

人工湿地-微生物燃料电池耦合系统处理难降解污染物的研究进展

张盈昱¹, 张松涛², 李佳佳², 龚 扬¹, 刘玉香^{1*}

(1. 太原理工大学环境与生态学院, 山西 晋中 030600; 2. 山西省水利发展中心, 山西 太原 030001)

摘要: 阐述了近几年国内外利用 CW-MFC 系统处理几种难降解污染物的研究现状, 总结了在 CW-MFC 系统处理难降解污染物时的各种新设计、配置和技术组合, 重点从系统构成和系统运行条件等方面阐述, 为进一步提升系统性能提供和启发一些新的思路。最后概括了 CW-MFC 在处理难降解物的技术前景和存在的问题, 并预测了该技术的发展趋势。

关键词: 人工湿地微生物燃料电池; 难降解污染物; 染料废水; 抗生素废水

中图分类号: X703.5

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0057-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.011

Research progress on coupling system of constructed wetland-microbial fuel cell for treatment of refractory pollutants

ZHANG Ying-yu¹, ZHANG Song-tao², LI Jia-jia², GONG Yang¹, LIU Yu-xiang^{1*}

(1. College of Environment and Ecology, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;

2. Shanxi Provincial Water Resources Development Center, Taiyuan 030001, China)

Abstract: In recent years, extensive research has been conducted globally on constructed wetland-microbial fuel cell (CW-MFC) applications for treating dye wastewater, antibiotic wastewater, pesticide wastewater, and phenol-containing wastewater, yielding important research advances. This article primarily reviews the current status of CW-MFC systems for treating several refractory pollutants worldwide in recent years. It summarizes various novel designs, configurations, and technological combinations employed in CW-MFC systems for treating refractory pollutants, focusing on system composition and operational conditions. This review aims to provide new insights and inspiration for further enhancing system performance. Finally, it summarizes the technical prospects and existing challenges of CW-MFC in treating refractory substances and predicts the future development trends of this technology.

Key words: constructed wetland-microbial fuel cell; refractory pollutants; dye wastewater; antibiotic wastewater

随着工业化和城市化的飞速发展,大量结构稳定、难以被传统污水处理工艺有效去除的难降解有机物(refractory organic compounds)不断进入水环境,对水生生态系统和人类健康构成了潜在威胁。尽管高级氧化、吸附法、膜分离技术、生物强化等深度和高级处理技术有较好的去除效果,但这些处理技术通常依赖化学品与能源消耗,对操作条件及材料有特定要求,成本效益较低。此外,部分化合物可能无法被完全降解,反而可能导致降解中间产物的积累,加剧生态系统风险^[1-2]。研究发现单一方法无法有效去除难降解有机物,而组合多种方法可能会产生意想不到的效果^[3]。人工湿地耦合微生物燃料电池(CW-MFC)是集成了湿地生态系统和微生物燃料电池技术的创新环境治理方法,是非常有

发展前途的废水处理方法。自2012年Yadav等^[3]发表了关于CW-MFC处理亚甲基蓝废水的研究后,该工艺在水处理领域的应用愈发受到研究者关注,目前已利用CW-MFC处理含有染料废水、抗生素废水、含有药物和个人护理用品、农业径流等废水^[4]。此外,CW-MFC除具有强化降解污染物的能力外,还具备发电能力^[5]。本文中系统梳理CW-MFC在难降解污染物去除中的研究进展,并阐明当前研究挑战与机遇。

1 CW-MFC的构型和基本原理

1.1 CW-MFC的构型

人工湿地系统中填料作为垂直流人工湿地下层厌氧和表层好氧环境的充填基质,可以构成MFC的

收稿日期:2025-12-01;修回日期:2026-07-30

基金项目:山西省水利厅科技项目(2025ZF03)

作者简介:张盈昱(2002-),男,硕士生;刘玉香(1969-),女,博士,教授,研究方向为微生物燃料电池和工业废水处理处置,通讯联系人,yuxiang-liu2002@126.com。

