

郭梓博, 顾卫华, 赵静, 等. 微生物燃料电池(MFC)工艺对废水处理中重金属去除的研究进展[J]. 净水技术, 2026, 45(9): 20-29, 38.

Guo Z B, Gu W H, Zhao J, et al. Research advances in microbial fuel cell process for heavy metal removal in wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2026, 45(9): 20-29, 38.

微生物燃料电池(MFC)工艺对废水处理中重金属去除的研究进展

郭梓博¹, 顾卫华¹, 赵 静¹, 彭圣娟¹, 王晓暖¹, 赵 斌², 白建峰^{1,*}

(1. 上海第二工业大学资源与环境工程学院, 上海 201209; 2. 上海化工研究院有限公司, 上海 200062)

摘 要 【目的】随着工业化快速发展, 废水中的重金属污染问题日益严峻, 对生态系统和公众健康构成重大威胁。在我国碳达峰碳中和目标指引下, 水污染治理成为关键方向。微生物燃料电池(MFC)是1种创新生物电化学技术, 为重金属废水处理提供了绿色高效的解决途径。【方法】本文综述了MFC处理废水中重金属离子的去除机制(生物电化学还原、化学沉淀、生物吸附、植物根系吸收)及制约MFC产电性能与重金属去除率的主要因素(阳极材料、阴极类型、重金属离子含量、pH), 并总结MFC与其他技术[微生物电解池(MEC)、光电催化(PEC)、人工湿地(CW)、好氧颗粒污泥(AGS)]耦合处理重金属废水的研究进展。【结果】通过电极改性和参数优化可显著提升MFC性能, MFC对重金属的去除是以生物电化学还原机制为主, 化学沉淀、生物吸附、植物根系吸收多机制协同作用的结果, 构建MFC与MEC、CW、PEC等工艺的耦合系统可有效提升污染物去除率, 为推进重金属废水治理技术创新提供有力支撑。【结论】MFC在重金属废水处理方面展现出巨大的应用潜力, 但其大规模应用仍面临产电性能有限、重金属毒性抑制、复杂体系电子竞争等挑战。未来研究应聚焦于开发高性能低成本的电极材料、培育耐受性菌株、优化耦合工艺设计, 以推动该技术向高效、规模化的方向发展。

关键词 微生物燃料电池; 重金属; 废水; 去除机制; 影响因素; 耦合

中图分类号: X703 文献标志码: A 文章编号: 1009-0177(2026)09-0020-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2026.09.003

Research Advances in Microbial Fuel Cell Process for Heavy Metal Removal in Wastewater Treatment

Guo Zibo¹, Gu Weihua¹, Zhao Jing¹, Peng Shengjuan¹, Wang Xiaonuan¹, Zhao Bin², Bai Jianfeng^{1,*}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China;

2. Shanghai Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Shanghai 200062, China)

Abstract [Objective] With the rapid advancement of industrialisation, heavy metal pollution in wastewater has become an increasingly severe issue, posing significant threats to ecosystems and public health. Guided by China's objective of "carbon peaking and carbon neutrality", water pollution control has emerged as a critical direction. Microbial fuel cell (MFC) represent an innovative bioelectrochemical technology, offering a green and efficient solution for treating heavy metal-contaminated wastewater. [Methods] This paper reviews the mechanisms for removing heavy metal ions from wastewater via MFC (bioelectrochemical reduction, chemical precipitation, bioadsorption, and plant root uptake), alongside key factors influencing MFC power generation and heavy metal removal efficiency (anode materials, cathode types, heavy metal ion contents, pH). It further summarises research progress on coupled treatment systems integrating MFC with other technologies (microbial electrochemistry, photocatalysis, constructed wetlands, aerobic granular sludge) for treating heavy metal wastewater. [Results] Electrode modification and parameter optimisation can significantly enhance MFC performance. Heavy metal removal by MFC primarily occurs through bioelectrochemical reduction,

[收稿日期] 2025-09-04

[基金项目] 上海市科委地方院校能力提升计划(23010500500); 上海市浦东新区民生科研专项(PKJ2023-C07, PKJ2024-C02)

[作者简介] 郭梓博(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体废弃物处理与处置, E-mail: 2523359472@qq.com。

