

净水技术前沿与热点综述

纪伟, 朱洛娴, 张舒, 等. 人工湿地深度处理市政尾水研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(6):9-19.

JI W, ZHU M X, ZHANG S, et al. Research progress on constructed wetland for advanced treatment of municipal tailwater [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(6):9-19.

人工湿地深度处理市政尾水研究进展

纪伟¹, 朱洛娴², 张舒¹, 王文杰¹, 范秀磊^{2,*}

(1. 徐州市水利建筑设计研究院有限公司, 江苏徐州 221000; 2. 徐州工程学院环境工程学院, 江苏徐州 221018)

摘要 我国市政污水厂尾水排放量大、回用率低、氮磷浓度较高, 是造成水体富营养化的主要原因。尾水中较高浓度的氮磷易导致水中藻类等浮游生物大量繁殖, 破坏水体耗氧和复氧平衡, 使水质恶化。尾水总氮中主要以硝氮为主, 其去除需要有机物作为电子供体, 而尾水 C/N 较低, 常规工艺往往难以有效净化, 需要进一步的深度处理。因此, 该文围绕城市污水厂尾水特点, 通过文献归纳法, 总结强化人工湿地深度处理市政尾水效能的途径, 并从优化基质、外加缓释碳源、优化工艺 3 个方面来主要分析其强化机理, 提出了人工湿地深度净化市政尾水的研究重点和难点问题, 为提高市政尾水水质和保护水生态环境提供一些途径。

关键词 人工湿地 市政尾水 氮磷 低 C/N 比 深度处理 强化途径

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)06-0009-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.06.002

Research Progress on Constructed Wetland for Advanced Treatment of Municipal Tailwater

JI Wei¹, ZHU Mingxian², ZHANG Shu¹, WANG Wenjie¹, FAN Xiulei^{2,*}

(1. Xuzhou Water Conservancy Building Design and Research Institute Co., Ltd., Xuzhou 221000, China;

2. School of Environmental Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract Large discharge of tail water from municipal wastewater treatment plants at home, low reuse rate and high concentration of nitrogen and phosphorus are the main causes of water eutrophication. High concentration of nitrogen and phosphorus in tail water can easily lead to the proliferation of plankton such as algae in water, which can destroy the balance of oxygen consumption and reoxygenation and worsen the water quality. Nitrate nitrogen is the main nitrogen in tail water, and its removal needs organic matter as electron donor, while the C/N of tail water is low, which makes it difficult to purify effectively by conventional process and needs further advanced treatment. Therefore, based on the characteristics of municipal wastewater treatment plant tail water, this paper summarizes the ways to strengthen the efficiency of advanced treatment of municipal tail water by constructed wetland through literature induction, and mainly analyzes its strengthening mechanism from three aspects: substrate optimization, adding slow-release carbon source and process optimization, and puts forward the key and difficult problems in the research of advanced purification of municipal tail water by constructed wetland, which provides some ways to improve the quality of municipal tail water and protect the water ecological environment.

Keywords constructed wetland municipal tailwater nitrogen and phosphorus low ratio of C/N advanced treatment enhancement approach

[收稿日期] 2023-07-12

[基金项目] 国家自然科学基金青年项目(52000153);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究重大项目(22KJA610005);江苏省水利科技项目(2021077)

[作者简介] 纪伟(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事水务工程规划设计及水污染控制方面的研究工作,E-mail:24110436@qq.com。

[通信作者] 范秀磊(1989—),男,博士,副教授,主要从事水污染控制及生态修复方面的研究工作,E-mail:xlfan@xzit.edu.cn。

为了深入学习贯彻党的二十大精神,坚持“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路,全面落实治水重要精神,加强水资源保护和回收利用是当务之急。随着我国经济的快速发展,水资源浪费和污染现象严重。而我国的人均淡水资源匮乏,淡水资源的保护必须重视并且水资源的回收利用率需要提高。

城市污水厂尾水具有排放量大且集中、氮磷含量高、碳氮比(C/N)较低等特点^[1]。随着城市社会经济的发展,污水中的污染物含量和种类也不断增加,即使尾水经过再处理,水质可达到城市污水排放的一级A标准,但较于地表水环境质量标准,仍属于劣V类水或V类水。若直接将污水厂尾水排入自然水体,尾水仍属于污染源^[2]。因此,对污水厂尾水进行深度净化非常重要。

目前主要的尾水深度处理技术有磁混凝^[3]、双膜法^[4]、电化学法^[5]、反硝化滤池^[6]、膜生物反应器^[7]、生物砂滤池^[8]、人工湿地^[9]等。其中,人工湿地作为生态处理工艺,较其他尾水深度处理技术,其运行工艺简单、投资少、后期维护管理方便等优势更适于城市污水厂尾水深度处理^[10]。

但是目前针对尾水人工湿地的研究较分散,水质净化效果层次不一^[11],尚缺乏对这方面的总结和分析,来推动尾水人工湿地的进一步发展。

1 人工湿地净化效果制约因素

传统人工湿地净化尾水能力有限,易受环境因素制约。例如,表面流人工湿地占地面积大,易受季

节温度影响,低温或高温条件都不利于其运行。水平、垂直两种潜流湿地因污水只在基质层中流动,都存在基质易堵塞、使用周期短、布水不易均匀等问题^[12],导致后期维护不便且相对运行成本较高。传统湿地在处理污水厂尾水时,若水力负荷过大,则不利于湿地内微生物净化作用的充分进行,且湿地基质层的抗压能力较差,在一定程度上也增加了湿地堵塞的几率,导致污染物去除率下降。水力负荷过小,虽然有利于微生物与污染物的充分接触,但是后期溶解氧量的消耗以及有机碳源的不足,不利于硝化和反硝化作用的进行,脱氮效果较差^[13-17]。总体上,传统人工湿地在尾水处理上仍有不足,但湿地整体净化效果和景观效益较其他污水净化工艺好,将其用于污水厂尾水处理是较好的利用途径。

2 尾水人工湿地净化效果强化途径

若将人工湿地作为尾水深度处理工艺,克服其易受温度季节等环境因素影响以及内部结构净化能力有限等不足是非常必要的。因此,尾水人工湿地强化途径主要有以下3种。

2.1 基质优化

2.1.1 基质选择组合和制备优化

传统湿地基质如碎石等,质量大、运输成本高、污染物净化能力差,在净化污水厂尾水时,受低C/N限制,其去除污染物能力下降,且堵塞几率增加。部分单一轻质基质也存在某种污染物去除能力差的不足,所以合理的基质选择组合是必要的。表1比较了3种基质选择组合优化湿地工艺及效果。

