

工程实例

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2023. 14. 017

硫磺/零价铁联合强化潜流人工湿地脱氮除磷性能

曲立民, 高彦博

(烟台市城市排水服务中心, 山东 烟台 264013)

摘要: 污水处理厂尾水中的氮、磷含量显著高于地表水环境质量标准,在其排放前有必要进行进一步深度净化。构建了四组潜流湿地系统,在系统HRT=2 d时,对比研究了硫磺、零价铁、硫磺+零价铁的添加对潜流湿地脱氮除磷效能的影响。为期10个月自然状态下的连续运行结果表明,硫磺能够显著提高湿地系统的反硝化脱氮性能,总氮平均去除率达到80%以上,但是出水中硫酸根含量会超过250 mg/L;零价铁能够将出水中总磷含量降至0.1 mg/L以下,但是脱氮强化作用不显著;硫磺与零价铁联合能够显著提高湿地系统脱氮除磷能力,出水中硫酸根和总铁含量也处于较低水平,且湿地系统的氧化亚氮排放量也处于较低水平,表明硫磺/零价铁联合适用于潜流湿地深度净化污水处理厂尾水。

关键词: 污水处理厂尾水; 潜流人工湿地; 硫磺/零价铁; 脱氮除磷; 氧化亚氮

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)14-0102-07

Enhanced Removal for Nitrogen and Phosphorus by Using Sulfur and Zero-valent Iron in Submerged Constructed Wetland

QU Li-min, GAO Yan-bo

(Yantai Urban Drainage Service Center, Yantai 264013, China)

Abstract: The contents of nitrogen and phosphorus in wastewater treatment plant (WWTP) effluent were higher than the standard of *Environmental Quality Standards for Surface Water* (GB 3838-2002), and it is essential to decrease their concentrations before discharging into the receiving water body. In this study, four submerged constructed wetlands were installed to investigate the influence of the addition of sulfur, zero-valent iron, sulfur and zero-valent iron on the removal for nitrogen and phosphorus. Ten months continuous operation results showed the sulfur could enhance the denitrification significantly (the average removal rate of total nitrogen was over 80%) while the sulfate in effluent was more than 250 mg/L. Phosphorus in effluent could decreased to below 0.1 mg/L with the usage of zero-valent iron, but its enhanced nitrogen removal was not obvious. It is observed that the combination of sulfur and zero-valent iron in wetland could enhance the removal ability for nitrogen and phosphorus, meanwhile sulfate and total ferrous in effluent were in low concentrations, and a low emission of nitrous oxide was obtained as well. Therefore, it is showed that the combination usage of sulfur and zero-valent iron is suitable for advanced purification of WWTP effluent.

Key words: wastewater treatment plant effluent; submerged constructed wetland; sulfur/