[通信作者] 白建峰(1978—), 男, 教授, 研究方向为固体废物资源化、环境污染物微生物修复, E-mail: jfbai@sspu.edu.cn。

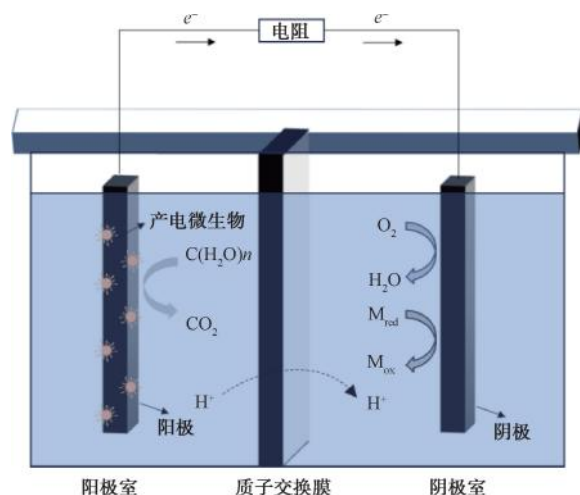
supplemented by synergistic mechanisms including chemical precipitation, biosorption, and plant root uptake. Coupling MFC with microbial electrochemisers (MEC), constructed wetlands, or photocatalysis effectively boosts pollutant removal efficiency, providing robust support for advancing technological innovation in heavy metal wastewater treatment. [**Conclusion**] MFC demonstrate substantial application potential in heavy metal wastewater treatment, yet their large-scale deployment remains constrained by challenges including limited electricity generation capacity, heavy metal toxicity inhibition, and electron competition within complex systems. Future research should focus on developing high-performance, low-cost electrode materials, cultivating tolerant microbial strains, and optimising coupled process designs to advance this technology towards efficient, scalable implementation.

Keywords microbial fuel cell (MFC); heavy metal; wastewater; removal mechanism; influencing factor; coupling

传统化石能源的广泛使用及污水处理的不足导致工业、农业和生活废水大量排放,造成严重水污染问题。据生态环境部统计,在《排放源统计调查制度》的调查范围内,2023 年我国工业源和集中式污染治理设施中的废水重金属排放量仍高达 40.8 t。这些重金属主要来源于采矿、电镀等工业生产活动,具有持久性、生物累积性和强毒性,易通过食物链在人体内富集,超出安全阈值后将带来严重健康问题^[1-2]。例如,汞会损害神经系统造成四肢麻木、听觉失灵;铅在人体内半衰期长,易侵入大脑导致注意力下降、智力障碍;镉通过呼吸道和消化道进入人体,影响肾脏生理功能^[3]。因此,重金属污染治理成为水污染防治的重点领域。

矿产资源日益紧缺,重金属的回收利用显得尤为重要,而传统技术在这方面存在明显不足。物理法、化学法作为传统修复方法,虽被广泛使用,但普遍存在能耗大、会产生二次污染等问题。如化学沉淀法作为应用最广泛的方法,会产生大量含重金属的污泥,这些污泥被归类为危险废物;离子交换技术的投资成本高,膜容易受到污染;电解法需持续外部电力输入,增加能耗;吸附法容易性能衰减导致吸附效能下降^[4-5]。生物法(藻类修复、植物修复、生物酶修复)作为研究热点,具有无二次污染、操作简单的特点。微生物燃料电池(MFC)是一种经济环保的生物修复装置,可用于处理各类有机废水,以及含氮、含硫等特征污染物的废水,尤其在重金属废水处理中应用较为广泛,其利用电活性细菌的代谢活动释放电子和质子,电子通过胞外电子传递(EET)机制^[6]经细胞色素、导电菌毛或电子穿梭体转移到阳极,进而经外电路到达阴极,与渗透过质子交换膜的质子及电子受体结合,完成重金属离子的还原(图1)。受过电位、传质电阻等因素影响,MFC 阴极氧化还原电位需高于阳极,具有较高氧化还原电位的

重金属离子如 Cr^{6+} 、 Ag^+ 、 Cu^{2+} 通常作为电子受体参与还原转化为无毒状态,实现废水重金属的电化学去除与能量回收^[7],为废水处理提供了“去污-产能”的解决方案。



注: M_{red} —还原态介体; M_{ox} —氧化态介体。

图1 微生物燃料电池工作原理

Fig. 1 Working Principle of Microbial Fuel Cells

1 重金属去除机制

MFC 在重金属修复过程中表现出多机制协同去除的特征,其去除效率不仅依赖于单一机制,还是生物、化学与电化学过程共同作用的结果。

1.1 生物电化学还原

生物电化学还原作为 MFC 在处理重金属废水中的主要机制,利用阳极微生物氧化有机物产生的电子,通过外电路传递至阴极,在催化剂作用下使高价态重金属离子发生电化学还原,转化为低价态或金属单质沉淀。奥氏希瓦氏菌(*Shewanella oneidensis*)可通过氧化还原蛋白和结构蛋白与生物膜相结合将电子传递至细胞膜,再按电势由低到高的顺序将电子传递至膜外;蓝藻类微生物(*Cyanobacterium*)、热自养甲烷嗜热杆菌