表1 基质选择组合优化湿地工艺及效果

Tab. 1 Substrate Selection and Combined Optimization for Wetland Technology and Effect

基质组成	体积比	污染物	平均去除率
陶粒、火山岩、砾石 ^[18]	1:1:2		表面流+垂流/表面流+潜流
		TN	96.55%/95.38%
		COD _{Cr}	94.90%/90.48%
石灰石、硫磺、硫铁矿 ^[19]	5:4:1	TP	69.23%/92.16%
		TN	56.83%
		COD _{Cr}	18.93%
FeS ₂ 、钢渣 ^[20]	1:1	氨氮	>95%
		NO ₃ ⁻ -N	91.30±4.04%
		TN	93.05±2.65%

人工湿地中应用较多的轻质基质主要有陶粒、沸石、岩、矿类等^[21]。张军等^[18]通过将陶粒与火山岩和砾石组合,有效弥补了其TP吸附能力低的不足,提高了湿地的除磷能力。陈涛等^[19]通过将砾石

与石灰石、硫磺、硫铁矿混合基质自上而下铺设,有效提高了垂流湿地的脱氮效果。因为硫磺和硫铁矿在基质底层缺氧条件下可以很好地作为电子供体,促进自养反硝化作用的进行,而砾石堆积孔隙率

较大,提高了湿地的溶解氧量,有利于硝化细菌繁殖。沸石基质具有较好的离子交换和吸附能力,对氨氮的去除效果较好,常应用于脱氮除磷湿地^[22]。Liu 等^[20]通过将 FeS₂ 和钢渣按 1 : 1 的体积比混合作为湿地基质功能层,并按从下到上的顺序依次将砾石、沸石、功能层、沸石填充入湿地,发现 FeS₂ 溶出的铁使得微生物的电子传递过程加快,提高了 NO₃⁻-N 的去除率,而钢渣的加入可以减轻 FeS₂ 对植物根尖的毒性,相比于单独填入钢渣和 FeS₂ 的湿地,TN 去除率提高了 40%~50%,且没有明显的亚硝酸盐积累,去除效果较好。

虽然将基质按顺序组合可以提升湿地的水质净化效果,但在更换维护时工作量较大,通过将基质重新组合后制成新的模块化基质可以提高维护更换的效率。例如,徐扬等^[23]通过将陶粒和混凝土混合制

成 30 cm×30 cm×20 cm 的多孔滤料砌块,并将其铺设在垂直流湿地最上层,下层基质按粒径大小依次填入大粒径碎石、火山石和小粒径碎石。在长期运行条件下,对各污染物的去除率达到了 50%~70%,且孔隙率的增加也降低了湿地堵塞几率。同时,采用砌块化的基质更换更简便,便于湿地进行维护。因此,合理的基质选择组合和制备,既可以提高湿地的水质净化能力,也可以降低湿地的堵塞几率,有利于湿地长期运行。

2.1.2 基质改性

生物炭因其理化性质良好,被广泛应用于湿地基质。但针对尾水处理,传统生物炭的使用并不会发挥其最大优势,需要进行改性,使其更适于低碳尾水处理。表 2 比较了 2 种改性生物炭基人工湿地工艺效果。

表 2 改性生物炭基人工湿地工艺及效果

Tab. 2 Technology and Effect of Modified Biochar Based Constructed Wetland

制备材料	主要改性方式	理化性质	提高倍数/提高率
竹 ^[24]	HCl 活化后 Fe(FeCl ₃ ·6H ₂ O)包裹	脱氮相关基因丰度	1.3~27.8 倍
玉米秸秆 ^[25]	冻融处理(FTCs)	比表面积	28.9%
		孔体积	22.4%
		CO ₂ 吸附量	20.4%

Jia 等^[24]通过添加酸化铁改性生物炭(FeB)作为湿地基质,发现改性后湿地微生物的氮平均去除量为 2.52 g N/(m³·d⁻¹)。因为 FeB 可以富集脱氮细菌,特别是反硝化细菌,提高湿地的生物脱氮能力。Wang 等^[25]研究发现,生物炭经 FTCs 改性后,比表面积、孔隙率、CO₂ 吸附量均有所提高,但其结构遭到破坏,导致释碳能力下降,因此,通过 H₂SO₄ 改性的方式来促进电化学作用进行。因为硫酸改性生物炭可以生成并吸附可溶性硫酸盐,湿地运行时溶于水,促进反硝化作用的进行。该研究提高了秸秆的利用价值,也为生物炭改性研究提供了新的思路。

常规制备的生物炭多为粉末或颗粒形态,将其改性后直接投入湿地使用回收利用率低,易造成出水的二次污染,运行成本增加,不适于大规模推广^[26]。因此,探究生物炭固定化技术是必要的。例如,将生物炭制备为陶粒^[27],与聚氨酯泡沫的预聚态混合后制备成生物炭泡沫^[28]等。

除了对生物炭进行活化改性,对天然矿石等基质进行改性也是一个方向。Gao 等^[29]通过将海泡

石在 700 °C 下焙烧 4 h,发现热改性后海泡石的结构保持不变,但杂质减少使其表面更光滑,增大了比表面积和吸附容量,湿地除磷能力提高。

因此,对基质进行合适的改性处理可以增强其去污效能,是提升尾水湿地脱氮除磷能力的一种有效途径。但目前基质改性的研究效果层次不一,大多是在实验室基础之上,尚缺乏成熟的改性工艺,改性途径目前只适用于优化污染物的去除,不适于大规模推广。

2.1.3 新型基质

随着无废城市建设的提出,“以废制废”的观念和思路对解决废弃物的出路具有重要指导意义,建筑废弃物材料也逐渐出现在湿地基质使用领域。表 3 分析了建筑物废弃物基质湿地的工艺效果。

Zhang 等^[30]将废砖块按照粒径大小(2~20 mm),从下至上铺设作为垂直流湿地基质层,发现废砖可以为系统生物膜提供附着生长载体,使得湿地微生物量维持较为稳定,对进水污染物有较好的去除效果。王晗阳等^[31]通过研究对比废砖和碎石作为湿地基质时的水质净化效果,发现废砖基湿地

表3 建筑废弃物基质湿地工艺效果分析
Tab. 3 Effect Analysis of Wetland Process with Construction Waste Substrates

基质名称	污染物质	平均去除率
废砖 ^[30]	COD _{Cr}	66.52%
	氨氮	72.10%
	TN	56.53%
	TP	91.55%
废砖 ^[31]	氨氮	75.63%
	TN	66.04%
碎石 ^[31]	氨氮	60.93%
	TN	45.09%
混凝土(RCA)、砖(RBA)、 混凝土-砖混合物(C&B) ^[32]	TN	16.20%、
		20.20%、
		18.70%
	COD _{Cr}	66.30%、 62.90%、 74.90%