zero-valent iron; nitrogen and phosphorus removal; nitrous oxide

近年来,我国城镇污水处理厂出水排放大多执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A排放标准,其中总氮、总磷限值分别为15、0.5 mg/L,与地表水环境质量标准相比,仍然属于较高浓度。为降低对受纳地表水体的营养盐负荷冲击,有必要对污水处理厂出水中的氮、磷进一步削减后再排入受纳水体。污水处理厂出水属于典型的低碳氮比、低污染水,氮形态以硝酸盐为主,脱氮需要外加一定的电子供体才能产生效果^[1]。相比于传统的异养反硝化,自养反硝化因具有节能、污泥量少和无需外加碳源等优点而备受重视^[2]。其中硫铁混合自养不仅能同时去除氮、磷,还具有更宽的反应条件、更少的有害副产物和更强的pH缓冲能力^[3-4],因而备受关注。在诸多水处理技术中,潜流人工湿地以其占地面积小、耐冲击负荷、处理效果好、成本较低等优点,在污水处理中受到青睐,但是其填料多采用粗砂、砾石、沸石、陶粒、煤渣等基质,在处理低碳氮比污水时也存在脱氮效果不佳的问题。在本研究中,利用固态硫磺、零价铁作为人工湿地新型基质,通过与人工湿地相结合处理污水处理厂出水,以期提高潜流湿地对低碳氮比污水的氮磷去除效果,并分析其作用机理。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示。采用四组潜流人工湿地,湿地装置由PVC材料制成,尺寸为800 mm×300 mm×400 mm,有效水深为300 mm,有效体积为54 L,湿地系统包括配水区、湿地反应区和出水区三部分。湿地反应区上部种植菖蒲,种植密度为33株/m²。四组湿地系统的区别在于反应区的填料基质类型不同。在对照组反应器中,填充的全部为粒径为8~12 mm的砾石;在硫磺组反应器中,反应区前端的1/4区域填充了粒径为3~5 mm的硫磺颗粒(硫含量约100%),约16 kg;在零价铁组反应器中,前端1/4区域填充了铁刨花(长×宽×厚=50 mm×10 mm×3 mm,铁含量97%~99%),约50 kg;在硫磺-零价铁组反应器中,前端1/4区域填充了硫磺和铁刨花的混合基质,填充量各占50%,质量分别约8、25 kg。四组装置均由同一水箱提供试验原水,水量由蠕动

泵分别泵入四组湿地装置进水口。试验过程包括湿地装置的启动阶段和运行阶段。首先湿地系统经过前期4个多月的植物种植成活阶段后进入运行阶段,四组湿地系统处理水量为27 L/d,水力停留时间为2 d,水力负荷为0.3 m³/(m²·d),开展了为期10个月的连续运行试验,研究不同季节四组不同类型的湿地基质在自然状态下对模拟尾水中氮、磷营养盐的去除效能。

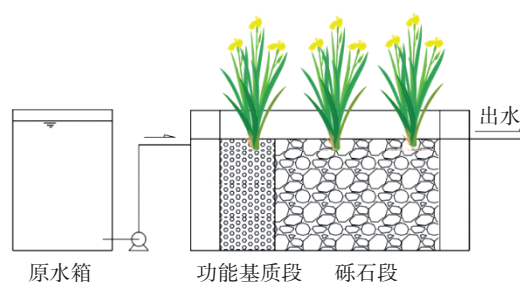


图1 试验装置

Fig.1 Experimental setup

1.2 试验用水

试验原水采用河道水体配制,向其中添加KNO₃、NH₄Cl、KH₂PO₄、NaHCO₃等模拟典型污水处理厂一级A尾水水质。试验原水水质如下:总氮(TN)为14.68~15.58 mg/L,硝酸盐氮(NO₃⁻-N)为12.4~13.6 mg/L,氨氮(NH₄⁺-N)为0.78~2.11 mg/L,总磷(TP)为0.37~0.47 mg/L,化学需氧量(COD)为28.5~38.8 mg/L。

1.3 分析项目及方法

试验期间,定期于采样日上午09:00—10:00采集进、出水水样,TN采用Analytik Jena multi N/C TOC/TN分析仪测定;TP:分光光度法;NH₄⁺-N:水杨酸-次氯酸盐光度法;NO₃⁻-N:分光光度法;COD:重铬酸钾法;硫酸根(SO₄²⁻):离子色谱法;总铁(TFe):邻菲罗啉分光光度法;氧化亚氮(N₂O)采用Agilent 6890N气相色谱仪测定。

N₂O采样及分析方法:采集及测定采用静态密闭箱法。气体采样箱由可调节高度的支架和聚乙烯塑料膜自制而成。支架高度可根据植物生长过程中的高度来调节。将采样箱倒扣在反应器上方,下端采用水封保证采样箱的密封性。箱内安装一个空气泵,采样箱设进气口和出气口,在箱体密闭

后0、15、30、45、60和75 min时进行气体采集,每次采样时,先开启空气泵搅拌5 min使箱内气体充分混合均匀,然后将气体出口接到300 mL气体采样袋中,带回实验室通过气相色谱测定 N_2O 通量。

