地系统进、出水水质

Table 1 Quality of influent and effluent water of the constructed wetland system with different hydraulic retention time (HRT)

指标	水温/ ℃	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	ρ (溶解氧)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	pH	ρ (总氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (氨氮)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	ρ (总磷)/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
进水	20.5±8.4	75.5±19.8	7.87±2.16	6.75±0.26	3.49±1.56	0.54±0.19	1.41±0.81
出水							
HRT为1d	19.2±5.6	135.9±19.9	7.05±2.37	7.57±0.19	2.66±1.71	0.12±0.07	0.54±0.19
HRT为2d	19.0±6.3	145.1±19.6	6.32±2.73	7.65±0.15	2.29±1.65	0.11±0.06	0.53±0.21
HRT为3d	20.5±8.0	148.4±21.3	5.43±3.37	7.73±0.17	1.47±1.02	0.10±0.05	0.51±0.20

2.2 不同人工湿地氮、磷净化效率比较

2.2.1 不同水力停留时间污染物去除效率

在设计1~3d水力停留时间范围内,人工湿地系统对总氮、氨氮和总磷的去除率随着水力停留时间增加而提高,HRT为3d时去除效率最高,平均去除率分别为 $(64.2 \pm 21.7)\%$ 、 $(83.2 \pm 10.0)\%$ 和 $(52.5 \pm 30.3)\%$ 。对总氮、总磷和氨氮去除率来说,HRT为2d与1d相比,HRT为3d与2d相比和HRT为3d与1d相比均显著提高($P < 0.05$)。

2.2.2 植物对污染物去除效率的影响

基于HRT为3d时无植物组和植物组水质监测数据,进一步分析不同流态条件下种植海马齿对污染物去除的影响(图1)。如图1所示,植物组4种流态处理总氮和总磷去除率均高于无植物组,植物组表面流、水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流处理总氮平均去除率比无植物组分别提高4.9、7.7、7.3和2.1百分点,总磷平均去除率分别提高0.5、1.8、1.5和1.3百分点,植物组水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流处理氨氮平均去除率比无植物组分别提高3.9、2.5和8.0百分点。相对于无植物组,植物组各流态对总氮、总磷和氨氮去除率的提高由高到低依次为水平潜流、下行垂直

潜流和水平潜流。植物组上行垂直潜流处理污染物去除率最高,对总氮、氨氮和总磷的最高去除率分别为70.3%、80.2%和63.2%。

2.2.3 生物质炭对污染物去除效率的影响

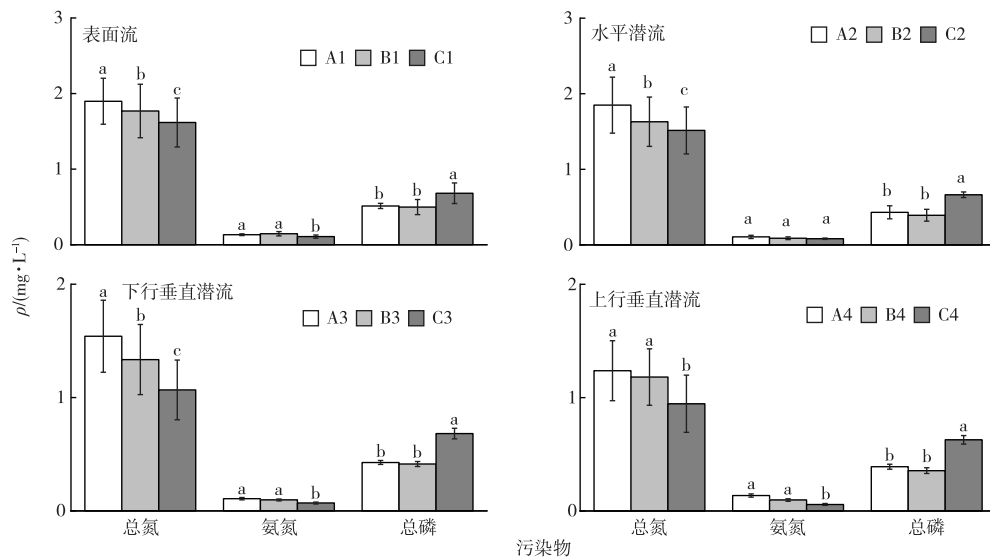
基于HRT为3d时4种流态生物质炭组和植物组出水总氮、氨氮和总磷浓度数据,探讨生物质炭对污染物去除效率的影响(图1)。如图1所示,生物质炭组总氮去除率显著高于植物组($P < 0.05$),生物质炭组表面流、水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流处理总氮平均去除率分别为 $(59.4 \pm 24.4)\%$ 、 $(63.2 \pm 24.0)\%$ 、 $(76.6 \pm 21.7)\%$ 和 $(80.7 \pm 21.8)\%$ 。同样,生物质炭组4种流态处理氨氮去除效果也比植物组好,表面流、水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流处理氨氮平均去除率分别为 $(78.9 \pm 9.8)\%$ 、 $(83.9 \pm 9.4)\%$ 、 $(86.0 \pm 8.9)\%$ 和 $(88.6 \pm 9.0)\%$ 。其中,生物质炭组表面流、下行垂直潜流和上行垂直潜流处理氨氮去除率显著高于植物组($P < 0.05$)。而植物组4种流态处理总磷去除率均显著高于生物质炭组($P < 0.05$)。

