

孟婷,吕涛涛. 基质生态浮床对 AAO 工艺出水的处理效果[J]. 净水技术, 2025, 44(9): 110-116.

MENG T, LÜ T T. Treatment effect of substrate ecological floating beds on the effluent from the AAO process [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(9): 110-116.

基质生态浮床对 AAO 工艺出水的处理效果

孟 婷^{1,*}, 吕涛涛²

(1. 四川建筑职业技术学院, 四川省城市污泥建材资源化利用工程研究中心, 四川德阳 618000; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西西安 710048)

摘 要 【目的】 为调查基质生态浮床对城镇污水处理厂出水的深度净化效果,【方法】 文章介绍了沸石、海绵铁和陶粒为基质的基质生态浮床系统,分析了该系统对厌氧-缺氧-好氧(anaerobic-anoxic-oxic, AAO)工艺出水污染物的处理效果,探究了系统处理前后水体中微生物群落结构的变化。【结果】 基质生态浮床系统提高了 AAO 出水中的 pH 和氧化还原电位,降低了悬浮物浓度和浊度,能够有效去除 AAO 出水中的氨氮、硝酸盐、总氮、总磷和化学需氧量,处理后的质量浓度分别为 0.03~0.84、0.04~0.32、0.34~0.90、0.01~0.30 mg/L 和 9.49~29.19 mg/L,均能满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水的水质要求。基质生态浮床系统改变了 AAO 出水中的微生物群落结构,拟杆菌门(Bacteroidetes)和绿弯菌门(Chloroflexi)等具有除磷功能,细菌门的相对丰度分别从 47.2% 和 8.4% 降低到 2.4% 和 4.5%,而芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)和硝化螺旋菌门(Nitrospirae)等具有脱氮功能细菌门的相对丰度分别从 0 增加到 47.3% 和 2.7%。【结论】 基质生态浮床能有效去除污水处理厂出水中的污染物,并为其在污水处理厂出水深度处理中的应用提供参考依据。

关键词 基质生态浮床 污水处理厂(WWTP) 厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺出水 深度处理 微生物群落结构

中图分类号: TU992 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2025)09-0110-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.09.014

Treatment Effect of Substrate Ecological Floating Beds on the Effluent from the AAO Process

MENG Ting^{1,*}, LÜ Taotao²

(1. Sichuan Engineering Research Center of Urban Sludge for Building Materials Resource Utilization, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China;

2. School of Water Resources and Hydro-Electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract [Objective] To investigate the advance treatment effect of substrate ecological floating beds on the effluent of urban wastewater treatment plants (WWTPs), [Methods] this paper introduced that the substrate ecological floating bed system with zeolite, sponge iron and ceramics was constructed, the treatment effect of the substrate ecological bed on pollutants in anaerobic-anoxic-oxic (AAO) effluent was analyzed, and the changes in microbial communities before and after systematic treatment was explored. [Results] The substrate ecological floating bed system increased the pH value and oxidation-reduction potential (ORP), and reduced suspended solids (SS) concentration and turbidity. The effluent mass concentrations of ammonia nitrogen, nitrate nitrogen, total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chemical oxygen demand reached from 0.03 mg/L to 0.84 mg/L, 0.04 mg/L to 0.32 mg/L, 0.34 mg/L to 0.90 mg/L, 0.01 mg/L to 0.30 mg/L, and 9.49 mg/L to 29.19 mg/L, respectively after treatment, and all of which met the requirements of surface water environmental quality class IV. In addition, the substrate ecological floating bed system changed the microbial community in the AAO effluent. The relative abundance of phosphorus removal bacteria such as Bacteroidetes and Chloroflexi decreased from 47.2% and 8.4% to 2.4% and 4.5%, respectively, while the relative abundance of nitrogen removal bacteria phyla such as Gemmatimonadetes and Nitrospirae increased from 0 to 47.3% and 2.7%, respectively. [Conclusion] The above research result indicate that substrate ecological floating bed system could effectively remove pollutants from

[收稿日期] 2024-07-01

[基金项目] 陕西省科技重点研发项目(2017SF-392)

[通信作者] 孟婷(1993—),女,博士研究生,研究方向为水污染控制,E-mail:mt0112_xaut@163.com。

effluent of WWTPs, providing a reference for its in the deep treatment of effluent from WWTPs.