2 结果与讨论

2.1 对硝酸盐氮的去除

试验装置于2021年3月正式进入运行期,至12月完整运行了10个月,四组湿地装置对硝酸盐氮的逐月去除效果如图2所示。

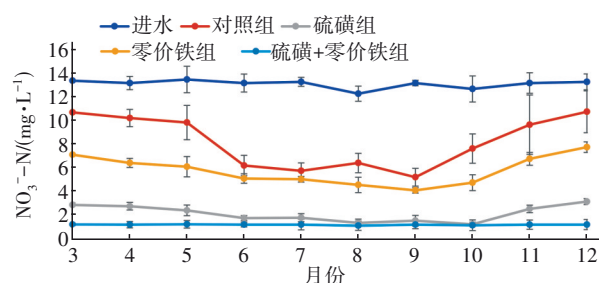


图2 四组湿地装置进、出水硝酸盐氮逐月变化

Fig.2 Monthly variation of NO_3^- -N in influent and four wetland effluents

对照组在运行初期的3个月内,对硝酸盐氮的去除效果相对较差,出水硝酸盐氮为10 mg/L以上,去除率为20%左右;进入6月,气温升高,生物作用显著提升,植物生长也越来越茂盛,湿地系统出水硝酸盐氮降至6 mg/L左右;到了11月,随着气温的降低,植物生长基本停滞,生物作用也有所下降,出水硝酸盐氮逐步回升到10 mg/L以上。相关研究表明,湿地系统对氮的去除主要取决于系统的生物反硝化性能,植物生长同化对氮的去除只占全部去除效果的10%左右^[5-6]。

对于硫磺组,硫磺的加入显著地提升了系统的硝酸盐氮去除率,初始阶段硫磺组的出水硝酸盐氮含量就降至3 mg/L左右,去除率达到了77.8%,可以看出单质硫能够有效提供电子供体,改善生物系统反硝化效能^[7];在随后的9个月里,对硝酸盐氮都保持了80%以上的去除率。对于零价铁组,零价铁的加入对硝酸盐氮的去除效果有了一定程度的提高,但是提高幅度不是很显著,温度稍低的3月、4月、11月和12月,出水中的硝酸盐氮都在6 mg/L以上,在5月—10月,较对照组的平均脱氮量提高了约1.9 mg/L,10个月期间平均硝酸盐氮去除率为55.5%。这是由于零价铁往往会因钝化现象的发生而导致表层被铁锈所包裹,从而限制了电子供给的

能力和铁自养反硝化性能^[8-9]。对于硫磺+零价铁组,出水硝酸盐氮一直保持在2 mg/L左右较低的含量,显著低于其他处理组($p < 0.05$),分析认为硫铁共同添加稳定提高了湿地系统对硝酸盐氮的去除效果。

2.2 对氨氮的去除

四组湿地装置出水中氨氮的逐月平均含量变化如图3所示。

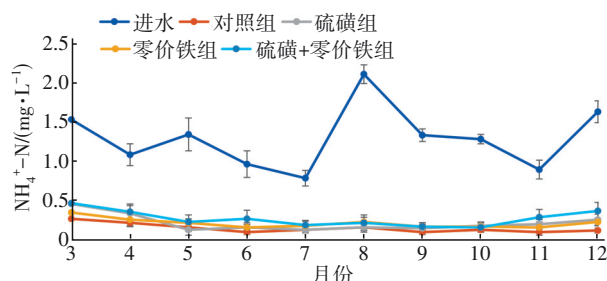


图3 四组湿地装置进、出水氨氮逐月变化

Fig.3 Monthly variation of NH_4^+ -N in influent and four wetland effluents

污水处理厂尾水中含有一定量的氨氮,四组湿地装置均对氨氮具有良好的去除效果,对照组出水氨氮含量最低,平均值约为0.14 mg/L,其次为零价铁组,出水氨氮平均值约为0.20 mg/L;硫磺组和硫磺+零价铁组出水中氨氮的平均含量约为0.20 mg/L,四组湿地装置之间的组间差异并不显著($p > 0.05$)。这表明湿地处理系统对较低含量的进水氨氮具有良好的去除效果,同时,硫、铁电子供体的添加也没有对湿地处理系统的氨氮去除性能造成较大的影响。