更利于脱氮细菌生长,污染物去除效果优于碎石基质湿地。研究以垂直流湿地为基础,分别装载RBA、RCA和C&B为湿地基质,发现3种废弃物基质对TP和COD_{Cr}的去除效果均较好,其中混凝土基质湿地出水水质最好。且混凝土经过原位再生曝气和NaOH洗涤后,对氨氮和TP的去除率仍可以达到54.7%和84.8%^[32]。因此,废弃物基质不仅综合净化效果较好,还可以再生修复,重复利用率高,有效降低了湿地运行成本,实现良好的环境效益。

但对于尾水深度净化,探究更好的废弃物基质利用方式在目前的研究中更为重要。研究通过对比普通多孔混凝土板和先进多孔混凝土板对污水的净化效果,发现先进多孔混凝土板因为在孔隙中填充沸石-矿渣-活性炭组合基质,去污效能显著优于普通多孔混凝土板,且其高抗压性保证了湿地运行的稳定性^[33],表明了组合基质与新型基质结合利用可以取得较好的水质净化效果。研究^[34]发现,以废砖、废混凝土作为湿地基质时会造成出水的pH升高,从而降低了湿地污染物的去除能力,特别是废混凝土基质湿地出水pH值可达11.28。因此,废混凝土基质适用于酸性废水的处理,对于非酸性废水,要采取适当的措施,如与其他填料混合的方式来避免引起出水的pH升高。

建筑废弃物基质原材料广泛且能就地取材,有效降低了基质采购和运输成本,同时对废弃物的再

使用实现了废弃物的资源化,生态效益好。

2.1.4 基质选配方式优化

低温以及基质粒径配置不合理、运行方式等都会影响湿地堵塞。合理的基质选配,既能提高湿地的水质净化效果,又能降低湿地的堵塞几率。Zhong等^[35]研究发现,沸石、钢渣、贝壳等基质易产生磷物质,长期运行易造成湿地堵塞,所以合理的基质级配和孔隙率的控制是重要的。王文明等^[36]通过合理设计粒径级配,采用碎石来增加湿地孔隙率,缓解除磷基质石灰石的饱和堵塞问题,保证了出水较低的磷含量。也通过间歇运行排空的方式来定期清淤,降低了湿地的堵塞几率,保证了湿地的稳定运行。研究通过在湿地基质层顶部增加10cm的细砂,延长了湿地的保水时间,同时湿地对杂质的去除率也提高,渗透率增加使得湿地最大程度实现无堵塞^[37]。因此,合理的基质选配优化是提升湿地水质净化效益和降低堵塞几率的良好途径之一。

2.2 外加缓释碳源

尾水中NO₃-N的去除主要依靠微生物的反硝化作用。而反硝化细菌需利用有机物作为电子供体将硝氮转化为氮气。因此,提高尾水的可生化性对于强化人工湿地脱氮效能是必要的。缓释碳源主要分为固体缓释碳源(天然、人工合成)和液体缓释碳源两种。

2.2.1 天然固体缓释碳源

天然固体缓释碳源常见的主要是植物性缓释碳源。表4分析了几种添加植物性缓释碳源的工艺及效果。

表4 植物性缓释碳源工艺及效果
Tab. 4 Process and Effect of Plant Sustained-Release Carbon Source

碳源名称	投加方式/改性方式	污染物	平均去除率
芦苇秸秆 ^[38]	碾碎	NO ₃ -N	87.10%
		氨氮	85.72%
香蒲 ^[39]	边长为2~3cm块体, 2%NaOH碱浸1h	TN	75.45%
		NO ₃ -N	76.03%
		氨氮	91.33%
玉米芯 ^[40]	1~2cm ³ ,90℃, 2%NaOH碱浸1h	NO ₃ -N	>93.00%

农业废弃物不仅来源广,价格低廉,将其作为缓释碳源,还可降低秋收季节废弃农作物堆积对生态环境的不利影响,环境效益好。Tao等^[38]通过将芦苇秸秆碾碎后添加到垂直流湿地中间层,发现当投

加量为 16.7 g/kg 时,湿地对氨氮和 NO₃⁻-N 的去除率分别达到 85.72% 和 87.10%,且无 NO₂⁻-N 的积累,脱氮效果较好。

除了将植物直接粉碎添加,对其进行一定的加工预处理可以更好地提高植物的释碳能力。Sun 等^[39]通过对香蒲进行碱预处理,发现碱化处理可以提高植物中以乙酸为主的挥发性脂肪酸的释放,使得湿地在长时间内保持较高的反硝化速率。胡曼利等^[40]也通过对玉米芯和稻草进行碱热预处理,发现玉米芯作为湿地缓释碳源脱氮效果更佳,其累积释放 C/N 较未处理状态下提高了 41%。且湿地出水 NO₂⁻-N 的浓度也一直保持较低水平,表明了玉米芯作为缓释碳源可以促进湿地的彻底反硝化。我国玉米种植广泛,玉米芯的数量丰富且来源广,将其作为湿地外加碳源,既可以有效提高尾水的 C/N,还可以实现废弃物资源化,生态效益好。

表 5 发酵液碳源系统及脱氮除磷效果

Tab. 5 Effect of Carbon Source System with Fermentation Broth on Nitrogen and Phosphorus Removal

碳源名称	改性方式	污染物/工艺效果	平均去除率
污泥发酵液 (SAFL)	空气+稠化混凝剂+溶气气浮池出水污泥 ^[43]	NO ₃ ⁻ -N	>97.00%
	NaOH+Ca(OH) ₂ 混合碱二沉池污泥发酵液 ^[44]	固定基质填充率为 12%,水力停留时间 (HRT) 为 3.5 h, 25 °C, 释放挥发性脂肪酸 (VFAs) 达到 (2 546±37) mg/L	-
FWFL	超声波预处理+厌氧发酵后离心取上清液 ^[45]	TP	92.70%
		氨氮	92.38%
污泥+餐厨垃圾发酵液 (RFCF)	去油+3:7 体积比混合厌氧发酵 ^[46]	TN	92.68%
		TP	89.42%