阳极和阴极,无需昂贵的质子交换膜,有效地解决 MFC 受阳极工作面积制约、限制其有机物降解及产电性能的瓶颈问题。MFC 的加入也能抑制 CW 系统中 EPS 积累,从而缓解基质堵塞问题^[5]。目前 CW-MFC 的构型主要受物理形状、水流方向、进料方式、电极数目等变量影响,最为常见的构型分类是以水流方向进行分类^[6]。根据流经 CW-MFC 系统废水流向,将 CW-MFC 分为垂直升流式、垂直降流式和水平潜流式。

1.1.1 垂直升流式

垂直升流式[图 1(a)]是目前 CW-MFC 研究的主流构型,形成了良好的上需氧和下缺氧结构,由下到上的垂直流更有助于整体产电^[7]。You 等^[8]以沸石、生物炭和二者体积等比混合作为基质搭建了垂直升流式 CW-MFC 处理养猪废水中的磺胺嘧啶(SDZ),研究表明,化学需氧量(COD)、氨氮和总磷(TP)去除率大于 93%,SDZ 去除率大于 82%,且该系统均有良好的发电性能。

1.1.2 垂直降流式

垂直降流式[图 1(b)]也是一种较为常用的 CW-MFC 构型,张晨晨等^[7]搭建了垂直降流式的 CW-MFC 系统,研究复合垂直降流 CW-MFC 系统的产电性能和水质净化作用,研究表明,控制其他变量不变情况下,水体污染物含量与系统产电性能相关,且该系统对磷酸盐和 TP 去除率分别为 97.5% 和 97.9%,氨氮去除率为 86.4%。

1.1.3 水平潜流式

水平潜流式 CW-MFC[图 1(c)]的相关研究较少,且集中在过去的几年。Villaseñor 等^[9]最先提出了水平潜流式 CW-MFC 的概念。研究表明,水平潜流式 CW-MFC 与光合作用 MFC、沉积物型 MFC 和植物型 MFC 相比,产电性能类似,具有相似

的电池电压、功率密度和电流密度值。然而,该构型在实际应用中需占用较大面积,这一特点限制了其在实验室尺度下的适用性与操作灵活性^[10]。

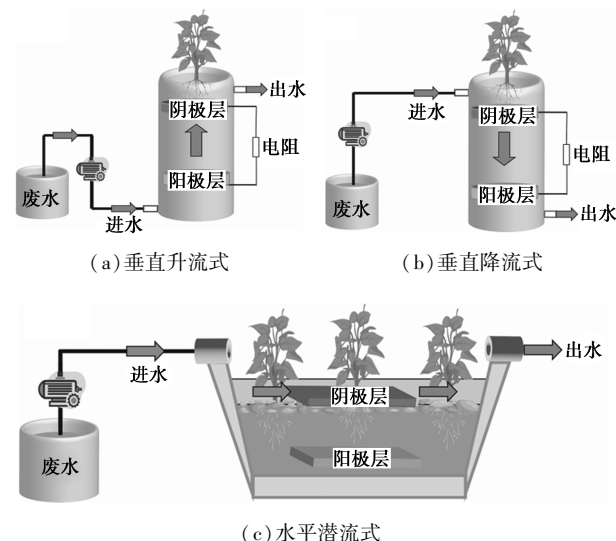


图 1 CW-MFC 结构示意图

当前关于 CW-MFC 处理难降解污染物的研究多限于实验室规模,反应装置普遍采用圆柱形设计。该构型有助于实现废水的均匀分布,并便于实验操作与控制。在水流方向上,多数研究采用升流式运行,这种配置有助于优化系统内自然的氧化还原梯度,从而促进电子传递和能量回收,是驱动 CW-MFC 产电的关键因素之一^[6]。

1.2 CW-MFC 的基本原理

在 CW-MFC 系统中,污染物的高效去除依赖于植物、填料、微生物和电极之间形成的多界面协同作用,该系统处理难降解污染物的核心机理如图 2 所示,CW-MFC 的植物和电极填料的吸附作用为电化学反应和生物降解提供了反应场所,这在初期效果显著。