Keywords substrate ecological floating bed wastewater treatment plant (WWTP) anaerobic-anoxic-oxic (AAO) effluent advanced treatment microbial community structure

污水处理厂作为连接生产生活废水和自然水体环境的纽带,是水循环过程的重要组成部分。污水处理厂出水水质会直接影响到自然水体的水环境质量。纵使污水处理厂执行现今最严格的排放标准——《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准,对自然水体而言,仍是劣 V 类水,属潜在污染源^[1]。因此,污水处理厂出水的进一步处理对改善受纳水体环境质量具有重要意义。

生态浮床技术是一种低成本、低能耗且景观效果好的生态处理技术。但其对污染物的降解效果受限于浮床植物的生长^[2],基质生态浮床的发展有效改善了传统生态浮床的这一状况,受到了学者^[3]的广泛关注。基质生态浮床通过在传统生态浮床上添加基质填料,增强对污染物的净化效果^[4]。Meng 等^[5]以沸石和海绵铁作为生态浮床的基质,增加了系统内微生物生物量和功能微生物的相对丰度,提高了对污水中氮、磷的去除效果。然而基质生态浮床对污水处理厂出水中污染物的去除效果还有待进一步研究。

经研究^[6]统计,厌氧-缺氧-好氧(AAO)工艺及其改进工艺是我国污水处理厂的主要运行工艺,占比约为 62%。在之前的研究^[7]中发现沸石能够显著降低水中的氨氮,海绵铁对硝酸盐以及磷具有很好的去除效果^[8],陶粒作为生态滤池、湿地的常见填料,能够高效快速挂膜^[9]。已有研究^[9]发现,当沸石、海绵铁和陶粒的比例达到 1:1:1 时,对水中氮、磷等污染物具有良好的处理效果。灯芯草(*Juncus effusus*)作为一种挺水植物,其分布区域广、易成活,能很好地吸收氮、磷^[10]。因此,本文基于以往研究^[3,9]成果搭建了以沸石、海绵铁和陶粒为基质、灯芯草为浮床植物的基质生态浮床系统,确定基质生态浮床运行参数,并以 AAO 工艺为主体的污水处理厂出水为研究对象,评估基质生态浮床系统对污水处理厂出水的深度净化效果,采用高通量测序技术分析了基质生态浮床系统处理前后微生物群落的分布状态,为基质生态浮床系统在污水处理厂出水深度处理中的应用提供参考依据。

1 试验材料和方法

1.1 基质生态浮床系统搭建及运行

本研究在西安理工大学实验室户外平台上进行。图 1 为基质生态浮床系统装置示意图,包含进水水箱(有效容积为 100 L)、进水蠕动泵、系统主体(有效容积为 88 L)。主体为 1 个梯形体(底部尺寸为 0.50 m×0.45 m;顶部尺寸为 0.65 m×0.50 m;高为 0.40 m)的储物箱,距顶部 5 cm 处固定 4 个不锈钢框(尺寸为 0.16 m×0.16 m×0.12 m)作为生态浮床的浮垫,每个浮垫内放置 5 个定植篮[底部直径为 0.08 m、高为 0.10 m],定植篮内添加混合基质和种植浮床植物。结合之前对基质生态浮床系统的研究^[3,9],确定水力停留时间为 3 d,基质为沸石、海绵铁和陶粒各 60 g 的混合基质,植物为灯芯草,采用定植篮种植植物(3 株/篮),植物覆盖面积约为 41.4%。试验设置 3 个平行试验,在室外自然环境中进行。在开始试验前,采用模拟 AAO 出水进行了 1 个月的适应性试验,以确保试验过程中浮床基质已挂生物膜、浮床植物灯芯草能适应对应水质。正式试验采用 AAO 出水,开始于 2021 年 8 月 15 日,结束于 2021 年 10 月 1 日,共运行 45 d,期间水体温度为(21.6±1.8)℃。