由表 5 分析发现,采用 SAFL 和 FWFL 作为脱氮缓释碳源不仅有机物利用率高,且二者混合共厌氧发酵液 RFCF 可有效增加系统反硝化细菌和聚磷菌的相对丰度,提高系统的氮磷去除率,系统出水无明显亚硝酸盐积累,整体净化效果较好^[46]。Liu 等^[44]通过添加 NaOH 和 Ca(OH)₂,使得 SAFL 中的 VFAs 从 (1 605±5) mg/L 增加到 (2 546±37) mg/L,有效提高了尾水的 C/N。Feng 等^[45]发现,FWFL 产生的 VFAs 比醋酸、葡萄糖等其他人工碳源的效率更高,成本更低,且与 SAFL 相比,FWFL 对出水氮磷浓度影响较小,出水氮磷浓度相对较低。这说明采用 FWFL 作为缓释碳源的应用效果更好,且危害更低。

虽然天然性碳源和液体碳源具有数量丰富、价格低廉的优点,但两者的释碳量难以控制,效果不稳定,容易造成出水有机物浓度升高。植物碳源释碳

2.2.2 人工合成固体缓释碳源

人工合成固体缓释碳源较植物碳源可以更好地确定用量和控制释碳能力。Zheng 等^[41]研究发现,添加人工合成固体缓释碳源聚丁二酸丁酯 (PBS),可有效增加湿地的微生物总数,提高尾水的 C/N,使 TN 去除率达到 90.4%,出水氮浓度较低。王艳^[42]通过在垂直流湿地中添加人工合成可降解聚合物碳源聚羟基脂肪酸酯 (PHAs),发现 PHAs 只为反硝化细菌提供碳源,在促进湿地反硝化的同时也防止碳源入水,保证了出水 COD_{Cr} 的较低浓度,应用效果良好。

2.2.3 液体缓释碳源

近年来,以污水厂废污泥以及餐厨垃圾发酵液 (FWFL) 作为湿地脱氮缓释碳源取得了较好的实际应用效果。表 5 分析了以发酵液为缓释碳源工艺的脱氮除磷效果。

周期短,在后期腐烂后也易造成湿地堵塞。而液体碳源的投入使用必须要经过前期的加工处理,这在一定程度上也增加了运行成本^[47]。人工合成固体碳源较前两者其释碳性能更稳定,效果更优,易控制其释碳量。但其价格较高,大量投入成本高。总体上,天然植物性缓释碳源、人工合成固体缓释碳源、液体缓释碳源 3 种都可以较好地促进反硝化作用的进行,可以根据实际运行情况选择最佳投加方案,以实现尾水脱氮效益最大化。

2.3 湿地内部优化提升

组合基质使用、定期清污以及外加碳源可以降低基质堵塞几率和提高脱氮效率,强化湿地对尾水的净化效能。但是一种优化方式往往难以达到理想的净化效果,因此,通常采用多种方式联合提升。例如, Sun 等^[48]构建 3 种分别以生物炭-活性炭混合基质改性、反硝化菌改性以及基质反硝化菌同时改

性的垂直流人工湿地,发现同时改性的垂直流人工湿地对 COD_{Cr}、TP、TN 的去除量均高于其他两种湿地,分析原因,生物炭本身孔隙率较大可以形成较好的缺氧环境,且生物炭在反硝化过程中也可以作为潜在碳源,增强湿地的反硝化作用。生物炭与活性炭的混合使用,提高了生物炭对污染物的吸附能力以及生物膜的附着能力,最终在排水阶段富氧条件下实现氨氮的高效去除。

虽然优化基质可以提高湿地净化效能,但 C/N 低仍是限制因素,可以通过同时采用基质优化与缓释碳源协同组合工艺来提高尾水湿地净化效能。Tao 等^[49]通过将玉米秸秆进行碱热预处理后,混合葡萄糖添加到聚乙烯基质湿地和混合基质湿地,发现碱化可有效提高秸秆的释碳性能,且聚乙烯基质具有较好的生物挂膜优势,反硝化效果优于混合基质湿地。Shen 等^[50]通过将给水厂污泥与木屑基质结合,按 2:1 的体积比填充到塑料多孔球中构建生物载体用于表面流湿地。研究发现,大部分磷在给水厂污泥生物载体中富集,使得湿地对磷的去除率显著提高到 90%,对 TN 的平均去除率也达到了 57.65%±9.43%。生物载体的构建缓解了表面流湿地易受冬季低温的影响,提高了表面流湿地在低温条件下对低碳废水中的氮、磷去除量,是一种有效的强化措施。

2.4 工艺优化

即使经过填料改性、外加缓释碳源等方式可以提高尾水湿地的净化能力,但是尾水中污染物类型较多,单一湿地很难较好地处理各种污染物。因此,对工艺进行优化是必要的。

2.4.1 增加预处理工艺

除通过外加缓释碳源来提高尾水的 C/N,也可通过增加预处理工艺来提高尾水的可生化性。李尧丞^[51]通过在湿地前端增加水解酸化池和膜生物反应器(MBR)工艺,发现 MBR 中的生物膜可避免硝化细菌流失,在工艺前端达到较好的氮去除效果。马凯等^[52]通过将人工湿地与同步脱氮除磷工艺联合起来,先让污水流经多级 AO 反应器,在 3 个好氧室中,氨氮的去除率分别达到了 79.84%、81.94%和 81.18%,TN 和 TP 也达到较好的去除效果,使得湿地对 COD_{Cr}、氨氮、TN 去除率达到了 97.18%、97.11%、94.94%,出水水质较好。

因此,增加预处理工艺对于降低湿地进水负荷

有较好的促进作用,可在一定程度上提高湿地的水质净化效益。

2.4.2 工艺耦合

尾水湿地组合工艺常见的就是增加电化作用,促进电子转移,来提高硝化反硝化效率。人工湿地与微生物燃料电池耦合工艺(CW-MFC)是较常见的组合案例。Wang 等^[53]通过添加 MFC 工艺,有效弥补了湿地微生物反硝化过程中有机碳源不足的缺陷,对 TN 的去除率达到了 90.30%~91.46%,且 C/N 越低,MFC 工艺的增强作用越明显,总体运行效果较好。Zhang 等^[54]通过采用潮汐式湿地,并结合 MFC 工艺,对 TN 和 COD_{Cr} 的去除率达到了 83.4%和 97.4%,且 TP 的去除率也达到了 89.0%,整体净化效果较好。秦歌等^[55]研究耦合 MFC 工艺对人工湿地净化能力的影响,发现稳定运行的 CW-MFC 工艺对 COD_{Cr} 和氨氮的去除率达到了 86.00%和 84.77%,较单一人工湿地分别提升了 23.56%和 11.4%,对人工湿地净化能力具有一定的强化作用。

虽然耦合 MFC 工艺可以改善尾水人工湿地脱氮效能低的不足,能够在较低的 C/N 条件下提高湿地的净化能力,但尾水 C/N 低依旧会限制 CW-MFC 工艺的净化效能^[56]。表 6 为外加碳源型 CW-MFC 工艺及效果分析。