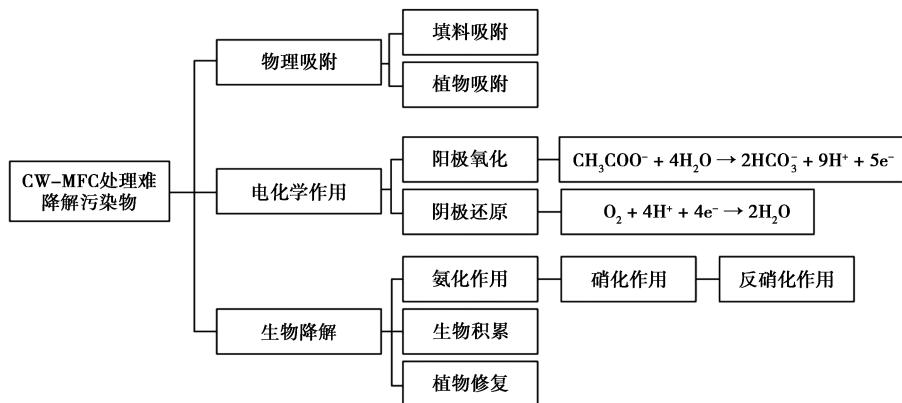


图 2 CW-MFC 系统处理难降解物的机理

随着系统的运行,微生物对于难降解物的分解起到关键作用。微生物包括基质中存在的大量好氧微生物、厌氧微生物及兼性厌氧微生物。在 CW-MFC 系统的阳极区,微生物会产生作用于多种有机污染物的酶,利用水生植物根系分泌物及污水中的有机质为碳源,经过氧化分解过程生成 CO_2 、质子供体 (H^+) 及阳离子,阳离子经过氧化还原媒介(例如纳米导线)传输至阳极而形成电流^[11-12]。 H^+ 经过基质传输至阴极区,在阴极区经过 H^+ 和外电路,传输出来的阳离子经过和电子受体结合(通常为氧气)进行还原反应而生成水。整个流程把有机物中的生物质能转换为能量。

表 1 CW-MFC 耦合系统处理不同难降解污染物去除率

废水类型	污染物	污染物去除率/%	最适条件
染料 ^[13]	亚甲基蓝 (MB)	99.39	电极为石墨毡电极,MB 浓度为 10 mg/L,葡萄糖共基质投加量为 350 mg/L,HRT 为 2.0 d
偶氮染料 ^[14]	活性红 X-3B 染料	85.80	外部电阻为 100 Ω ,COD 复合为 800 mg/L
抗生素 ^[15]	四环素	>99.90	铁碳作为 CW-MFC 基质
抗生素 ^[16]	左氧沙星	96.00	CW-MFC>EC-CW>CW
农药 ^[17]	三唑磷	>99.90	阳极填料活性炭和湿地填料铝污泥
农药 ^[18]	乙酰甲胺磷	96.50	DO 为 1.5 mg/L,环境温度 30℃,HRT=1.0 d
酚类 ^[19]	对氯苯酚	88.70	进水浓度 40 mg/L,模块化构型 CW-MFC
酚类 ^[20]	苯酚	75.59	进水浓度 350 mg/L,HRT=36 h,葡萄糖为共基质
其他 ^[21]	硝基苯	93.90	湿地植物为水葱

2.1 染料废水

偶氮染料一般是先由芳香胺经过重氮化后,再与酚类和芳香胺类具有活性的亚甲基化合物偶合形成,偶氮染料分子的化学性质异常稳定且具有潜在危害性。目前偶氮染料废水的处理方法主要是吸附脱色法、常规生物法(包括好氧处理、厌氧处理)、真菌技术和微生物燃料电池法等。