(*Methanothermobacter thermautotrophicus*) 等微生物可产生蛋白质附属丝状物,实现长距离“细菌-电极”电荷传输^[8]。以上通过细胞膜或导电菌毛进行电荷传递的过程属于 EET 中的直接电子传递;如图 2 所示,间接电子传递是利用产电菌产生的自源性物质进行电荷传递,重金属离子可借助微生物产生的电子穿梭体或外加电子介体间接还原,通过接收微生物外膜细胞色素 c 的电子并传递至电极^[9],形成“微生物-穿梭体-受体”的间接还原路径。Wang 等^[10]发现,Fe³⁺作为电子穿梭介质,可消除带负电的阴极与 Cr₂O₇²⁻、CrO₄²⁻ 之间的静电排斥,循环伏安法显示,仅出现 Fe³⁺/Fe²⁺ 的氧化还原峰,表明铬还原完全依赖于铁介导的间接路径,如式(1)~式(2)。

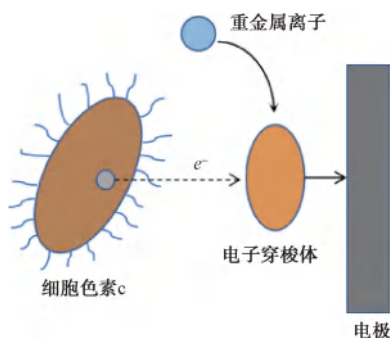
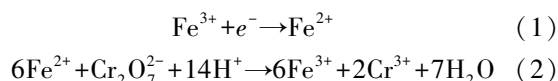


图 2 “微生物-穿梭体-受体”间接还原

Fig. 2 Indirect Reduction of “Microorganism-Shuttle-Receptor”

多种金属共存时,高氧化还原电位的重金属离子优先消耗电子,而电子分配不足及低电势金属的阴极氧化还原电位与重金属所需的氧化还原电位不匹配,会使还原受到抑制,需要外部电源调控阴极电位以进行反应^[11]。Modin 等^[12]通过控制阴极电位分步回收重金属,Cu²⁺在 0.34 V 的高电位下自发还原,随后在更低的电位(-0.51、-0.66 V 和+0.2 V)下分别回收 Pb²⁺、Cd²⁺和 Zn²⁺。

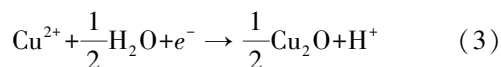
生物电化学还原过程中连续的电子流和质子流在两极间形成了电势差,从而在系统内部形成持续的弱电场。Zhao 等^[13]利用 MFC 系统产生的弱电场为电动修复提供动力,驱动 Pb²⁺向阴极迁移并富集,同时电场作用改变了电极表面的电荷环境,增强了在电极表面的吸附能力,在电迁移和电吸附作用下实现 84.86%±3%的 Pb²⁺去除率。

1.2 多机制协同去除

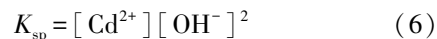
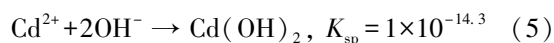
生物电化学还原是 MFC 去除重金属的核心途径,但实际去除率往往得益于多种机制的协同作用。在 MFC 运行过程中,通过其他次要机制协同辅助重金属的固定、转化或富集,与生物电化学还原形成互补。

1.2.1 化学沉淀

化学沉淀机制常与生物电化学还原协同作用,共同实现重金属的高效去除,还原后的低价金属离子或阴极室中存在的重金属离子,与阴极液中的阴离子结合形成难溶性沉淀物。电流强度通过调控电子供给速率和还原路径决定沉淀产物的类型,Tao 等^[14]通过调节阳极和阴极的距离设置不同的电流强度,在(1.21±0.29)mA 的高电流区时检测到金属铜衍射峰,而处于(0.51±0.10)mA 的中低电流区时还检测到 Cu₂O 和 CuCl 峰。这可能是低电流时阴极表面电子通量不足及电荷的斥力作用导致反应路径改变,Cu²⁺接收单电子形成亚铜中间体,如式(3)~式(4)。



阴极区发生氧还原或产氢反应消耗质子导致 pH 升高,碱性环境促使重金属离子与 OH⁻结合形成氢氧化物沉淀。Colantonio 等^[15]通过持续驱动析氢维持阴极附近较高的 pH,以 Cd(OH)₂和 CdCO₃2 种沉淀形式去除大部分 Cd²⁺,少部分以 Cd 单质沉积。如式(5)~式(6)。



由于溶度积 K_{sp} 较小,本身倾向于形成沉淀,OH⁻浓度升高时,为维持溶度积平衡,Cd²⁺浓度将降低,从而促进更多的 Cd(OH)₂沉淀形成,而碳酸盐沉淀的形成归因于生物阳极乙酸盐的氧化(图 3)。