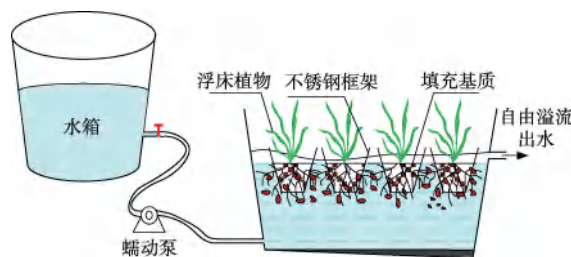


图 1 基质生态浮床试验装置

Fig. 1 Experiment Set-Up of Substrate Ecological Floating Bed

1.2 水样的采集与检测

进水水箱每天更换 AAO 出水。平均每 3 d 对进水水箱、基质生态浮床系统出水采集水样 1 次,水样的采集时间为上午 9:00~10:00。样品采集后立即送往实验室,对其中的悬浮物(SS)、氨氮、硝酸盐、总氮(TN)、总磷(TP)和化学需氧量(COD)进行

检测分析,其检测方法参照《水和废水监测分析方法》(第四版)。pH、水温、氧化还原电位(ORP)、电导率(EC)和浑浊度采用多参数便携水质分析仪(HQ30)进行原位测定。

1.3 微生物样品的采集与检测

待试验进行 45 d 时,将基质生态浮床系统进出水水样采用 0.22 μm 无机滤膜过滤,滤膜上的截留物即为水样的微生物样品。根据试剂盒要求提取样品中的脱氧核糖核酸(DNA),合格后将样品交由上海派森诺生物科技股份有限公司进行聚合酶链式反应(PCR)扩增分析。选取的扩增区域为 16S RNA V3-V4,引物为 341F: CCTAYGGGRBGCASCAG 和 806R:GGACTACNNGGGTATCTAAT。随后在 Illumina 平台对群落 DNA 片段进行双端测序,测序的结果在派森诺基因云平台上进行分析。

1.4 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 软件对所有试验数据进行

处理与分析,采用 Origin 2022 软件对试验数据进行绘图。

2 结果与讨论

2.1 理化指标分析

表 1 为基质生态浮床系统进水(AAO 出水)和出水的理化指标,可看出 AAO 出水为中性、还原性水质,具有比较高的 EC 和浑浊度[(21.3 $\pm$ 5.4) NTU]。经基质生态浮床系统处理后,整体为弱碱性、氧化性水质,其 pH 值由 7.05 增加到 8.43,ORP 由-14.6 mV 增加到 228.19 mV。研究^[11]表明,弱碱性的氧化环境有助于系统内硝化细菌、好氧反硝化菌的生长代谢,能促进系统对氮的去除。相对于 AAO 出水,基质生态浮床降低了水中 EC 和浑浊度,其中 EC 降低到 1 036.58 $\mu\text{S}/\text{cm}$,浑浊度降低到 1.31 NTU。该结果表明,基质生态浮床能够有效降低水体中的 EC 和浑浊度,这与基质及植物根系的吸附、SS 沉降有关^[12]。

表 1 基质生态浮床进出水理化指标

Tab. 1 Physical and Chemical Indices of Influent and Effluent in Substrate Ecological Floating Bed

项目	pH 值	SS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	ORP/mV	EC/($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	浑浊度/NTU
AAO 出水	7.05 $\pm$ 0.43	14.2 $\pm$ 7.3	-14.6 $\pm$ 7.7	1 060 $\pm$ 50.4	21.3 $\pm$ 5.4
基质生态浮床系统出水	8.43 $\pm$ 0.26	6.60 $\pm$ 1.56	228.19 $\pm$ 54.73	1 036.58 $\pm$ 56.91	1.31 $\pm$ 0.61

2.2 氮、磷去除效果分析

基质生态浮床系统对 AAO 出水中氮的处理效果如图 2(a)~图 2(c) 所示。基质生态浮床系统进水(AAO 出水)中氨氮、硝酸盐和 TN 的质量浓度分别为(2.62 $\pm$ 0.68)、(3.49 $\pm$ 0.49) mg/L 和 (6.02 $\pm$ 0.91) mg/L (图 2),已满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。试验条件下,基质生态浮床系统对氨氮、硝酸盐和 TN 的平均去除率分别为 71.65%、95.20% 和 91.28%,对应出水质量浓度分别为 0.03~0.84、0.04~0.32 mg/L 和 0.34~0.90 mg/L ,能满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅲ类水水质标准。基质生态浮床系统对 AAO 出水中 TP 的处理效果如图 2(d) 所示,TP 进水(AAO 出水)质量浓度为 0.39~0.94 mg/L ,已满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准。试验条件下,经基质生态浮床系统处理后,TP 的出水质量浓度达到了 0.01~0.30 mg/L ,其平均去除率为 65.1%,达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中Ⅳ类水的水质要求。