2.2.4 不同水流方式人工湿地系统对氮磷去除效率的影响

基于生物质炭组4种流态处理出水总氮和氨氮

浓度以及植物组出水总磷浓度数据,分析不同流态对氮磷去除效率的影响(图 2)。如图 2 所示,在生物质炭组中,各流态处理总氮去除率从高到低为上行垂直潜流>下行垂直潜流>水平潜流>表面流,其中,上行垂直潜流处理总氮去除率显著高于下行垂直潜流、水平潜流和表面流($P<0.05$),下行垂直潜流处理总氮去除率显著高于水平潜流和表面流($P<0.05$),水平潜流处理总氮去除率显著高于表面流($P<0.05$)。在生物质炭组中,各流态处理氨氮去除率从高到低也为上行垂直潜流>下行垂直潜流>水平潜流>表面流,其中,上行潜流处理氨氮去除率显

著高于下行垂直潜流、水平潜流和表面流($P<0.05$),下行垂直潜流和水平潜流处理氨氮去除率显著高于表面流($P<0.05$)。在植物组中,各流态处理总磷去除率表现为上行垂直潜流>水平潜流>下行垂直潜流>表面流,其中,上行垂直潜流处理总磷去除率显著高于下行垂直潜流、水平潜流和表面流($P<0.05$),下行垂直潜流和水平潜流处理总磷去除率显著高于表面流($P<0.05$),水平潜流处理总磷去除率显著高于下行垂直潜流($P<0.05$)。总体而言,上行垂直潜流处理对总磷、总氮和氨氮的去除效果最佳。



A、B 和 C 分别为无植物组、植物组和生物质炭组,1、2、3 和 4 分别为表面流、水平潜流、下行垂直潜流和上行垂直潜流。同一幅图中,同一组直方柱上方英文小写字母不同表示不同人工湿地间出水某污染物浓度差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同人工湿地系统中污染物出水浓度

Fig. 1 Effluent concentration of pollutants in different constructed wetland systems