表 6 外加碳源型 CW-MFC 工艺及效果

Tab. 6 External Carbon Source CW-MFC Process and the Effect

工艺名称	外加碳源	污染物	平均去除率
CW-MFC	2%NaOH,碱化处理玉米芯 ^[57]	TN	86.6%±1.6%
		NO ₃ -N	97.2%±0.3%
		氨氮	73.1%±2.8%
	纤维素碳源 ^[58]	COD _{Cr}	98.38%
		氨氮	79.31%
		TN	84.43%

Tao 等^[57]通过将玉米芯碱化处理作为 CW-MFC 系统的缓释碳源,提高尾水 C/N 的同时生物发电性能也得到提升,最大功率密度达到 23.5 mW/m³。同样的也有研究^[58]发现,MFC 工艺可以增强微生物的自养反硝化过程,而增加农业废弃物作为纤维素碳源可显著促进异养反硝化过程,提高体系电压,系统的平均电压稳定在 450 mV。这表明了添加农业废弃物缓释碳源可以提高 CW-MFC 工艺对低 C/N 尾水的净化效能以及产电效能。Cui 等^[59]通过建立电化学耦合生物炭修正饱和垂直流人工湿地,发现

湿地的反硝化效率得到显著提高。主要原因是生物炭可以促进异养反硝化,而电化学作用可以增强自养反硝化,但也限制了氨氮的去除效率,生物炭的加入有效弥补了这一缺陷,作为底物可以提高微生物的活性。Fan 等^[60]构建以椰子纤维为基质和碳源的电解辅助人工湿地,发现出水 TN、TP 的去除率为 69.4%、93.3%,较砾石基湿地 TN 去除率提高了 39.9%。主要原因是电解可以提高椰子纤维的释碳性能,促进反硝化作用的进行。总体上,外加碳源和增加电解工艺对于湿地处理低碳尾水脱氮有较好的强化作用。

CW-MFC 工艺是较为成熟的耦合工艺,将其用于尾水净化有较强的现实意义。但将湿地与其他污水处理工艺结合也可以在一定程度上取得良好的净化效益。Gustavo 等^[61]通过将厌氧生物滤池、表面流人工湿地单元和垂直流人工湿地结合,并辅以 MFC 和反应床过滤器组成多级净化系统,对氨氮和 TP 的去除率达到了 93.17% 和 86.93%,运行后期, MFC 阴极电极被颗粒活性炭取代,获得最高电压值可达 557 mV,产电性能较好,实现了净化强化和产电的双重效益。Gao 等^[62]发现,人工湿地可以与光伏电解工艺相结合,通过采用电解一体化、生物炭改性、水平潜流人工湿地和表面流人工湿地相结合的方式,利用光伏能量进行电解,加强了水平潜流人工湿地对氮磷的去除,再通过联合表面流人工湿地,对 NO_3^- -N、氨氮、TP 的去除达到了 73.28%、53.11%、67.58%,总体净化效果较好,是一种环保低能耗的水质净化工艺。

不同类型的人工湿地组合处理污水厂尾水也可以达到较好的净化效果。许明等^[63]采用 3 种类型人工湿地+生态塘组合工艺净化尾水,对 COD_{Cr} 、TN、氨氮的总去除率达到了 55.6%、86.9%、86.4%。氮去除率较高的主要原因是垂直流湿地和潜流湿地的结合为微生物创造了良好的好氧缺氧条件,促进了硝化反硝化作用的进行。郭治东等^[64]采用双重垂直流人工湿地与氧化塘串联组合工艺处理污水厂尾水,使系统对尾水中氨氮的去除率达到了 87.5%,且在氧化塘设置曝气系统和增加污水回流措施可进一步对尾水进行深度处理,在实现水质净化的同时也有良好的环境效益。

因此,将湿地与其他污水处理工艺耦合或不同湿地复合处理尾水,在实际应用中可以取得较好的

水质净化效益。其中 CW-MFC 工艺的应用较为广泛,加强对该工艺的深入研究,对于湿地深度处理污水厂尾水具有积极促进作用。

3 总结和展望

为更好地将人工湿地用于市政污水厂尾水处理,从基质优化、外加缓释碳源、工艺优化 3 个方面综述了尾水人工湿地强化途径,主要不足在于目前大量研究是在实验室基础上的,实际应用研究较少,未来仍需深入加强实际应用的研究。根据结论,提出以下 6 点建议。

(1) 改性生物炭成本较高,且不同材料制备的生物炭的净化能力不同,部分也可能含有有毒物质,造成水体二次污染。生物炭的形态主要是粉末或颗粒态,与传统基质掺杂投入后难回收、成本高。目前的技术在改性生物炭制备方面仍有限,需要深入研究延长生物炭的使用周期以及生物炭的固定化方式,才能更好地提高生物炭基人工湿地的水质净化效益。

(2) 天然矿石基质等的大量消耗会对自然生态造成不利影响,而我国现常采用的人工基质也仅局限于废弃建筑物材料等,需要加强对新型基质的研发,对现有人工基质也应深入探究改良,提高其水质净化能力。

(3) 虽然天然植物碳源,FWFL 等碳源可以提高尾水的 C/N,促进反硝化作用的进行,但其释碳性能不稳定且不易控制,运行过程中碳源过度释放易导致出水 COD_{Cr} 含量升高,造成出水二次污染。需要加强研发高效低成本人工合成固体缓释碳源,提高湿地脱氮效率。

(4) 低 C/N 条件下尾水湿地脱氮主要依靠细菌的硝化反硝化作用以及植物的生长吸收。其中通过合理的基质选配优化以及工艺耦合等可以达到较好的净化效果,但是湿地植物所起的作用也是不容忽视的。植物生长过程中可以吸收尾水中氮磷营养物质以及抑制水中部分藻类的生长,既起到了净化作用也维持了良好的湿地景观,生态效益好。所以植物的选配种植以及如何植物生长周期结束后及时收割和高效处理利用湿地植物废弃物是需要考虑的问题。

(5) 化工产业等的不断发展使得水中污染物种类逐渐增加,现有工艺并不能及时满足对微塑料、药

物及个人护理品、抗生素、全氟及多氟化合物等污染物的有效去除,而且污染物的不断积累对自然环境和生命健康存在潜在威胁。目前以人工湿地处理新污染物的研究较少,且多局限于实验室研究基础上,在实际工程应用方面较薄弱,未来还需加强探究以提高人工湿地的净化效能。