与其他污水处理厂出水的处理工艺相比,基质生态浮床系统 TN、TP 的去除效果处于较高水平(表 2),表明基质生态浮床有助于水体中氮、磷的去除。在基质生态浮床系统中,沸石、陶粒和海绵铁均能够有效吸附水中的氮、磷元素^[13],植物对氮、磷也具有很好的吸收作用^[14]。而基质与植物的共同作用可能提高了系统内微生物的生物量及脱氮功能菌的相对丰度^[5]。此外,系统的弱碱性、氧化性环境亦有助于系统内脱氮功能菌的生长^[11],以及系统脱氮。此外,基质生态浮床内 SS 和浑浊度的降低有利于水体中磷向沉积物迁移,降低水体中磷的含量。

2.3 有机物去除效果分析

AAO 出水中 COD 的质量浓度为 39.14~59.33 mg/L (图 3),满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 B 标准。试验条件下,基质生态浮床对 COD 的平均去除率为 58.7%,出水质量浓度为 9.49~29.19 mg/L ,基本满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅳ类水水质要求。该结果表明,基质生态浮床对 AAO 出水中 COD 具有较高的去除效率。基质表面存在大量的

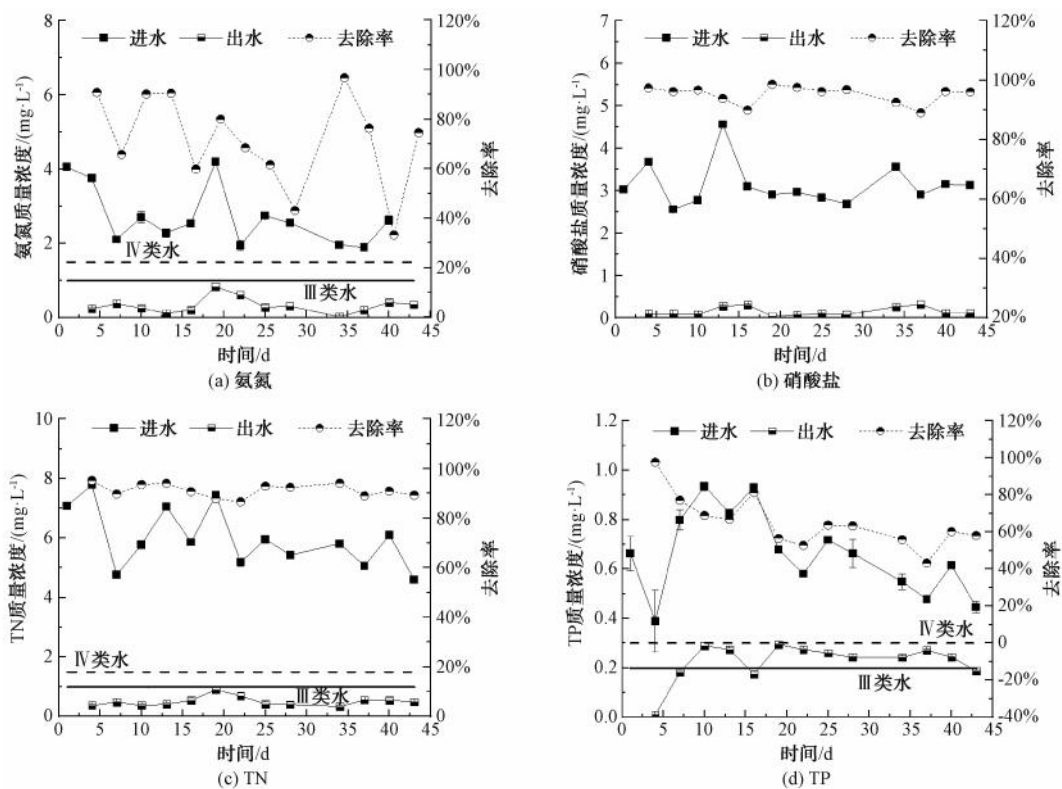


图2 基质生态浮床系统对AAO出水中氮、磷的处理效果

Fig. 2 Effect of Substrate Ecological Floating Bed System on Nitrogen and Phosphorus Removal in AAO Effluent