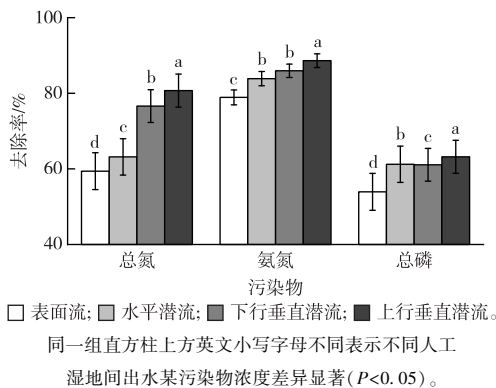


图 2 不同流态处理污染物去除率

Fig. 2 Removal rate of pollutants in different flow regimes

2.2.5 不同季节人工湿地系统氮磷去除效率

基于 HRT 为 3 d 时冬、春、夏季 3 种湿地类型 4 种流态处理总氮、总磷和氨氮浓度,探讨污染物去

除率的季节变化规律。其中,冬、春、夏季进水水温分别(10.5 ± 1.5)、(21.7 ± 0.7)和(29.3 ± 1.1) $^{\circ}\text{C}$,出水水温分别(10.2 ± 1.0)、(21.6 ± 0.8)和(28.3 ± 1.6) $^{\circ}\text{C}$ 。如图 3 所示,3 个季节总氮和总磷去除率由高到低均为夏季>春季>冬季,其中,夏季和春季总氮和总磷去除率显著高于冬季($P<0.05$)。3 个季节氨氮去除率由高到低为春季>夏季>冬季,其中,夏季和春季去除率显著高于冬季($P<0.05$),春季去除率高于夏季,但差异不显著。

2.3 环境因子对人工湿地氮磷净化效能的影响

环境因子与总磷、总氮和氨氮去除效率的 Spearman 相关系数见表 2。如表 2 所示,当基于 HRT 为 1~3 d 时数据进行分析时,电导率与总氮、总磷去除率呈极显著正相关($P<0.01$),pH 与总氮、氨氮和总磷去除率呈极显著正相关($P<0.01$)。当

基于 HRT 为 3 d 时数据进行分析时,出水溶解氧含量与总氮和总磷去除率呈极显著正相关($P < 0.01$),与氨氮去除率呈显著正相关($P < 0.05$);水温与总氮、总磷和氨氮去除率呈显著正相关($P < 0.05$)。

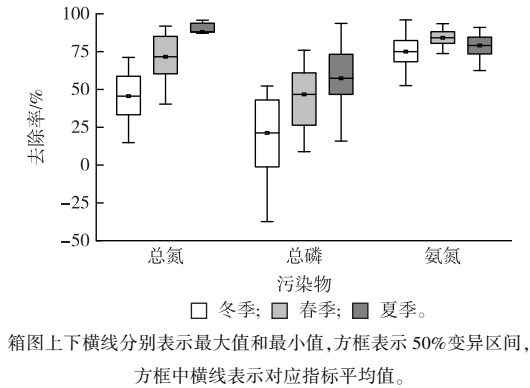


图3 不同季节污染物去除率

Fig. 3 Removal rate of pollutants in different seasons

表2 人工湿地系统氮磷去除率和溶解氧、pH、电导率的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of nitrogen and phosphorus removal rate with dissolved oxygen, pH and conductivity in constructed wetland systems

数据来源	水质指标	总氮	总磷	氨氮
HRT 为 1、2、3 d	电导率	0.300**	0.458**	0.019
	pH	0.534**	0.500**	0.283**
HRT 为 3 d	溶解氧	0.428**	0.664**	0.615*
	水温	0.780**	0.452**	0.767**

HRT 为水力停留时间。**表示在 0.01 水平上显著相关($P < 0.01$), *表示在 0.05 水平上显著相关($P < 0.05$)。

3 讨论

通过设置不同水力停留时间(HRT 为 1~3 d),探讨不同水力停留时间人工湿地系统对总氮、氨氮和总磷净化效能的影响。结果表明,总氮、氨氮和总磷去除率均随着水力停留时间增加而提高。水力停留时间越长,污染物与系统中植物、基质和微生物接触时间越长,使得植物和基质对污染物的吸附更充分,微生物对污染物的分解更加彻底,从而提高了氮、磷去除率^[14]。

植物组总氮、氨氮和总磷去除率要高于无植物组,说明植物在人工湿地系统对污染物的去除发挥一定作用。已有研究^[15-17]表明,植物对污水中氮、磷的去除量分别占湿地系统去除总量的 15%~80%和 24%~80%。海马齿是一种多年生且生命力顽强的盐生植物,可以保证季节连续性。杨芳等^[18]