2.3 对总氮的去除

四组湿地装置出水中总氮的逐月平均含量变化如图4所示。

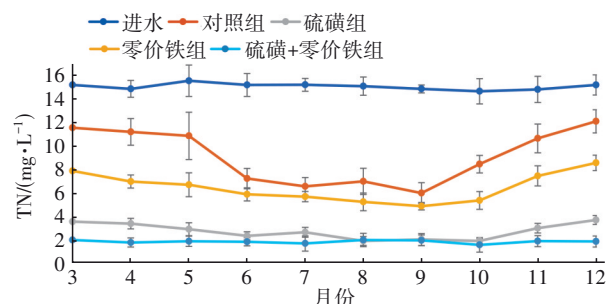


图4 四组湿地装置进、出水总氮逐月变化

Fig.4 Monthly variation of TN in influent and four wetland effluents

污水处理厂尾水中总氮主要由硝酸盐氮组成,硝酸盐氮占总氮含量的88.7%。由图4可以看出,四组湿地系统出水的总氮曲线与硝酸盐氮曲线较为相似,总氮的去除与硝酸盐氮的去除表现出同步性。在湿地系统中,脱氮机制主要包括植物吸收、基质吸附、微生物硝化反硝化等,其中硝化反硝化是主要脱氮途径,其除氮量占总氮去除量的50%以上^[10]。通过监测发现,系统出水中的亚硝酸盐氮含量一直处于较低水平,没有出现积累现象。在试验的10个月期间,对照组、硫磺组、零价铁组、硫磺+零价铁组的总氮平均去除率分别为39.33%、82.00%、57.25%和87.91%。

2.4 湿地系统中氧化亚氮的排放量

试验期间,四组湿地系统的氧化亚氮排放量检测结果如图5所示。

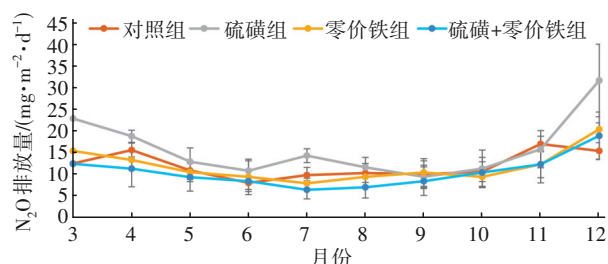


图5 四组湿地装置氧化亚氮排放量逐月变化

Fig.5 Monthly variation of N_2O in four wetlands

由图5可知,四组湿地装置的氧化亚氮排放量基本呈现出两端高、中间低的特点,即3月、4月、11月和12月的氧化亚氮排放量要明显高于5月—10月的排放量。究其原因,是由于氧化亚氮是硝化反应和反硝化反应不彻底的产物^[11],在温度较低时段湿地系统的生物作用要弱于高温时段,这一点由系统中硝酸盐氮和总氮的去除效果也可以看出。5月—10月,四组系统中的硝化和反硝化作用都相对更为显著,因此氧化亚氮的排放量也会较低一些。在四组系统中,硫磺组的氧化亚氮排放量最高,硫磺+零价铁组的排放量最低,相关研究表明,铁自养反硝化系统中往往会存在厌氧氨氧化脱氮途径,从而导致系统氧化亚氮排放量的降低^[12-13]。试验期间,对照组、硫磺组、零价铁组、硫磺+零价铁组的平均氧化亚氮排放量分别为11.91、15.85、11.74和10.38 $mg/(m^2 \cdot d)$ 。