近几年来,对 CW-MFC 系统处理染料废水有着大量的研究,对染料废水的脱色率高达 85% 以上。不同共基质不仅影响对偶氮染料的去除,且对中间产物的进一步降解有显著影响,并通过对阳极微生物的作用影响了系统的产电性能。黄帅^[13]发现葡萄糖是 CW-MFC 系统降解偶氮染料所必需的一种共底物,这是因为葡萄糖可以增大湿地基质中的生物量,对偶氮染料脱色和生物发电有显著提升。Xie 等^[14]发现 CW-MFC 系统中,阳极区对偶氮染料脱色和 COD 去除起到了主要作用,主要机制是阳极区域的生物电化学还原促进了 —N=N— 键的断裂,生成了苯环、萘环和三嗪等大量的小分子物质。本研究结果启示,优化 CW-MFC 系统处理难降解染料污水效能的关键,在于定向富集电活性微生物功能群落,以强化其胞外电子传递 (EET) 能力。系统中迁

2 CW-MFC 处理难降解污染物的研究现状

污水成分对 CW-MFC 系统降解能力有着重要影响,污水成分的不同对其优势菌群的选择也不同。微生物对污水成分的有效降解不仅为 CW-MFC 系统提供生长繁殖所需要的能量,也为分解产生的电子提供传递介质。对特定污水成分选择对应的优势菌群,也可以提升耦合系统的净化作用。目前,大量研究者利用 CW-MFC 系统对染料废水、抗生素类废水、含酚废水、农药废水等难降解废水进行了研究,不同类型难降解废水去除率如表 1 所示。

移的电子直接或间接地断裂污染物分子中稳定的化学键(如偶氮染料中的偶氮键),从而加速降解进程,提高降解效果。系统处理染料废水已经取得了较多研究成果,对染料废水的脱色和发电主要与废水中的有机物含量、共基质类型有关,还和系统构成、湿地基质等因素有关。各因素之间对 CW-MFC 处理染料废水过程的相互作用还有待进一步探索。

2.2 抗生素废水

药物和个人护理用品 (PPCPs) 是一类新型污染物,抗生素就是 PPCPs 中十分常见的一类。目前高级氧化、曝气生物滤池工艺等技术虽能有效降解抗生素,芬顿氧化法对磺胺甲恶唑 (SMX) 的降解率可达 83.64%^[22],生物滤池对 16 mg/L 的四环素的降解率为 90%^[23]。但多数方法需要外部能量输入或大量补充化学物质和催化剂,创新和低成本的废水处理技术的需求越来越大^[24]。

近几年来,国内外相关研究已显示出 CW-MFC 系统在控制抗生素污染方面的有效性。根据上述 CW-MFC 系统对染料废水的分析,生物电化学强化能显著提升 CW-MFC 系统对难降解有机物的处理效能。对于左氧氟沙星 (LVFX),Lu 等^[16]的研究证实,CW-MFC 的去除率高达 96.0%,其强化机制主

要归因于系统产生的电化学环境,能有效刺激微生物(尤其是电活性菌变形菌门 Proteobacteria)的代谢活性,促进 EPS 分泌,其系统出水具有最高的脱氢酶活性,表明具有最高的氧化还原能力,从而通过增强的生物吸附与降解途径实现污染物的高效去除。为了进一步强化 CW-MFC 对抗生素的降解,Du 等^[15]在 CW-MFC 系统中添加了铁碳基质,铁碳基质由废铁屑和芦苇生物炭合成,相较于传统方法补充的化学物质和催化剂,对环境更加温和,且该系统在 48 h 内对四环素(TC)的降解率达到 100%,并且铁碳基质系统功率密度比传统的 CW-MFC 高 88.07%,内阻低 68.21%。相比于单独 CW 系统,CW-MFC 耦合系统更能有效去除废水中的抗生素。进水抗生素浓度、共基质浓度等都是影响其处理效率的重要条件,但抗生素在此过程中的去除机理及与微生物相互作用等仍需开展进一步的研究。

2.3 农药废水

农药废水是农药生产和使用过程中排放的废水。农药品种繁多,农药废水水质复杂、毒性大,除含有农药和中间体外,还含有酚、砷、汞等有害物质及许多难以生物降解的物质。农药废水的处理方法主要有生化法、超声波技术和微电解技术等,同时,光催化降解、人工湿地等新兴技术也取得了较多应用。