采用海马齿进行生态浮床原位修复研究,发现海马齿生态浮床能够在一定程度上改善修复区海水水质,减轻网箱养殖水体的营养负荷,对氮、磷去除率分别为 11.7%和 19.9%。应锐等^[19]通过研究不同水生植物对养殖尾水的净化效果发现海马齿根茎不仅能吸收营养盐,还能增强系统硝化、反硝化作用,促进水中氮、磷等物质的去除。笔者研究发现植物对污染物去除虽有一定促进作用,但整体上提升效率无显著差异。这可能是因为在笔者研究中植物种植在湿地基质中根系还不够发达,对污染物的吸收能力有限造成的。

生物质炭是一种绿色含碳生物材料,将其用作人工湿地基质不仅可以吸附污染物,还可以补充植物所需碳源,促进植物生长,进而提升其对氮磷等营养盐的吸收^[19]。笔者研究发现生物质炭组中 4 种流态处理总氮、氨氮去除率均显著高于植物组。DENG 等^[20]通过总结由不同原料制备的生物质炭对尾水氮磷去除的影响,发现原料为竹子、硬木和树枝的生物质炭对氮磷的去除有明显促进作用。笔者采用原料为玉米秸秆的生物质炭对总氮和氨氮的去除有显著促进作用,这可能是因为在生物质炭不仅对污染物有一定吸附作用,还可以通过改变微生物群落结构来提高氮去除率^[21]。但是,生物质炭组磷出现显著析出现象。为了进一步验证试验所使用的生物质炭是否含磷,通过配制浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷溶液并添加等量生物质炭,分别在 1、2 和 3 d 时测定上清液磷浓度,发现其浓度分别为 2.08、2.39 和 $3.04 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,均高于初始浓度,且在实验周期内浓度随时间增加而增加,说明试验使用的生物质炭含有磷。这可能是导致笔者研究中生物质炭组磷去除效果不佳的主要原因。此外,有研究^[22]发现生物质炭对人工湿地除磷没有效果,也发现以石头和生物质炭为基质的系统除磷效率低于以单纯石头为基质的系统,推测未经改性的生物质炭表面通常具有负电荷,废水中其他负电荷化合物(如一些有机物)可以与磷酸盐竞争生物质炭上的交换点,使其除磷效果大大降低^[23]。

垂直潜流和水平潜流处理总氮、氨氮和总磷去除效果较佳,其中,垂直潜流处理效果最好,而表面流处理总磷去除效果最差。这可能是由于水体中污染物通过植物吸收、物理化学作用和微生物降解 3 种方式被去除^[24-25]。其中,基质过滤和吸附是人工湿地净化水质的主要过程,而表面流基质体积相对于其他流态更小,基质截留和吸附的功能相对较弱。陈军^[26]以沸石为基质研究不同流态人工湿地

对污染物去除的影响,结果也表明垂直潜流的去除率要优于表面流。此外,垂直潜流湿地布水方式有利于污水与湿地内部填料接触,从而提高去除率^[27]。相对于表面流而言,垂直潜流人工湿地中废水可与基质、植物根系和内部微生物更充分接触,有利于污染物的吸附降解^[28]。在垂直潜流中上行垂直潜流的去除率要高于下行垂直潜流,这与陈军^[26]的研究结果一致。这可能是由于上行垂直潜流的进水端在系统底部,底部污泥中含有大量微生物,这种进水方式可以使得含有营养物质的废水与系统底部微生物充分接触,进而促进微生物繁殖,从而提高废水中氮磷的去除^[29]。也有研究^[30]发现上行垂直潜流系统中反硝化菌丰度要高于下行垂直潜流,从而提高上行垂直潜流的脱氮能力。