表2 不同处理系统对污水处理厂出水氮、磷去除效果

Tab. 2 Effect of Different Treatment Systems on Nitrogen and Phosphorus Removal in Effluent of WWTP

处理系统	日期	温度	去除率				参考文献
			氨氮	硝酸盐	TN	TP	
小试基质生态浮床	8月15日—10月1日	(21.6±1.8)℃	71.7%	95.2%	91.3%	65.1%	—
小试 丝竹滤料滤池	9月28日—4月20日	室温	20.4%	—	24.0%	—	[15]
小试 曝气生物滤池	—	25℃	97.3%	—	52.6%	—	[16]
小试 人工湿地	6月1日—9月1日	—	28.1%	—	17.2%	18.1%	[17]
小试 臭氧高级催化高级氧化	8月12日—9月1日	—	46.5%	—	32.9%	52.3%	[18]
小试 生物炭基人工湿地	—	22~32℃	90.0%	80.0%	80.0%	60.0%	[19]
中试 生态床耦合电化学	—	—	79.4%	25.9%	59.0%	56.1%	[20]

无机物、矿物质、腐殖质及营养盐等,能促进附着微生物的生长^[21]。此外,植物的根系分泌物也为微生物提供更多的营养物质和微量元素,有助于提高基质生态浮床系统内微生物生物量^[22]。基质与植物的共同作用增加了系统微生物生物量,增强了大分子有机物的降解能力^[23],有效去除了AAO出水中的有机物。

2.4 微生物群落结构分析

基质生态浮床系统处理前后微生物的群落丰度

分布存在明显差异(图4)。基质生态浮床处理前,进水(AAO出水)中的主要细菌门(相对丰度大于1%)包括拟杆菌门(Bacteroidetes)、变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteria)、绿弯菌门(Chloroflexi)、浮霉菌门(Planctomycetes),相对丰度分别为47.2%、29.5%、10.1%、8.4%、1.2%;芽单胞菌门(Gemmatimonadetes)(47.3%)、Proteobacteria(28.0%)、蓝藻菌门(Cyanobacteria)(7.3%)、Actinobacteria(4.6%)、Chloroflexi(4.5%)、硝化螺旋

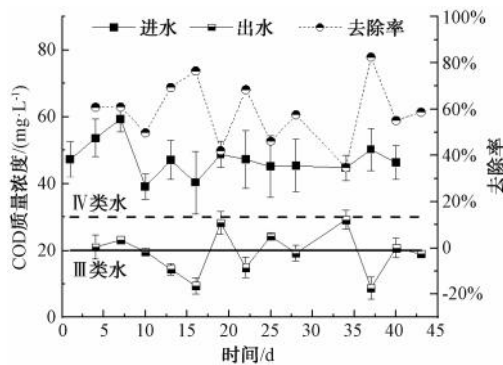


图3 基质生态浮床系统对 AAO 出水中有机物的处理效果
Fig. 3 Effect of Substrate Ecological Floating Bed System on Organic Matter Removal in AAO Effluent

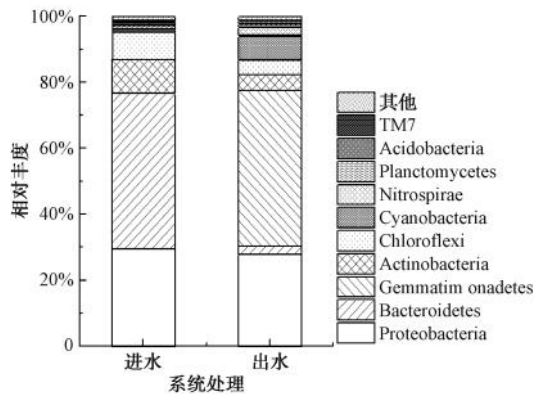


图4 基质生态浮床系统的微生物群落结构特征
Fig. 4 Characteristics of Microflora Structure in Substrate Ecological Floating Bed System