2.5 对总磷的去除

四组湿地装置对进水的总磷净化效果如图6所

示。人工湿地系统中,磷的去除机理包括基质吸附、植物吸收和微生物去除,而磷最终从系统中去除依赖于湿地植物的收割和饱和基质的更换^[14]。由图6可以看出,在四组系统中,硫磺组出水中磷含量最高,其次为对照组,零价铁组和硫磺+零价铁组出水磷含量最低,平均含量在0.1 mg/L以下。由此分析可知,硫磺基质的存在对磷的去除还存在一定的不利影响,这可能是由于硫自养反硝化导致体系中的pH较低,致使砾石基质和植物根系中吸附的磷更容易溶出^[15]。对于零价铁组和硫磺+零价铁组,由于铁自养反硝化产生的铁离子可以与水中的磷酸盐发生化学沉淀^[16],从而使出水中的磷稳定保持在一个较低的水平。

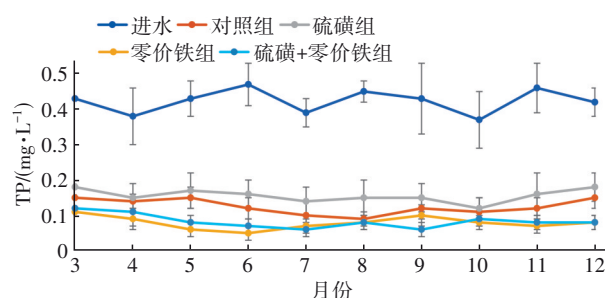


图6 四组湿地装置进、出水总磷逐月变化

Fig.6 Monthly variation of TP in influent and four wetland effluents

2.6 出水硫酸根和铁含量

在湿地处理系统中,由于添加了硫磺和零价铁基质,故对出水中的硫酸根和总铁的含量也进行了监测。进水和四组装置出水的硫酸根平均值如图7所示。

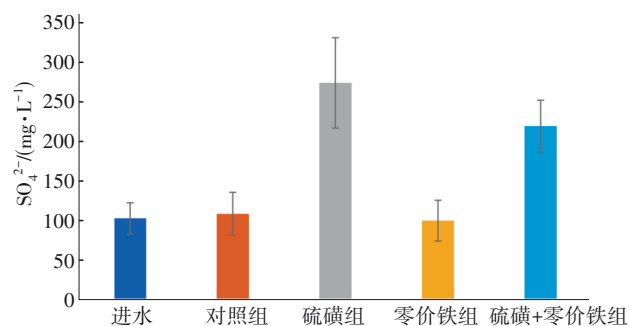


图7 进水及四组湿地装置出水硫酸根含量

Fig.7 Sulfate contents in influent and four wetland effluents

由图7可以看出,进水中的硫酸根含量为100 mg/L左右,对照组和零价铁组出水中的硫酸根含量

与进水相当,表明系统对硫酸盐基本没有去除效果;硫磺组的出水硫酸根则提升至270 mg/L左右,说明硫自养反硝化过程中产生了一定量的硫酸根,从而导致出水中硫酸根含量大幅上升^[17];对于硫磺+零价铁组,出水中的硫酸根含量在220 mg/L左右,显著低于硫磺组的含量($p < 0.05$),分析是由于在零价铁与硫磺共存环境下,零价铁能够分担一部分硫磺的电子供给作用传递给硝酸盐,从而降低了硫酸根的产生量^[18]。

图8是进水和四组装置出水中的总铁均值变化情况,进水总铁含量为0.12 mg/L,对照组、硫磺组、零价铁组、硫磺+零价铁组出水的总铁平均含量分别为0.10、0.09、0.15、0.13 mg/L,各组之间没有显著性差异($p > 0.05$)。对于零价铁组、硫磺+零价铁组,其中的零价铁会因为腐蚀作用、自养反硝化作用而产生 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} ,一部分铁离子会与水中的磷酸根发生沉淀作用而去除^[16],也有一部分铁离子会由于湿地装置后部砾石层的拦截作用而去除^[19],因此潜流湿地出水中的总铁含量也会处于较低的水平。