夏季和春季总氮、总磷去除率均显著高于冬季,且夏季显著高于春季。Spearman 相关分析也发现,水温与总氮、总磷去除率均呈显著正相关(表2)。这可能是由于相对于冬季,夏季和春季的环境(温度、湿度等)更适合植物和微生物生长繁殖及新陈代谢,有利于人工湿地对废水中总氮、总磷的去除^[31]。此外,与冬季相比,海马齿在春、夏季生长时间更久,根系更为发达,可能会增加其对氮磷的吸收,进而促进其对氮磷的去除能力。部分研究也发现春、夏季植物生长茂盛,增加了对磷的吸收,而冬季植物萎蔫,其对磷的吸收能力下降,且植物体内磷元素可能被微生物分解释放,使得系统总磷去除率下降^[32]。已有研究^[33]发现氨氮去除率受季节影响较大,温度升高有利于促进微生物硝化过程,提高氨氮去除率。笔者研究也发现春季和夏季氨氮去除率显著高于冬季,这可能是由于冬季部分微生物可能处在冬眠期,微生物对氮的转化过程减弱,降低了湿地系统对氨氮的去除能力。但这不表示温度越高越好,因为温度增高,溶解氧饱和度会降低,因此硝化作用需在温度与溶解氧之间取得一个平衡关系以获得最高效率^[33],这可能是导致春季氨氮去除率略高于夏季的原因,但其具体的机制过程仍有待深入探讨。

在试验周期内,pH 和电导率随着水力停留时间增加而逐渐增大,这可能是随着水力停留时间增加,尾水与碱性基质的接触时间越长,导致 pH 升高;随着水力停留时间增加,基质中溶质会逐渐释放进入水中,从而导致电导率升高。杜显元等^[34]研究表明随着溶质迁移到水中,其电导率也逐渐上升。于此同时,电导率、pH 与氮磷去除率呈显著正相关,说明在一定范围内,pH 和电导率的提高有助

于提高人工湿地系统对氮磷的去除能力。有研究^[23]表明,偏碱性和偏酸性的人工湿地系统可以显著增加反硝化微生物活性,进而促进系统对氮的去除效率。当 HRT 为 3 d 时,溶解氧与氮磷浓度呈正相关关系,说明增加人工湿地系统内溶解氧含量,有助于去除氮、磷等营养盐。例如,王宁宁等^[35]研究发现充足的氧气可以促进尾水中聚磷菌的繁殖,进而提高尾水中磷的去除,同时有氧条件促进了硝化作用,使得氨氮转化为硝态氮,从而降低氨氮浓度。李荣涛等^[36]通过曝气方式增加人工湿地系统中溶解氧含量,发现较高的溶解氧含量在一定程度上促进了总氮去除。此外,在 4 种不同流态人工湿地中溶解氧含量从高到低为上行垂直潜流>下行垂直潜流>水平潜流>表面流,潜流人工湿地溶解氧含量高于表面流,且污染物去除效率也较高。其他研究^[37]也发现垂直潜流系统含氧量比较高,较高的含氧量给微生物提供了良好的生存环境,提高了微生物活性,从而提高了其对污染物的去除率。

4 结论

该研究探讨了植物、基质、水力停留时间、水流方式和环境因子对人工湿地系统净化养殖尾水中氮、磷的影响,主要结论如下:

(1)水力停留时间为 1~3 d 范围内,氮、磷去除率随着水力停留时间增加而提高。其中,对总氮、总磷和氨氮去除率来说,HRT 为 2 d 与 1 d 相比、HRT 为 3 d 与 2 d 相比和 HRT 为 3 d 与 1 d 相比均显著提高($P<0.05$)。