(6)人工湿地去除污染物的同时也会向自然环境释放气体,如 N_2O 、 CO_2 和 CH_4 ,会促进温室效应,对生态环境造成影响。不同类型湿地气体释放机制有所差异,未来还需进一步研究控制湿地气体释放的途径,在提升水质净化效益的同时降低对环境的影响。

参考文献

- [1] YANG W, YAO J M, HE Y, et al. Nitrogen removal enhanced by benthic bioturbation coupled with biofilm formation: A new strategy to alleviate freshwater eutrophication [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 292: 112814. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112814.
- [2] 顾佳华, 赵金辉, 王洋洋, 等. 人工湿地用于城市污水厂尾水深度处理及其脱氮效能强化研究 [J]. *现代化工*, 2020, 40(3): 64-66, 71.
- GU J H, ZHAO J H, WANG Y Y. Study on advanced treatment of tail water from wastewater treatment plant by constructed wetland and enhancement in denitrification efficiency [J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(3): 64-66, 71.
- [3] 彭东升, 许洋, 李方源, 等. RPIR+磁混凝工艺在污水处理厂提标改造中的应用 [J]. *净水技术*, 2023, 42(3): 158-163.
- PENG D S, XU Y, LI F Y, et al. Application of RPIR + magnetic coagulation process in upgrading and reconstruction of WWTP [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(3): 158-163.
- [4] 傅金祥, 庞博文, 金星, 等. 双膜法处理污水厂尾水效能分析与膜再生研究 [J]. *中国给水排水*, 2020, 36(5): 98-103.
- FU J X, PANG B W, JIN X, et al. Efficiency analysis and membrane regeneration of tail water treatment in wastewater treatment plant by double membrane method [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(5): 98-103.
- [5] SATHISHKUMAR K, LI Y, SANGANYADO E. Electrochemical behavior of biochar and its effects on microbial nitrate reduction: Role of extracellular polymeric substances in extracellular electron transfer [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 395: 125077. DOI: 10.1016/j.cej.2020.125077.
- [6] 宋浩. 外加无机电子供体强化反硝化生物滤池处理污水厂尾水的试验研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- SONG H. Experimental study on treatment of wastewater treatment plants effluent by external inorganic electron donor enhanced denitrification biofilter [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [7] 都雪晨, 黄华玲, 靳斌斌, 等. MBBR 和 MBR 工艺在南方某用地受限污水处理厂扩建及提标改造中的应用 [J]. *净水技术*, 2023, 42(5): 164-171.
- DU X C, HUANG H L, JIN B B, et al. Application of MBBR and MBR processes in extension and upgrading project of a southern WWTP under limited land use [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(5): 164-171.
- [8] 许铮, 王彦飞, 李思敏, 等. 生物砂滤池深度处理污水厂尾水的研究现状及展望 [J]. *工业用水与废水*, 2023, 54(2): 10-13, 58.
- XU Z, WANG Y F, LI S M, et al. Research status and prospect of biological sand filter for advanced treatment of tail water from sewage treatment plant [J]. *Industrial Water & Wastewater*, 2023, 54(2): 10-13, 58.
- [9] 夏博宇. 基于垂直流湿地的城市污水厂尾水高标准排放设计探讨 [J]. *净水技术*, 2022, 41(s1): 110-114.
- XIA B Y. Discussion on high standard discharge design of tail water from urban WWTP based on vertical-flow wetland [J]. *Water Purification Technology*, 2022, 41(s1): 110-114.
- [10] 付乐, 张世元. 城镇污水处理厂尾水人工湿地处理工艺研究 [J]. *工程技术研究*, 2023, 8(3): 95-98.
- FU L, ZHANG S Y. Research on constructed wetland treatment process for tail water from urban sewage treatment plants [J]. *Engineering and Technology Research*, 2023, 8(3): 95-98.
- [11] 赵春霞, 李天一, 付亿俊, 等. 基于案例分析的人工湿地尾水处理技术进展 [J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(1): 75-82.
- ZHAO C X, LI T Y, FU Y J, et al. Advanced progress of constructed wetland technology for tail sewage treatment based on case analysis [J]. *Journal of Hebei University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(1): 75-82.
- [12] 张红涛. 人工湿地在我国农村生活污水处理中的应用研究进展 [J]. *广东化工*, 2022, 49(20): 157-158, 152.
- ZHANG H T. Application and research of constructed wetlands in rural wastewater treatment [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(20): 157-158, 152.
- [13] 尚文. 高负荷潜流人工湿地处理工业污水厂高盐尾水的中试试验 [J]. *净水技术*, 2023, 42(s1): 116-122.
- SHANG W. Pilot-scale experiment on high-salinity tailwater treatment of industrial WWTP by high load subsurface flow constructed wetland [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(s1): 116-122.
- [14] 白雪原, 姜海波, 阳涛, 等. 不同水力负荷条件下水平潜流人工湿地处理城镇污水处理厂尾水的效率及微生物特征研究 [J]. *环境生态学*, 2022, 4(9): 108-114.