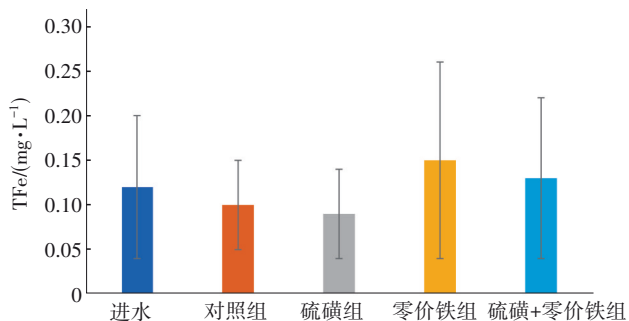
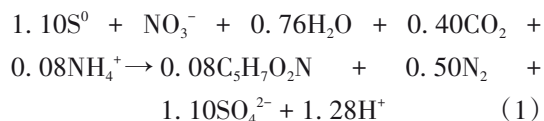


图8 进水及四组湿地装置出水总铁含量

Fig.8 TFe in influent and four wetland effluents

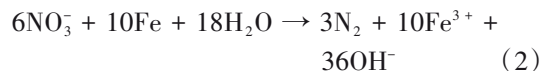
2.7 湿地脱氮除磷效能及经济性分析

硫磺添加在湿地系统中充当基质,能够促进系统中发生硫自养反硝化,该反应过程中不消耗有机碳,污泥产率低,但是存在产酸以及硫酸根的问题,反应过程为:



试验期间也观察到硫磺组出水的pH为6.2~6.8,低于其他三组湿地出水pH。而较低的pH对系统内反硝化过程是不利的,也容易导致氧化亚氮排

放量的增加,而且低pH也不利于湿地系统的除磷,所以相关研究都会在湿地系统中添加石灰石来调整系统的pH^[20]。但是这仍然不能解决系统出水中硫酸根含量过高的问题。系统中存在零价铁基质时,在生物作用下,水中硝酸盐可与零价铁发生铁自养反硝化,这是一个析氢产碱的过程^[21]:



反应产生的三价铁还能够与水中的磷酸盐发生化学沉淀起到除磷作用。但是当水中pH为中性或者偏碱性时,零价铁表面极易形成铁氧化层,从而对零价铁的电子传递造成阻碍,不利于反应体系的性能稳定保持^[22]。在硫铁共存环境下,发生硫自养反硝化和铁自养反硝化产酸产碱中和过程,体系中的pH保持相对稳定,这一点也能从试验期间硫磺+零价铁组pH处于6.7~7.5得到验证。硫自养反硝化和铁自养反硝化同时发挥作用,也导致出水中硫酸根含量下降;而铁自养反硝化过程产生的铁离子可以稳定地与进水中磷酸盐发生反应,剩余的铁离子也可以被潜流湿地中的砾石所截留,所以出水中的总磷和总铁都保持在较低的水平。由此可以看出,硫铁混合与潜流湿地相结合非常适用于尾水中氮、磷的稳定去除。

硫铁联合强化潜流人工湿地时,其经济性也是需要考虑的。在本研究中,共投加了约8 kg的硫磺和25 kg的铁刨花(零价铁),材料总费用约为28元。根据进、出水硫酸盐变化以及基质中铁刨花的质量变化估算得到硫磺、铁刨花的损耗量分别为1.08 g/d和3.60 g/d,即投加单批材料可使用约6 900 d。根据以上结果,计算得到硫铁联合深度处理污水厂尾水的材料费用约为0.15元/m³,而选用传统碳源(如葡萄糖)在达到相同处理效果时药剂费用约为0.17元/m³。因此认为硫铁同时作为脱氮电子供体强化潜流湿地脱氮除磷是具有经济性的,有较好的应用前景。

3 结论

通过在自然状况下开展为期10个月的连续性试验研究,得到如下结论:

① 添加硫磺能够显著提升湿地系统的生物反硝化效能,但也会导致出水中硫酸根含量升高至250 mg/L以上;

② 添加零价铁能够提高湿地系统化学除磷

效能,出水中总磷含量能够降至0.1 mg/L以下,但是对生物脱氮强化作用不显著;