(2)海马齿对氮、磷的去除均有一定促进作用,但作用不显著。生物质炭对总氮和氨氮的去除有明显促进作用,但存在磷析出现象。

(3)对于不同流态而言,垂直潜流系统氮、磷去除率要显著优于表面流,其中,上行垂直潜流的去除效果最好。

(4)对于不同季节而言,夏季总氮和总磷去除效率最高,春季氨氮去除效率最高,冬季去除效果最差。

(5)水力停留时间为 1~3 d 范围内,电导率、pH 随着水力停留时间增加而增加,其中,pH 与总氮、总磷和氨氮去除率呈显著正相关,电导率与总氮和总磷去除率呈显著正相关。当 HRT 为 3 d 时,4 种流态中上行垂直潜流系统溶解氧含量要高于其他流态,溶解氧含量和水温与总氮、总磷和氨氮去除率呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 农业部渔业局. 中国渔业年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 1-47.
- [2] 孙茜, 徐圣君, 曾贤桂, 等. 畜禽养殖废水人工湿地处理技术研究进展[J]. 煤炭与化工, 2019, 42(4): 155-160. [SUN Qian, XU Sheng-jun, ZENG Xian-gui, et al. Research Progress of Treatment Livestock and Poultry Wastewater Technologies for Using Constructed Wetlands [J]. Coal and Chemical Industry, 2019, 42(4): 155-160.]
- [3] 黄铭意, 许丹, 李寻, 等. 人工湿地处理高盐废水研究进展[J]. 工业水处理, 2021, 41(3): 10-16. [HUANG Ming-yi, XU Dan, LI Xun, et al. Research Progress of Treatment High Salinity Wastewater by Constructed Wetlands [J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(3): 10-16.]
- [4] RAHMAN M A, ARMSON D, ENNOS A R. A Comparison of the Growth and Cooling Effectiveness of Five Commonly Planted Urban Tree Species [J]. Urban Ecosystems, 2015, 18(2): 371-389.
- [5] BOHÓRQUEZ E, PAREDES D, ARIAS C A. Vertical Flow-constructed Wetlands for Domestic Wastewater Treatment under Tropical Conditions; Effect of Different Design and Operational Parameters [J]. Environmental Technology, 2017, 38(2): 199-208.
- [6] 曾磊, 蔡世颜, 孙健. 一种城镇污水厂尾水强化脱氮除磷的AO人工湿地: CN211339178U [P]. 2020-08-25. [ZENG Lei, CAI Shi-yan, SUN Jian. AO Artificial Wetland for Enhanced Nitrogen and Phosphorus Removal of Tail Water of Urban Sewage Plant: CN211339178U [P]. 2020-08-25.]
- [7] 程丽芬, 张欣, 樊兰英, 等. 不同基质与植物湿地系统对煤矿废水的净化效果[J]. 森林与环境学报, 2019, 39(4): 410-416. [CHENG Li-fen, ZHANG Xin, FAN Lan-ying, et al. Purification Effects of Different Substrates and Plants Wetland System on Coal Mine Wastewater [J]. Journal of Forest and Environment, 2019, 39(4): 410-416.]
- [8] 高春芳, 刘超翔, 王振, 等. 人工湿地组合生态工艺对规模化猪场养殖废水的净化效果研究[J]. 生态环境学报, 2011, 20(1): 154-159. [GAO Chun-fang, LIU Chao-xiang, WANG Zhen, et al. Purification Performance of a Constructed Three-stage Wetland System for Ecological Treatment of Piggery Wastewater [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, 20(1): 154-159.]
- [9] MENZEL K, BARROS L, GARCÍA A, et al. Metal Sulfide Precipitation Coupled with Membrane Filtration Process for Recovering Copper from Acid Mine Drainage [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 270: 118721.
- [10] LIU M Z, LI X T, HE Y X, et al. Aquatic Toxicity of Heavy Metal-containing Wastewater Effluent Treated Using Vertical Flow Constructed Wetlands [J]. Science of the Total Environment, 2020, 727: 138616.
- [11] 李卫林, 温凭, 罗冬莲, 等. 海马齿生态浮床对石斑鱼生长及养殖效益的模拟研究[J]. 渔业研究, 2020, 42(5): 411-421. [LI Wei-lin, WEN Ping, LUO Dong-lian, et al. Simulated Study on the Effect of Ecological Floating Bed of *Sesuvium portulacastrum* L. on the Growth and Aquaculture Benefit of Grouper [J]. Journal of Fisheries Research, 2020, 42(5): 411-421.]