相比于一些传统方法,CW-MFC 作为组合工艺对农药废水的处理上有较大优势。范闯^[17]研究发现 CW-MFC 系统对于农药三唑磷的去除效果优于单纯的 CW,最高去除率达到了 100%。这可能是电极材料活性炭对三唑磷有良好的吸附效果,及 MFC 产电能够促进三唑磷的生物分解。研究还发现,高浓度三唑磷的加入会使得 CW-MFC 系统中 MFC 电压的输出和功率密度降低,原因可能是三唑磷浓度过高会对产电的微生物有毒害作用,导致产电微生物的数量和活性降低。高磊^[18]选择难降解的有机磷农药废水作为研究对象,采用水解酸化-人工湿地-微生物燃料电池复合系统(HA-CW-MFC)工艺展开实验研究,水解酸化预处理结合 CW-MFC 处理农药废水成功实现了优势互补。复合系统连续运行

时对氨氮的最大去除率为 95.8%,对 COD 的最大去除率为 96.6%。目前,CW-MFC 耦合系统处理农药废水取得了较好的效果,但整体研究数量有限,后续研究可进一步拓展 CW-MFC 耦合系统对不同种类农药的去除,并在保证农药去除效果的基础上,进一步提高 MFC 的产电性能。

2.4 含酚废水

含酚废水是炼焦、炼油、造纸、塑料等行业产生的典型难降解有毒废水。尽管活性污泥法、生物膜法等传统生物处理技术应用广泛,但其功能微生物及酶系统易受酚类毒性抑制而流失,致使处理效率不稳定且运行成本增高。

因此,为了克服传统处理方法的效率低、成本高的缺点,各种新型的处理方法被不断发掘。张晓威^[20]以苯酚为底物,更加细致地研究了进水 COD 浓度和 HRT 对 CW-MFC 系统性能的影响,同时设置实验组和空白组来研究开闭路对污水净化效果的区别,证明了 CW-MFC 在难降解污染物处理方面的优势。当进水 COD 浓度为 350 mg/L 时,去除率达到了最大为 95.7%。Wang 等^[25]构建了一个降流式微生物燃料电池(DLCW-MFC)系统来处理对氯苯酚(4-CP)和 Cr^{6+} 污染的废水。结果表明,系统在 pH 6.5 时对 4-CP 去除率最高,达到 99.0%。这可能是因为 pH 为 6.5 时提高了体系的电荷转移能力和离子扩散能力。

3 CW-MFC 降解难降解污染物的影响因素

区别于生活废水,难降解废水对 CW-MFC 系统的要求更高,如何整体优化 CW-MFC 耦合系统的组成元素及运行参数是目前亟待解决的课题。CW-MFC 耦合装置在表层设计为阴极,在深部设计为阳极,使阳极区溶解氧含量最低而阴极区的溶解氧含量最大化,从而提高了体系的氧化还原电位,并改善了系统的污染物去除效率和产电性能。一般说来,CW-MFC 耦合体系的污水处理效率和产电性能主要从组成元素和运行参数 2 方面确定,处理各种难降解废水时的系统组成如表 2 所示。

表 2 CW-MFC 耦合系统处理各种难降解污染物时的系统组成

废水类型	反应器高度, 直径/cm	电极材料	基质	湿地植物	系统特点
染料 ^[13]	45,19	活性炭,碳毡+铜网	碎红砖	鸢尾	碳毡和活性炭 2 种电极
偶氮染料 ^[14]	45,30	GAC+SSM	活性炭,砾石	空心菜	改变进水负荷和外部电阻
抗生素 ^[15]	55,25	碳毡+SSM	陶粒,铁碳	美人蕉	铁碳材料作为基质
抗生素 ^[16]	60,20	活性炭+钛网	碎石	黄菖蒲	无
农药 ^[17]	60,30	SSM,铜棒	石子,活性炭,铝污泥	菖蒲	脱水铝污泥作填料