③ 硫磺/零价铁联合能够显著提升潜流湿地脱氮除磷能力,且湿地系统中氧化亚氮的排放量较低,在低碳氮比水体(如污水处理厂尾水)深度脱氮除磷中具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 刘宗杨,程庆锋,刘盛余. 城镇二级出水深度脱氮研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 8-18.
LIU Zongyang, CHENG Qingfeng, LIU Shengyu. Research progress in tertiary nitrogen removal from secondary effluent of wastewater treatment plants [J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(12): 8-18 (in Chinese).
- [2] OH S E, BUM M S, YOO Y B, *et al.* Nitrate removal by simultaneous sulfur utilizing autotrophic and heterotrophic denitrification under different organics and alkalinity conditions: batch experiments [J]. Water Science & Technology, 2003, 47(1): 237-244.
- [3] 袁玉玲. 以天然黄铁矿和硫磺为硫源的自养反硝化特性研究[D]. 南京: 南京大学, 2011.
YUAN Yuling. Performance of Autotrophic Denitrification Using Natural Pyrite and Sulfur as Sulfur Source [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011 (in Chinese).
- [4] 周彦卿,郝瑞霞,王珍,等. 硫铁比对再生水深度脱氮除磷的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(6): 2229-2234.
ZHOU Yanqing, HAO Ruixia, WANG Zhen, *et al.* Effects of sulfur/sponge iron ratio for deep denitrification and phosphorus removal of reclaimed water [J]. Environmental Science, 2016, 37(6): 2229-2234 (in Chinese).
- [5] 陈俊宏,高旭,谢伟丹,等. 植物对潜流人工湿地净化微污染水效果的影响研究[J]. 环境工程学报, 2012, 6(2): 515-518.
CHEN Junhong, GAO Xu, XIE Weidan, *et al.* Impact of plants on purification efficiencies of subsurface horizontal flow constructed wetland treating micro-polluted water [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(2): 515-518 (in Chinese).
- [6] 陈嗣威,郑海粟,张晟曼,等. 不同植物组合对模拟污水处理厂尾水的净化效果及对根系微生物群落的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2022, 28(2): 387-393.
CHEN Siwei, ZHENG Haisu, ZHANG Shengman, *et al.* Effects of different plant combinations on purification effect of simulated wastewater treatment plant tail water and root microbial community [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(2): 387-393 (in Chinese).
- [7] 袁莹,周伟丽,王晖,等. 不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1835-1844.
YUAN Ying, ZHOU Weili, WANG Hui, *et al.* Study on sulfur-based autotrophic denitrification with different electron donors [J]. Environmental Science, 2013, 34(5): 1835-1844 (in Chinese).
- [8] 于妍,刘宁,廖祖刚,等. 铁型反硝化脱氮技术研究进展[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 83-91.
YU Yan, LIU Ning, LIAO Zugang, *et al.* Research progress of iron-type denitrification removal technology [J]. China Environmental Science, 2022, 42(1): 83-91 (in Chinese).
- [9] CUI X J, ZHANG M P, DING Y J, *et al.* Enhanced nitrogen removal via iron-carbon micro-electrolysis in surface flow constructed wetlands: selecting activated carbon or biochar? [J]. Science of the Total Environment, 2022, 815: 152800.
- [10] CHEN Y, WEN Y, ZHOU Q, *et al.* Effects of plant biomass on nitrogen transformation in subsurface-batch constructed wetlands: a stable isotope and mass balance assessment [J]. Water Research, 2014, 63(15): 158-167.
- [11] 李杨杰,陈振楼,王初,等. 长江口潮间带湿地涨退潮期 N_2O 的排放通量研究[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(3): 408-415.
LI Yangjie, CHEN Zhenlou, WANG Chu, *et al.* Exchange fluxes of N_2O between intertidal wetlands and atmosphere during the low and high tides in Yangtze estuary [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(3): 408-415 (in Chinese).
- [12] 赵仲婧,郝庆菊,涂婷婷,等. 铁碳微电解填料对人工湿地温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(7): 3482-3493.
ZHAO Zhongjing, HAO Qingju, TU Tingting, *et al.* Effect of ferric-carbon micro-electrolysis on greenhouse gas emissions from constructed wetlands [J]. Environmental Science, 2021, 42(7): 3482-3493 (in Chinese).