- [12] 李芊芊, 罗柳青, 陈洋芳, 等. 高盐污水处理人工湿地中耐盐植物的筛选[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5): 873-878. [LI Qian-qian, LUO Liu-qing, CHEN Yang-fang, et al. Selection of Salt-tolerant Plants for High-salinity Wastewater Treatment by Constructed Wetlands [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2017, 23(5): 873-878.]
- [13] 《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989: 243-284.
- [14] 徐祥熙, 王荣震, 徐立荣, 等. 不同水力条件下人工湿地处理效果中试研究[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(3): 217-222. [XU Xiang-xi, WANG Rong-zhen, XU Li-rong, et al. Pilot Study on Treatment Effect of Constructed Wetlands under Different Hydraulic Conditions [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology), 2021, 35(3): 217-222.]
- [15] ROZEMA E, VANDERZAAG A, WOOD J, et al. Constructed Wetlands for Agricultural Wastewater Treatment in Northeastern North America; A Review [J]. Water, 2016, 8(5): 173.
- [16] VYMAZAL J. Emergent Plants Used in Free Water Surface Constructed Wetlands; A Review [J]. Ecological Engineering, 2013, 61: 582-592.
- [17] MUSTAFA A, SCHOLZ M. Nutrient Accumulation in *Typha latifolia* L. and Sediment of a Representative Integrated Constructed Wetland [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2011, 219(1/2/3/4): 329-341.
- [18] 杨芳, 杨妙峰, 郑盛华, 等. 东山湾海马齿生态浮床原位修复效果研究[J]. 渔业研究, 2019, 41(3): 225-233. [YANG Fang, YANG Miao-feng, ZHENG Sheng-hua, et al. Study on the In-situ Remediation Effects of *Sesuvium portulacastrum* Ecological Floating Beds in Dongshan Bay [J]. Journal of Fisheries Research, 2019, 41(3): 225-233.]
- [19] 应锐, 陈婧芳, 高珊珊, 等. 石莼和海马齿对海水养殖水体的单一及协同净化效果[J]. 生态学杂志, 2018, 37(9): 2745-2753. [YING Rui, CHEN Jing-fang, GAO Shan-shan, et al. Single and Synergistic Effects of *Ulva lactuca* and *Sesuvium portulacastrum* on the Purification of Mariculture Wastewater [J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(9): 2745-2753.]
- [20] DENG S J, CHEN J Q, CHANG J J. Application of Biochar as an Innovative Substrate in Constructed Wetlands/Biofilters for Wastewater Treatment: Performance and Ecological Benefits [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 293: 126156.
- [21] DENG C R, HUANG L, LIANG Y K, et al. Response of Microbes to Biochar Strengthen Nitrogen Removal in Subsurface Flow Constructed Wetlands: Microbial Community Structure and Metabolite Characteristics [J]. Science of the Total Environment, 2019, 694: 133687.
- [22] LU L, CHEN B L. Enhanced Bisphenol a Removal from Stormwater in Biochar-amended Biofilters: Combined with Batch Sorption and Fixed-bed Column Studies [J]. Environmental Pollution, 2018, 243: 1539-1549.
- [23] DE ROZARI P, GREENWAY M, HANANDEH A E. Phosphorus Removal from Secondary Sewage and Septage Using Sand Media Amended with Biochar in Constructed Wetland Mesocosms [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 123-133.