菌门 (Nitrospirae) (2.7%)、Bacteroidetes (2.4%)、酸杆菌门 (Acidobacteria) (1.1%) 和 Planctomycetes (1.0%) 为基质生态浮床处理后的主要优势菌门。

Bacteroidetes 和 Chloroflexi 在除磷方面发挥着重要作用^[24],其在基质生态浮床系统中的相对丰度明显比 AAO 出水中的低,表明基质生态浮床系统内的除磷有植物和基质的作用。Proteobacteria 是自然界最丰富的细菌群落,在大多数的淡水系统中都是主要的优势细菌^[25]。Gemmatimonadetes 和 Nitrospirae 与 TN 的降解密切相关,其在大量的繁殖过程中需要消耗氮,进而降低了水体中氮的含量^[25]。该结果表明,微生物脱氮为基质生态浮床系统氮去除的主要方式之一。相对 AAO 出水, Gemmatimonadetes 在基质生态浮床系统内的相对丰度明显较大,与植物生长密切相关^[26]。Actinobacteria 和 Cyanobacteria 的相对丰度会受到其

他细菌代谢活动的影响^[25]。Cyanobacteria 相对丰度的适当增加有助于系统内有机物的去除^[27],故基质生态浮床系统能进一步降解水体中的有机物。

3 结论

(1)基质生态浮床系统改变了 AAO 出水的理化性质。其中 pH、ORP 有所升高,SS 和浑浊度有所降低,有助于对水中氮、磷的去除。

(2)基质生态浮床系统能够有效去除 AAO 出水中污染物。试验条件下,对氨氮、硝酸盐、TN、TP 和 COD 的平均去除率分别达到 71.65%、95.20%、91.28%、65.1%和 58.7%,处理后出水能够满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的 IV 类水水质要求。

(3)基质生态浮床系统改变了 AAO 出水中的微生物群落结构。与 AAO 出水中微生物群落结构相比,除磷相关细菌门 (Bacteroidetes 和 Chloroflexi) 的相对丰度有所降低,脱氮相关细菌门 (Gemmatimonadetes 和 Nitrospirae) 的相对丰度有所增加。

参考文献

- [1] QIU Z, ZHANG S, DING Y, et al. Comparison of myriophyllum spicatum and artificial plants on nutrients removal and microbial community in constructed wetlands receiving WWTPs effluents [J]. Bioresource Technology, 2021, 321: 124469. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.124469.
- [2] WANG W H, WANG Y, WEI H S, et al. Stability and purification efficiency of composite ecological floating bed with suspended inorganic functional filler in a field study [J]. Journal of Water Process Engineering, 2020, 37: 101482. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101482.
- [3] 席晨晨. 基质生态浮床对污水厂尾水中污染物的削减效能研究 [D]. 西安:西安理工大学, 2022.
XI C C. Study on reduction efficiency of substrate ecological floating bed for pollutants in tail water of sewage plant [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [4] 韩雪宜,王怡,王文怀,等. 植物碳源强化浮床净化效果及对根系微生物群落影响 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(3): 9-14.
HAN X Y, WANG Y, WANG W H, et al. Purification efficiency and effect on plant roots microbial community of enhanced floating bed with plant carbon source [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39(3): 9-14.
- [5] MENG T, CHENG W, REN J, et al. Effect of zeolite-sponge iron combined substrate on microbial community in ecological