续表

废水类型	反应器高度, 直径/cm	电极材料	基质	湿地植物	系统特点
农药 ^[18]	55,21	GAC+SSM	白云石,鹅卵石	芦苇	水解酸化池作预处理
酚类 ^[19]	32,26	GAC+SSM	活性炭	李氏禾	堆叠型,多级型和模块化型 3 种 CW-MFC 构型
酚类 ^[20]	70,30	碳毡,GAC+SSM	陶粒,沸石	无	无
硝基苯 ^[21]	45,24	碳毡	砾石层,GAC,沙子	水葱,香蒲,黄花鸢尾	植物根生物量、根孔隙度、ROL

3.1 微生物

微生物群落主要分为 2 大类,具有电子转移能力的电化学生活性细菌(EAB)和仅具有细胞内呼吸功能的非 EAB,EAB 将有机物降解过程中产生的电子通过外电路传输至系统阴极,形成了电子流,而电子流又反过来刺激促进了系统中功能微生物的富集,电子转移为厌氧区提供了额外的电子受体,有效解决了 CW 的电子受体不足的问题,提高了 CW-MFC 系统对难降解污染物的氧化还原效率。非 EAB 通过细胞内呼吸功能将分解有机物产生的代谢产物提供给 EAB。微生物群落对系统去污能力和产电性能有着显著影响,在处理难降解物过程中起到关键性作用,更高的微生物丰度对于难降解物有更好的处理性能,Lu 等^[16]研究发现 CW-MFC 系统中,生物降解是去除 LVFX 的主要途径,主导率超过 90%。Xu 等^[26]研究发现,Proteobacteria 和脱硫单胞菌(Desulfuromonas)丰度与抗生素去除率正相关,Desulfuromonas 通过裂解 SMX 的 S=O 双键降解磺胺类抗生素。袁玉杰等^[27]研究发现 EAB 作为电子受体或供体获得导电材料的支撑,从而增强代谢动力学并降解污染物,且电活性 CW 相比于传统 CW 在难降解物处理中有更好的应用。因此,如何富集 EAB、优化电子流、提高系统产电性能是 CW-MFC 系统处理难降解污染物的关键,这为电极材料、系统构型和污染物负荷的选择提供了重要依据。

3.2 湿地植物

湿地植物在 CW-MFC 系统中可以将氧气和有机物排泄到根际,包含多种微生物,并为细菌附着提供表面。植物内生细菌具有固氮能力,污水中的氨氮被植物吸收合成植物蛋白质和有机氮,在具有特殊催化功能的蛋白质-固氮酶的催化下发生固氮反应。植物与细菌的联合,可以促进植物重金属离子,还可以吸收无机氮、磷等物质转化为 ATP、DNA 等有机成分,实现对难降解物的处理^[28]。杨佩汶等^[19]将李氏禾作为 CW-MFC 系统处理对氯苯酚(4-CP)的湿地植物,发现 4-CP 进水浓度为 40 mg/L 时系统具有最好的废水净化效果,且李氏禾的生理

生化响应指标均随 4-CP 胁迫浓度增加而变差。狄丽燕^[21]以 3 种湿地植物根系泌氧(ROL)和空白对照为研究对象,研究其在 CW-MFC 系统中对硝基苯(NB)废水处理和产电特性的影响。发现水葱在 200 mg/L 的 NB 废水作用下仍表现出了较高的耐受性,其 ROL 也高于其他 2 种湿地植物,这可能是由于其具有排列疏松的根表皮层细胞,从而有利于氧气的扩散。

3.3 电极材料

电极是 CW-MFC 系统重要组成部分,在 CW-MFC 中分为处在厌氧环境的阳极和好氧环境的阴极。一般选择导电性好、电化学生稳定、微生物相容性强作为电极材料。在 CW-MFC 研究中常用作电极的材料有石墨棒(GR)、泡沫镍(FN)、颗粒活性炭(GAC)、柱状活性炭(CAC)、粉末活性炭(PAC)、钛网(TM)、不锈钢网(SSM)、碳纤维毡(CFF)。对于难降解污染物,颗粒活性炭、不锈钢网和碳纤维毡的实际应用较多。Wang 等^[29]构建了碳纤维毡、不锈钢网、石墨棒和泡沫镍的下流式 CW-MFC 系统,碳纤维毡能够获得更好的除污效果和更好的产电效果,同时 Betaproteobacteria 和 Deltaproteobacteria 2 种产电菌的相对丰度较高,综合考虑碳纤维毡更适合用作电极材料。近年来,通过多种功能材料复合改性以协同提升电极的生物相容性与导电性等作用,已成为该领域的重要研究方向。张静等^[30]在碳毡电极基础上引入层状双氢氧化物(LDH)材料,构建了 FeNi-LDH 及 FeNi-LDH/聚苯胺复合改性电极,能够从材料结构、电化学生特性及微生物群落 3 个层面协同提升 CW-MFC 系统的性能,对难降解污染物的处理提供了可能。