- BAI X Y, JIANG H B, YANG T, et al. Efficiency and microbial characteristics of horizontal subsurface flow constructed wetland in treating tail water from urban sewage plant under different hydraulic loads [J]. *Environmental Ecology*, 2022, 4(9): 108-114.
- [15] 戈浩宇, 华祖林, 沈健, 等. 污染物浓度和水力负荷双重作用下人工湿地的净化效果 [J]. *江苏水利*, 2021(6): 41-46.
- GE H Y, HUA Z L, SHEN J, et al. Purification effect of constructed wetland under dual action of pollutant concentration and hydraulic load [J]. *Jiangsu Water Resources*, 2021(6): 41-46.
- [16] 汤梦涵, 刘霄, 谭欣. 外加碳源强化人工湿地脱氮研究进展 [J]. *环境生态学*, 2023, 5(7): 107-114.
- TANG M H, LIU X, TAN X. Research progress on enhanced nitrogen removal in constructed wetlands by carbon source recharge [J]. *Environmental Ecology*, 2023, 5(7): 107-114.
- [17] 成水平, 王月圆, 吴娟. 人工湿地研究现状与展望 [J]. *湖泊科学*, 2019, 31(6): 1489-1498.
- CHENG S P, WANG Y Y, WU J. Advances and prospect in the studies on constructed wetlands [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2019, 31(6): 1489-1498.
- [18] 张军, 何东, 褚彩红, 等. 用于尾水深度净化的人工湿地构造及处理效果研究 [C]. 天津: 中国环境科学学会 2021 年科学技术年会, 2021.
- ZHANG J, HE D, CHU C H, et al. Study of construction and treatment efficacy of constructed wetland for tail water advanced treatment [C]. Tianjin: The Chinese Society of Environmental Sciences 2021 Science and Technology Annual Meeting, 2021.
- [19] 陈涛, 王翔, 朱召军, 等. 垂直流湿地用于产业集聚区污水厂尾水脱氮处理 [J]. *工业水处理*, 2019, 39(11): 101-103, 112.
- CHEN T, WANG X, ZHU Z J, et al. Denitrification research on the treatment of tail-water from industry cluster district using vertical flow constructed wetland [J]. *Industrial Water Treatment*, 2019, 39(11): 101-103, 112.
- [20] LIU Y, LIU X H, WANG H C, et al. Pyrite coupled with steel slag to enhance simultaneous nitrogen and phosphorus removal in constructed wetlands [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023: 143944. DOI:10.1016/j.cej.2023.143944.
- [21] 王洁, 纪明德, 刁玲玲, 等. 轻质填料在人工湿地中的研究现状与应用展望 [J]. *环境科学与技术*, 2023, 46(s1): 154-161.
- WANG J, JI M D, DIAO L L, et al. Research status and application prospect of lightweight substrate in constructed wetlands [J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 46(s1): 154-161.
- [22] WANG H X, XU J L, SHENG L X. Purification mechanism of sewage from constructed wetlands with zeolite substrates: A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 258: 120760. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.120760.
- [23] 徐扬, 曾春山, 王代容, 等. 一种运用粒料砌块的防堵塞人工湿地净化农村生活污水的研究 [J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(25): 182-185.
- XU Y, ZENG C S, WANG D R, et al. Purification effect on rural domestic sewage by using an anti-clogging constructed wetland based on an aggregates block method [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(25): 182-185.
- [24] JIA W, SUN X, GAO Y, et al. Fe-modified biochar enhances microbial nitrogen removal capability of constructed wetland [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 740: 139534. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139534.
- [25] WANG H X, TENG H W, WANG X Y, et al. Physicochemical modification of corn straw biochar to improve performance and its application of constructed wetland substrate to treat city tail water [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 310: 114758. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114758.
- [26] 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. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126156.
- [27] 田雪莹. 污泥-生物炭基/粉煤灰陶粒滤料脱氮效果对比研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2022.
- TIAN X Y. Comparative study on denitrification effect of sludgebiochar-based/pulverized coal ash ceramsite filter [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2022.
- [28] 郭佳. 新型轻质填料人工湿地处理生活污水实验研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- GUO J. Experimental study on treatment of domestic sewage in constructed wetland with new lightweight substrate [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [29] GAO P, ZHANG C. Study on phosphorus removal pathway in constructed wetlands with thermally modified sepiolite [J]. *Sustainability*, 2022, 14: 12535. DOI: 10.3390/su141912535.
- [30] ZHANG G Z, MA K, ZHANG Z X, et al. Waste brick as constructed wetland fillers to treat the tail water of sewage treatment plant [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2020, 104(2): 273-281.
- [31] 王晗阳, 刘月敏, 杨阳. 废砖与碎石人工湿地系统中微生物分布特征及其脱氮效果的比较研究 [J]. *天津城建大学学报*, 2021, 27(1): 54-60.
- WANG H Y, LIU Y M, YANG Y. Comparative study of microbial distribution feature and nitrogen removal effect of waste brick and gravel constructed wetland system [J]. *Journal of Tianjin Chengjian University*, 2021, 27(1): 54-60.
- [32] LI H Y, ZHANG Y Y, WU L Y, et al. Recycled aggregates from construction and demolition waste as wetland substrates for

- pollutant removal [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 311: 127766. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127766.
- [33] TANG V T, PAKSHIRAJAN K. Novel advanced porous concrete in constructed wetlands: Preparation, characterization and application in urban storm runoff treatment [J]. *Water Science & Technology*, 2018, 78(11): 2374–2382.
- [34] LI Q M, MA Y, CHEN J, et al. The negative effect of the high pH of waste concrete in constructed wetlands on COD and N removal [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 51: 103356. DOI:10.1016/j.jwpe.2022.103356.
- [35] ZHONG H, HU N, WANG Q H, et al. How to select substrate for alleviating clogging in the subsurface flow constructed wetland? [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 828: 154529. DOI:10.1016/j.scitotenv.2022.154529.
- [36] 王文明, 危建新, 尹振文, 等. 洋湖人工湿地再生水深度净化工程设计 [J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 59–62.
WANG W M, WEI J X, YIN Z W, et al. Design of Yanghu constructed wetland for advanced purification of reclaimed water [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 59–62.
- [37] TANIA C, ISABEL R, MANUEL S. Improving the performance of vertical flow constructed wetlands by modifying the filtering media structure [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(40): 56852–56864.
- [38] TAO J Q, XU H Q, ZHANG T, et al. Study on reed straw carbon source-enhanced nitrogen removal effect in wetland system [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2022, 233(11): 429. DOI: 10.1007/s11270-022-05890-5.
- [39] SUN Z Z, DZAKPASU M, ZHAO L P, et al. Enhancement of partial denitrification-anammox pathways in constructed wetlands by plant-based external carbon sources [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133581. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133581.
- [40] 胡曼利, 郝庆菊, 马容真, 等. 玉米芯和稻草秸秆强化潜流人工湿地对低 C/N 污水的处理效果 [J]. *环境科学*, 2022, 43(8): 4136–4145.
HU M L, HAO Q J, MA R Z, et al. Treatment effect of corncob and rice straw enhanced subsurface flow constructed wetland on low C/N ratio wastewater [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4136–4145.
- [41] ZHENG X H, ZHANG J, LI M T, et al. Optimization of the pollutant removal in partially unsaturated constructed wetland by adding microfiber and solid carbon source based on oxygen and carbon regulation [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 752: 141919. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.141919.
- [42] 王艳. PHAs 缓释碳源在垂直流人工湿地中的应用效果 [J]. *广东化工*, 2022, 49(20): 127–129.
WANG Y. Application effect of sustain-released carbon source in vertical flow constructed wetland [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2022, 49(20): 127–129.
- [43] MAHMOUD A, HAMZA R A, EIBESHISHY E. Enhancement of denitrification efficiency using municipal and industrial waste fermentation liquids as external carbon sources [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 816: 151578. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.151578.
- [44] LIU X Y, YANG H, CHANG J, et al. Re-hydrolysis characteristics of alkaline fermentation liquid from waste activated sludge: Feasibility as a carbon source for nitrogen removal [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 165: 230–240. DOI:10.1016/j.psep.2022.06.064.
- [45] FENG X C, BAO X, CHE L, et al. Enhance biological nitrogen and phosphorus removal in wastewater treatment process by adding food waste fermentation liquid as external carbon source [J]. *Biochemical Engineering Journal*, 2021, 165: 107811. DOI:10.1016/j.bej.2020.107811.
- [46] YOU J H, TANG S L, ZONG Y C, et al. Effects of adding different ratios of residual sludge and food waste co-anaerobic fermentation liquid to AAO wastewater treatment process [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53: 103735. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.103735.
- [47] 于萍, 于方田, 张晓敏, 等. 污水反硝化脱氮外加碳源应用前景 [J]. *化工设计通讯*, 2022, 48(6): 197–199.
YU P, YU F T, ZHANG X M, et al. Application prospect of denitrification and denitrification plus carbon source in wastewater [J]. *Resources and Environment*, 2022, 48(6): 197–199.
- [48] SUN Y Q, ZHOU P C, ZHANG N, et al. Effects of matrix modification and bacteria amendment on the treatment efficiency of municipal tailwater pollutants by modified vertical flow constructed wetland [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 281: 111920. DOI:10.1016/j.jenvman.2020.111920.
- [49] TAO Z K, JING Z Q, WANG Y, et al. Higher nitrogen removal achieved in constructed wetland with polyethylene fillers and NaOH-heating pre-treated corn stalks for advanced treatment of low C/N sewage [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28(11): 13829–13841.
- [50] SHEN C, ZHAO Y Q, LI Y, et al. Treating carbon-limited wastewater by DWTR and woodchip augmented floating constructed wetlands [J]. *Chemosphere*, 2021, 285: 131331. DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131331.
- [51] 李尧丞. 工业污水处理厂 MBR 与人工湿地组合工艺运行效果的分析 [J]. *化工管理*, 2022(30): 49–52.
LI Y C. Analysis on operation effect of MBR and constructed wetland combined process in industrial sewage treatment plant [J]. *Chemical Enterprise Management*, 2022(30): 49–52.
- [52] 马凯, 张国珍, 王宏伟, 等. 多级 AO+人工湿地组合工艺处理生活污水的研究 [J]. *兰州交通大学学报*, 2022, 41(4): 96–102.
MA K, ZHANG G Z, WANG H W, et al. Experimental research on wastewater treatment by combined process of multi-stage AO