- floating bed [J]. *Environmental Research Communications*, 2023, 5(8): 85011. DOI: 10.1088/2515-7620/acf02c.
- [6] ZHANG J, SHAO Y, WANG H, et al. Current operation state of wastewater treatment plants in urban China [J]. *Environmental Research*, 2021, 195: 110843. DOI: 10.1016/j.envres.2021.110843.
- [7] ANDRÈS E, ARAYA F, VERA I, et al. Phosphate removal using zeolite in treatment wetlands under different oxidation-reduction potentials [J]. *Ecological Engineering*, 2018, 117: 18-27. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2018.03.008.
- [8] SI Z H, SONG X S, WANG Y H, et al. Untangling the nitrate removal pathways for a constructed wetland-sponge iron coupled system and the impacts of sponge iron on a wetland ecosystem [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 393: 122407. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122407.
- [9] 李异琨. 基于不同基质的生态浮床处理污水厂尾水的效果研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- LI Y K. Research on the effect of ecological floating bed based on different substrates in the treatment of tail water from sewage plants [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2020.
- [10] ZHANG T, XU D, HE F, et al. Application of constructed wetland for water pollution control in China during 1990-2010 [J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 189-197. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.06.022.
- [11] 宋威, 刘俊良. 植物多样性及组合对污水处理厂尾水的净化效果[J]. *水处理技术*, 2023, 49(9): 102-106.
- SONG W, LIU J L. The effect of plant diversity and combinations on the purification of tailwater from wastewater treatment plants [J]. *Technology of Water Treatment*, 2023, 49(9): 102-106.
- [12] LUCKE T, WALKER C, BEECHAM S. Experimental designs of field-based constructed floating wetland studies: A review [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660: 199-208. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.01.018.
- [13] MENG T, CHENG W, WANG M, et al. Effect of substrate on operation performance of ecological floating bed for treating simulated tailwater from wastewater treatment plant [J]. *Chemistry and Ecology*, 2021, 37(8): 715-728.
- [14] KUMWIMBA M N, ZHU B, WANG T, et al. Nutrient dynamics and retention in a vegetated drainage ditch receiving nutrient-rich sewage at low temperatures [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 741: 140268. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140268.
- [15] 彭惠靖, 曹文平. 丝竹滤料滤池去除尾水中的氮素污染物效果及特性研究[J]. *水处理技术*, 2022, 48(7): 121-124.
- PENG H J, CAO W P. Efficiency and characteristic of nitrogenous compounds removal in effluent using denitrifying filter with filamentous bamboo [J]. *Technology of Water Treatment*, 2022, 48(7): 121-124.
- [16] 张小姗, 温春晓, 何宁. 曝气生物滤池处理城镇污水厂尾水的强化脱氮及微生物群落特征分析[J]. *生态科学*, 2021, 40(6): 48-55.
- ZHANG X S, WEN C X, HE N. Study on enhancing denitrification and diversity of microbial community structure in the treatment of municipal wastewater treatment plant tail water by biological aerated filter [J]. *Ecological Science*, 2021, 40(6): 48-55.
- [17] 李青, 张琼华, 周卫东, 等. 人工湿地净化污水处理厂低浓度尾水的效果[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(10): 1456-1465.
- LI Q, ZHANG Q H, ZHOU W D, et al. Performance of constructed wetland for low concentration effluent purification from sewage treatment plant [J]. *Acta Hydrobiological Sinica*, 2022, 46(10): 1456-1465.
- [18] 吴江伟, 焦天忠, 楚金喜. 臭氧催化高级氧化技术在污水处理厂尾水处理中的应用研究[J]. *工业安全与环保*, 2021, 47(10): 99-103.
- WU J W, JIAO T Z, CHU J X. Treatment of advanced denitrification effluent by ozone catalytic advanced oxidation technology [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2021, 47(10): 99-103.
- [19] WANG H, WANG X, TENG H, et al. Purification mechanism of city tail water by constructed wetland substrate with NaOH-modified corn straw biochar [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 238: 113597. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2022.113597.
- [20] QIU Y, FENG Y, YAN Z, et al. Improving performance of pilot-scale ecological bed coupled with microbial electrochemical system for urban tail water treatment [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 865: 161289. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.161289.
- [21] ZHAO Z H, QIN Z R, XIA L L, et al. The responding and ecological contribution of biofilm-leaves of submerged macrophytes on phenanthrene dissipation in sediments [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 246: 357-365. DOI: 10.1016/j.envpol.2018.12.030.
- [22] HAN B, ZHANG S H, ZHANG L S, et al. Characterization of microbes and denitrifiers attached to two species of floating plants in the wetlands of Lake Taihu [J]. *Public Library of Science One*, 2018, 13(11): e0207443. DOI: 10.1371/journal.pone.0207443.
- [23] THESI K, KAJ S J, EMIL K, et al. Removal of chromophoric dissolved organic matter under combined photochemical and microbial degradation as a response to different irradiation intensities [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 118: 76-86. DOI: 10.1016/j.jes.2021.08.027.
- [24] 余晨兴, 林洪, 苏玉萍, 等. 闽江口-平潭海域有机解磷菌多样性及群落特征[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(5): 1863-1872.