- [24] 廖新伟, 骆世明. 香根草和风车草人工湿地对猪场废水氮磷处理效果的研究[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 719-722. [LIAO Xin-di, LUO Shi-ming. Effects of Constructed Wetlands on Treating with Nitrogen and Phosphorus in Wastewater from Hoggerly [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(6): 719-722.]
- [25] 袁东海, 景丽洁, 高士祥, 等. 几种人工湿地基质净化磷素污染性能的分析[J]. 环境科学, 2005, 26(1): 51-55. [YUAN Dong-hai, JING Li-jie, GAO Shi-xiang, et al. Analysis on the Removal Efficiency of Phosphorus in Some Substrates Used in Constructed Wetland Systems [J]. Environmental Science, 2005, 26(1): 51-55.]
- [26] 陈军. 生活污水中抗生素和耐药基因的人工湿地去除机制与系统优化[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017. [CHEN Jun. Removal of Antibiotics and ARGs from Domestic Sewage by Constructed Wetlands: Removal Mechanism and System Optimization [D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2017.]
- [27] FENG L K, WANG R G, JIA L X, et al. Can Biochar Application Improve Nitrogen Removal in Constructed Wetlands for Treating Anaerobically-digested Swine Wastewater? [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 379: 122273.
- [28] 丁怡, 唐海燕, 刘兴坡, 等. 不同类型人工湿地在污水脱氮中的研究进展[J]. 工业水处理, 2019, 39(7): 1-3, 9. [DING Yi, TANG Hai-yan, LIU Xing-po, et al. Research Progress in Different Kinds of Constructed Wetlands for Nitrogen Removal from Wastewater [J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(7): 1-3, 9.]
- [29] 蒋旭瑶, 吉喜燕, 黄德英, 等. 不同植物类型复合垂直流人工湿地根系微生物群落结构的研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 176-183. [JIANG Xu-yao, JI Xi-yan, HUANG De-ying, et al. Microbial Community Structure in the Roots of Three Kinds of Plants in Integrated Vertical Flow Constructed Wetlands [J]. Journal of Agro-environment Science, 2019, 38(1): 176-183.]
- [30] 张敏, 陶然, 杨扬, 等. 环境因素对不同工艺人工湿地反硝化功能基因丰度影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2645-2652. [ZHANG Min, TAO Ran, YANG Yang, et al. Effect of Environmental Factors on Abundance of Denitrifying Genes in Different Types of Constructed Wetlands [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2645-2652.]
- [31] 华昇, 陈浩, 刘云国, 等. 不同季节人工湿地处理污水效果[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(19): 68-72. [HUA Sheng, CHEN Hao, LIU Yun-guo, et al. Effects of Constructed Wetland on the Wastewater Treatment in Different Seasons [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2019, 47(19): 68-72.]
- [32] 刘文杰, 许兴原, 何欢, 等. 4种湿地植物对人工湿地净化生活污水的影响比较[J]. 环境工程学报, 2016, 10(11): 6313-6319. [LIU Wen-jie, XU Xing-yuan, HE Huan, et al. Comparison of Treatment Performances of Simulated Urban Sewage in Constructed Wetlands Planted with Four Types of Wetland Plant [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(11): 6313-6319.]
- [33] 尹连庆, 谷瑞华. 人工湿地去除氨氮机理及影响因素研究[J]. 环境工程, 2008, 26(增刊1): 151-155. [YIN Lian-qing, GU Rui-hua. Ammonia Nitrogen Removal Mechanism and Affecting Factors of Constructed Wetland [J]. Environmental Engineering, 2008, 26(Suppl. 1): 151-155.]
- [34] 杜显元, 陈宏坤, 黄丽, 等. 油田外排水对干旱戈壁区人工湿地土壤微生物生物量的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(15): 5388-5396. [DU Xian-yuan, CHEN Hong-kun, HUANG Li, et al. Effects of Oilfield Discharged Water on Soil Microbial Biomass in Constructed Wetland in Arid Gobi Region [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(15): 5388-5396.]
- [35] 王宁宁, 赵阳国, 孙文丽, 等. 溶解氧含量对人工湿地去除污染物效果的影响[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(6): 24-30. [WANG Ning-ning, ZHAO Yang-guo, SUN Wen-li, et al. Effect of Dissolved Oxygen on the Removal of Pollutants in Artificial Wetland [J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(6): 24-30.]
- [36] 李荣涛, 杨萍果, 李琳琳, 等. 潮汐流与曝气人工湿地对低污染水中氮去除的研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2021, 37(8): 962-971. [LI Rong-tao, YANG Ping-guo, LI Lin-lin, et al. Research Progress on Nitrogen Removal from Low Pollution Water by Different Types of Constructed Wetlands [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2021, 37(8): 962-971.]
- [37] 黄晓凤, 王启贵, 李静, 等. 人工湿地处理畜禽污水中抗生素及抗性基因效果研究进展[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(8): 1-6. [HUANG Xiao-feng, WANG Qi-gui, LI Jing, et al. A Review of the Effect of Constructed Wetlands on Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Livestock and Poultry Wastewater [J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2017, 38(8): 1-6.]

作者简介: 李飞翔(1995—), 河南商丘人, 主要研究方向为水污染防治。E-mail: 118838934241@163.com

(责任编辑: 王昌群)