3.4 水力停留时间

水力停留时间对 CW-MFC 起到重要作用。对于难降解污染物,水力停留时间过短,微生物对水中污染物不能充分降解利用,达不到相应去除及产电效果,水力停留时间过长,水中有机负荷降低,也会抑制微生物的生长繁殖。高磊^[18]在处理有机磷农药废水时发现,农药中乙酰甲胺磷浓度都随着 HRT

的增加而逐渐降低,且阴极处理效果明显高于阳极,最终去除率可达81.2%,当HRT为3 d左右已经基本达到吸附平衡状态。CW-MFC处理难降解污染物时,一般水力停留时间为3 d,过长的水力停留时间存在时间成本的浪费。在污水治理过程中,应注意停留时间与系统结构及其他运行条件的有效结合。

4 展望

CW-MFC耦合系统仍然处于实验室阶段,对染料废水、农药废水及抗生素废水等处理具有突出效果,是推广该系统到实际运行中的突出优势,但其他方面还有待进一步拓展研究,可以开展相关的研究作为新的发展方向,此外,CW-MFC耦合系统的功率输出较低,亟需优化架构材料及运行条件,以降低系统内阻、改善电子传递效率,从而进一步提升产电性能。

随着我国工业水平的不断提高,资源与能源的利用率将有更高的要求,一方面,资源消耗的增加将带来更多种类和数量的污染物;另一方面,能源需求的增长使得清洁能源的规模化发展已成为城市化与工业化进程的必然方向。CW-MFC耦合系统在解决环境污染的同时也提供了电能,符合了时代发展的潮流,有着很好的发展前景。