- and constructed wetland [J]. *Journal of Lanzhou Jiaotong University*, 2022, 41(4): 96–102.
- [53] WANG X O, TIAN Y M, LIU H, et al. Effects of influent COD/TN ratio on nitrogen removal in integrated constructed wetland-microbial fuel cell systems [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 271: 492–495. DOI:10.1016/j.biortech.2018.09.039.
- [54] ZHANG K, YANG S Q, LUO H B, et al. Enhancement of nitrogen removal and energy recovery from low C/N ratio sewage by multi-electrode electrochemical technology and tidal flow via siphon aeration [J]. *Chemosphere*, 2022, 299: 134376. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134376.
- [55] 秦歌, 陈婧, 余仁栋, 等. 人工湿地-微生物燃料电池对高碳氮废水的强化净化和产电研究 [J]. *湿地科学与管理*, 2021, 17(4): 12–17.
- QIN G, CHEN J, YU R D, et al. Enhanced nitrogen removal and electricity generation efficiency by constructed wetland-microbial fuel cell [J]. *Wetland Science & Management*, 2021, 17(4): 12–17.
- [56] TAO M N, KONG Y, JING Z Q, et al. Denitrification performance, bioelectricity generation and microbial response in microbial fuel cell-Constructed wetland treating carbon constraint wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 363: 127902. DOI:10.1016/j.biortech.2022.127902.
- [57] TAO M N, JING Z Q, TAO Z K, et al. Improvements of nitrogen removal and electricity generation in microbial fuel cell-constructed wetland with extra corncob for carbon-limited wastewater treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 297: 126639. DOI:10.1016/j.jclepro.2021.126639.
- [58] ZHANG K, YANG S Q, WANG W, et al. Bioelectrochemical processes and cellulosic carbon source enhance the autotrophic and heterotrophic denitrification of low C/N ratio wastewater in tidal flow constructed wetland—Microbial fuel cells [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 363: 132368. DOI:10.1016/j.jclepro.2022.132368.
- [59] 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. DOI:10.1016/j.scitotenv.2021.152800.
- [60] FAN X, LI J, HE L, et al. Co-occurrence of autotrophic and heterotrophic denitrification in electrolysis assisted constructed wetland packing with coconut fiber as solid carbon source [J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134762. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2022.134762.
- [61] GUSTAVO S C, NAIRA D, GABRIELE P, et al. Hybrid constructed wetlands integrated with microbial fuel cells and reactive bed filter for wastewater treatment and bioelectricity generation [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2022, 29(15): 22223–22236.
- [62] GAO Y, YAN C, WEI R Q, et al. Photovoltaic electrolysis improves nitrogen and phosphorus removals of biochar-amended constructed wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 71–78. DOI:10.1016/j.ecoleng.2019.07.004.
- [63] 许明, 谢忱, 刘伟京, 等. 组合湿地处理化工园区污水处理厂尾水工程示范 [J]. *给水排水*, 2019, 55(2): 75–81.
- XU M, XIE C, LIU W J, et al. Project example of chemical industrial park wastewater treatment plant tail water treatment through combined wetland [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 55(2): 75–81.
- [64] 郭治东, 陈冠宇, 赵世勋. 生态型景观—人工湿地深度处理城市二级污水处理厂出水的工程应用 [J]. *铁道标准设计*, 2021, 65(4): 155–159.
- GUO Z D, CHEN G Y, ZHAO S X. Application of advanced treatment of urban secondary sewage treatment plant outflow by ecological landscape-constructed wetland [J]. *Railway Standard Design*, 2021, 65(4): 155–159.

(上接第8页)

- SAI S J, LI M J, DANG P, et al. Application of high separation nanofiltration process in zero discharge of high salt wastewater from coal chemical industry [J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(7): 173–178.
- [24] 李长庚, 刘成, 武海霞, 等. 结晶软化技术对地表水中总硬度的去除效能及应用 [J]. *净水技术*, 2021, 40(12): 44–50.
- LI C G, LIU C, WU H X, et al. Efficiency and application of crystal softening technology in total hardness removal in surface water [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(12): 44–50.
- [25] 李长庚, 刘成, 曹振桦, 等. 改良型诱晶软化技术对污水厂尾水结垢控制的效果 [J]. *净水技术*, 2023, 42(10): 87–94, 104.
- LI C G, LIU C, CAO Z H, et al. Effect of modified induced crystallization softening technology on scaling control for WWTP tailwater [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(10): 87–94, 104.