- YU C X, LIN H, SU Y P, et al. Diversity and community characteristics of organic phosphate-mineralizing bacteria in the sea area between Minjiang Estuary to Pingtan [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1863–1872.
- [25] JIANG T, SUN S, CHEN Y, et al. Microbial diversity characteristics and the influence of environmental factors in a large drinking-water source [J]. Science of the Total Environment, 2021, 769: 144698. DOI: 10.1111/j.1574-6941.2006.00251.x.
- [26] 冯慧琳, 徐辰生, 何欢辉, 等. 生物炭对土壤酶活和细菌群落的影响及其作用机制[J]. 环境科学, 2021, 42(1): 422–432.
- FENG H L, XU C S, HE H H, et al. Effect of biochar on soil enzyme activity & the bacterial community and its mechanism [J]. Environmental Science, 2021, 42(1): 422–432.
- [27] TA D T, BUI Q L, LE MINH T, et al. Eutrophication status of lakes in inner hanoi and a case study of Cu Chinh Lake [J]. Journal of the Faculty of Agriculture Kyushu University, 2021, 66(1): 97–104.
- (上接第 101 页)
- [18] 胡瑞柱, 黄廷林, 杨尚业. 石灰法与氢氧化钠法去除地下水硬度试验对比研究[J]. 给水排水, 2016, 42(7): 29–35.
- HU R Z, HUANG T L, YANG S Y. Comparative study on hardness test of lime method and sodium hydroxide method to remove groundwater source [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(7): 29–35.
- [19] 袁红彬, 薛石龙, 方素梅, 等. 石灰纯碱法和双碱法处理高硬度废水的试验研究[J]. 科学技术创新, 2024(24): 91–94.
- YUAN H B, XUE S L, FANG S M, et al. Experimental study on treatment of high astewater by lime soda ash method and double alkali method [J]. Scientific and Technological Innovation, 2024(24): 91–94.
- [20] HU R Z, TIAN Z, FAN Z X, et al. Pilot test on acidic fluoride-containing wastewater treatment in the photovoltaic industry through induced crystallization with a focus on calcium fluoride recovery [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 341: 126879. DOI: 10.1016/j.seppur.2024.126879.
- [21] HU R Z, HUANG T L, ZHI A F, et al. Full-scale experimental study of groundwater softening in a circulating pellet fluidized reactor[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(8): 1592. DOI: 10.3390/ijerph15081592.
- [22] HU R Z, HUANG T L, WANG T W, et al. Application of chemical crystallization circulating pellet fluidized beds for softening and saving circulating water in thermal power plants [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(22): 4576. DOI: 10.3390/ijerph16224576.
- [23] 孙书博, 谢益佳, 黄廷林, 等. 循环造粒流化床处理水厂排泥水的试验研究[J]. 中国给水排水, 2020, 36(7): 12–18.
- SUN S B, XIE Y J, HUANG T L, et al. Treatment of sludge water in waterworks by circulating granulation fluidized bed [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(7): 12–18.
- [24] 唐章程, 李恺弘, 赵承东, 等. 化学结晶造粒流化床系统软化城市中水的实验研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(12): 119–123, 137.
- TANG Z C, LI K H, ZHAO C D, et al. Experimental study on softening urban reclaimed water by chemical crystallization granulation fluidized bed system [J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(12): 119–123, 137.
- [25] ZENG G S, LING B, LI Z J, et al. Fluorine removal and calcium fluoride recovery from rare-earth smelting wastewater using fluidized bed crystallization process [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 373: 313–320. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.03.050.
- [26] 智奥帆. 化学结晶循环造粒法去除水中硬度的试验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- ZHI A F. Experimental study on the removal of hardness in water by chemical crystallization cycle granulation [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [27] SHIRURE V S, PORE A S, PANGARKAR V G. Intensification of precipitation using narrow channel reactors: Magnesium hydroxide precipitation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2005, 44(15): 5500–5507.
- [28] LUO Q J, LEI Y T, CHEN J Y, et al. IOP conference series: Earth and environmental science: Treatment of high fluorine surface water by crystal seed method [C]. England: IOP Publishing Ltd, 2020.