参考文献

- [1] Kucharzyk K H, Darlington R, Benotti M, *et al.* Novel treatment technologies for PFAS compounds: A critical review[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 204: 757-764.
- [2] Wu D, Li X, Zhang J, *et al.* Efficient PFOA degradation by persulfate-assisted photocatalytic ozonation[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 207: 255-261.
- [3] Yadav A K, Dash P, Mohanty A, *et al.* Performance assessment of innovative constructed wetland-microbial fuel cell for electricity production and dye removal[J]. *Ecological Engineering*, 2012, 47: 126-131.
- [4] Gupta S, Srivastava P, Patil S A, *et al.* A comprehensive review on emerging constructed wetland coupled microbial fuel cell technology: Potential applications and challenges[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 320: 124376.
- [5] Lei H, Jinke H, Chunli J, *et al.* Strategies to alleviate clogging in constructed wetlands: What can be learned from the microbial fuel cell coupled membrane bioreactor[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 405: 136998.
- [6] Rusyn I, Gómora-Hernández J C. Constructed wetland microbial fuel cell as enhancing pollutants treatment technology to produce green energy[J]. *Biotechnology Advances*, 2024, 77: 108382.
- [7] 张晨晨, 余倩, 袁树堂, 等. 复合垂直流人工湿地-微生物燃料电池耦合系统产电性能和水质净化[J]. *工业催化*, 2024, 32(3): 80-85.
- [8] You Y, Guo J. VFCW-MFC for simultaneous decontamination and electricity production under sulfadiazine stress: Effects of substrates and analysis of bacterial community structure[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 190: 11-21.
- [9] Villaseñor J, Capilla P, Rodrigo M A, *et al.* Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland-Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates[J]. *Water Research*, 2013, 47(17): 6731-6738.
- [10] Youssef Y A, Abuarab M E, Mahrous A, *et al.* A comprehensive overview of constructed wetland-microbial fuel cells for enhancing organic waste treatment and renewable energy production: From fundamentals to applications[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 64: 105505.
- [11] 陈婧, 秦歌, 余仁栋, 等. 人工湿地-微生物燃料电池性能优化研究进展[J]. *水处理技术*, 2022, 48(7): 25-31.
- [12] 付晶森, 赵亚乾, 袁玉杰, 等. 人工湿地中的微生物电化学技术耦合体系原理及其演变[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(22): 8-15.
- [13] 黄帅. CW-MFC处理低浓度亚甲基蓝废水的系统性能研究[D]. 成都: 成都信息工程大学, 2020.
- [14] Xie X, Hu J, Cao X, *et al.* In situ utilization of electron-enhanced degradation of azo dyes in a constructed wetland-microbial fuel cell coupling system[J]. *Sustainability*, 2024, 16(8): 3181.
- [15] Du Z, Bai S, Qian J, *et al.* Iron-carbon enhanced constructed wetland microbial fuel cells for tetracycline wastewater treatment: Efficacy, power generation, and the role of iron-carbon[J]. *Bioresource Technology*, 2025, 430: 132578.
- [16] Lu H, Lu S, Zeng Z, *et al.* Distinct performance and mechanism of microbial fuel cells-constructed wetland and direct-enhanced constructed wetland for levofloxacin removal[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2025, 158: 265-280.
- [17] 范闯. 铅污泥人工湿地结合微生物燃料电池去除农药废水[D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [18] 高磊. HA-CW-MFC复合系统处理农药废水的研究[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- [19] 杨佩汶, 林毅, 林华, 等. 不同构型人工湿地-微生物燃料电池对废水中对氯苯酚的净化效果及产电性能的影响[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(2): 507-516.
- [20] 张晓威. CW-MFC性能的影响因素及其对苯酚的去除研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [21] 狄丽燕. 植物根系泌氧对人工湿地耦合微生物燃料电池处理硝基苯废水的影响及其机制研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [22] Talbi K, Mammeri L, Lekikot B, *et al.* Degradation of sulfamethoxazole by a new modified Fenton-like process using Cu(II)-nitrotriacetic acid complex as catalyst at neutral pH in aqueous medium[J]. *Separation and Purification Technology*, 2022, 302: 122052.
- [23] Li X, Lu Z, Wu B, *et al.* Antibiotics and antibiotic resistance genes removal in biological aerated filter[J]. *Bioresource Technology*, 2024, 395: 130392.
- [24] Zakaria B, Dhar B. A review of stand-alone and hybrid microbial electrochemical systems for antibiotics removal from wastewater[J]. *Processes*, 2022, 10(4): 714.
- [25] Wang Y, Zhang X, Xiao L, *et al.* The in-depth revelation of the mechanism by which a downflow *Leersia hexandra* Swartz constructed wetland-microbial fuel cell synchronously removes Cr(VI) and p-chlorophenol and generates electricity[J]. *Environmental Research*, 2023, 216: 114631.
- [26] Xu W, Yang B, Wang H, *et al.* Microbial functional insights into antibiotics and nitrogen removal in constructed wetland-microbial fuel cells packed with mine waste substrate[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 64: 105709.
- [27] 袁玉杰, 赵亚乾, 付晶森, 等. CW-MFC中的电子流及对废水处理强化作用[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(16): 27-34.
- [28] Arslan M, Imran A, Khan Q M, *et al.* Plant-bacteria partnerships for the remediation of persistent organic pollutants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 24(5): 4322-4336.
- [29] Wang J, Song X, Wang Y, *et al.* Effects of electrode material and substrate concentration on the bioenergy output and wastewater treatment in air-cathode microbial fuel cell integrating with constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 99: 191-198.
- [30] 张静, 李玉霞, 刘玉香. LDH改性电极强化CW-MFC耦合系统深度处理污水研究[J]. *现代化工*, 2024, 44(S2): 123-129. ■