- [13] SUN S S, GU X S, ZHANG M P, *et al.* Biological iron nitrogen cycle in ecological floating bed: nitrogen removal improvement and nitrous oxide emission reduction [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268: 115842.
- [14] 王振, 刘超翔, 董健, 等. 人工湿地中除磷填料的筛选及其除磷能力[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(2): 227-233.
WANG Zhen, LIU Chaoxiang, DONG Jian, *et al.* Screening of phosphate-removing filter media for use in constructed wetlands and their phosphorus removal capacities [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(2): 227-233 (in Chinese).
- [15] 李芳芳, 施春红, 周北海, 等. 硫磺和黄铁矿为填料的生物滤池自养反硝化强化处理二沉尾水[J]. *环境科学研究*, 2016, 29(11): 1693-1700.
LI Fangfang, SHI Chunhong, ZHOU Beihai, *et al.* Enhanced treatment of secondary effluent via autotrophic denitrification biofilter process using sulfur and pyrite as fillings [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2016, 29(11): 1693-1700 (in Chinese).
- [16] 冯洪波, 潘增锐, 盛建龙, 等. 利用废弃铁刨花去除污水中的磷[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(7): 86-89.
FENG Hongbo, PAN Zengrui, SHENG Jianlong, *et al.* Reuse of waste iron shavings for phosphorus removal from sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(7): 86-89 (in Chinese).
- [17] 周娅, 买文宁, 梁家伟, 等. 硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能[J]. *环境科学*, 2019, 40(4): 1885-1891.
ZHOU Ya, MAI Wenning, LIANG Jiawei, *et al.* Nitrogen removal performance of a sulfur/pyrite autotrophic denitrification system [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(4): 1885-1891 (in Chinese).
- [18] 范军辉, 郝瑞霞, 李萌, 等. 基于反硝化脱氮的硫铁复合填料除磷机制[J]. *环境科学*, 2016, 37(11): 4275-4281.
FAN Junhui, HAO Ruixia, LI Meng, *et al.* Phosphorus removal mechanism of sulfur/sponge iron composite fillers based on denitrification [J]. *Environmental Science*, 2016, 37(11): 4275-4281 (in Chinese).
- [19] 王纳川, 付新喜, 陈永华, 等. 人工湿地除磷基质及其净化机理研究进展[J]. *环境生态学*, 2021, 3(2): 53-61.
WANG Nachuan, FU Xinxi, CHEN Yonghua, *et al.* Research progress on phosphorus removal fillers and purification mechanism of constructed wetlands [J]. *Environmental Ecology*, 2021, 3(2): 53-61 (in Chinese).
- [20] LIU L H, KOENIG A. Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification: batch experiments [J]. *Process Biochemistry*, 2002, 37(8): 885-893.
- [21] PENG S, KONG Q, DENG S H, *et al.* Application potential of simultaneous nitrification/Fe⁰-supported autotrophic denitrification (SNAD) based on iron-scrap and micro-electrolysis [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711: 135087.
- [22] 张文静, 黄勇, 毕贞, 等. ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3201-3207.
ZHANG Wenjing, HUANG Yong, BI Zhen, *et al.* Stability of ZVI-dependent autotrophic denitrification by ANAMMOX bacteria [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(7): 3201-3207 (in Chinese).

作者简介: 曲立民(1974—), 男, 山东烟台人, 大学本科, 高级工程师, 研究方向为污水处理工艺技术。

E-mail: 13688677613@163.com

收稿日期: 2023-03-05

修回日期: 2023-05-09

(编辑: 衣春敏)

贯彻执行《中华人民共和国水法》