1.2.2 生物吸附

微生物吸附作用可以将溶液中的重金属离子转移,降低废水中可溶性重金属的含量,包括细胞表面吸附、细胞内吸附和细胞外吸附。MFC 中利用生物吸附处理重金属离子的相关研究多数依赖于胞外聚合物(EPS)介导的细胞外吸附机制。电话性微生物

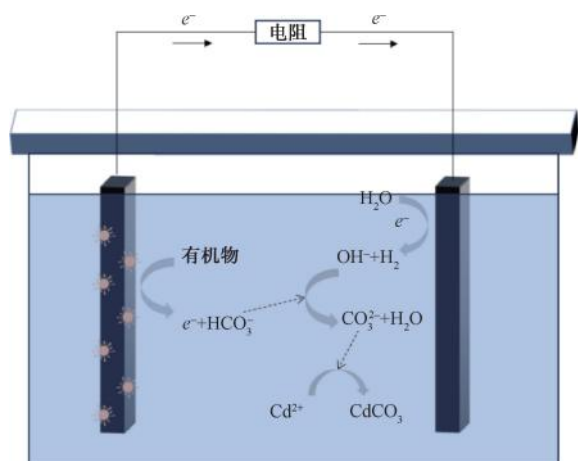


图 3 碳酸盐沉淀形成

Fig. 3 Formation of Carbonate Precipitates

如假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 和地杆菌属 (*Geobacter*) 通过分泌 EPS 实现对重金属的固定, MFC 阳极富集了具有胞外电子传递能力的微生物群落, 其分泌的 EPS 富含羟基 ($-\text{OH}$)、羧基 ($-\text{COOH}$) 等官能团, 可通过络合、离子交换或表面吸附作用与 Cd^{2+} 、 As^{3+} 、 As^{5+} 等结合, 形成稳定的“金属-EPS”复合物^[16]。Zhao 等^[13]发现在 Pb^{2+} 胁迫下分泌的 EPS 中类富里酸物质含有大量 $-\text{OH}$ 和羰基 ($\text{C}=\text{O}$), 可提供丰富的结合位点, 这些带负电荷的官能团可与 Pb^{2+} 形成稳定络合物, 且微生物暴露在 Pb^{2+} 时会产生更多 EPS 来抵御重金属毒性, Pb^{2+} 试验组类富里酸荧光强度 (3 316) 远高于对照组 (144.9), 印证了这一防御机制。EPS 的分泌受到多种环境因素的调控, 微生物会面临电极电势变化、毒性物质胁迫、营养限制等触发应激响应分泌 EPS

形成保护性生物膜, 影响 MFC 的整体性能。Tang 等^[17]制备生物源合成金纳米颗粒/氧化石墨烯 (GO) 复合材料 (BioAu/GO) 选择性富集电活性菌和铬还原菌, 通过扫描电子显微镜 (SEM) 观察到, Cr^{6+} 被还原后, 电极表面出现大量沉积物和黏性物质包裹细菌细胞, 这些黏性物质被鉴定为微生物在 Cr^{6+} 毒性冲击下应激分泌的多糖类 EPS。

然而, 相关研究表明, 过多分泌的 EPS 会带来不利影响。一方面, 多糖作为 EPS 的组分之一并不具有导电性且可能增加电子传递的阻力, Yang 等^[18]发现地杆菌生物膜上的 EPS 中产电性能好的生物膜里层的蛋白和脂类含量较高, 而产电性能差的生物膜里层的多糖含量较高, 另一方面, EPS 上的亲水和疏水性位点可通过桥接和絮凝作用促进颗粒沉降, 形成致密的堵塞层^[19]。因此, 调控 EPS 的分泌对于 MFC 的优化运行至关重要。

1. 2. 3 植物根系吸收

植物微生物燃料电池作为利用活体植物发电的绿色能源技术, 目前多数研究聚焦于将其与人工湿地 (CW) 系统耦合处理废水。植物根系作为富集位点协同生物吸附机制固定重金属, 随后由根细胞上特异性蛋白介导跨膜吸收, 最后通过木质部转运积累至地上部分的茎叶 (图 4)。Wang 等^[20]分析水葫芦和黄菖蒲对污泥中重金属的富集率, 水葫芦根系对 Zn^{2+} 和 Ni^{2+} 的富集率分别为 21.10% 和 13.65%, 高于茎叶的 7.60% 和 4.98%, 根系直接接触污泥浸出液, 优先通过跨膜运输截留重金属, 且须状根系提供大比表面积和漂浮生长特性维持稳定厌氧环境, 对重金属的富集效果优于黄菖蒲。

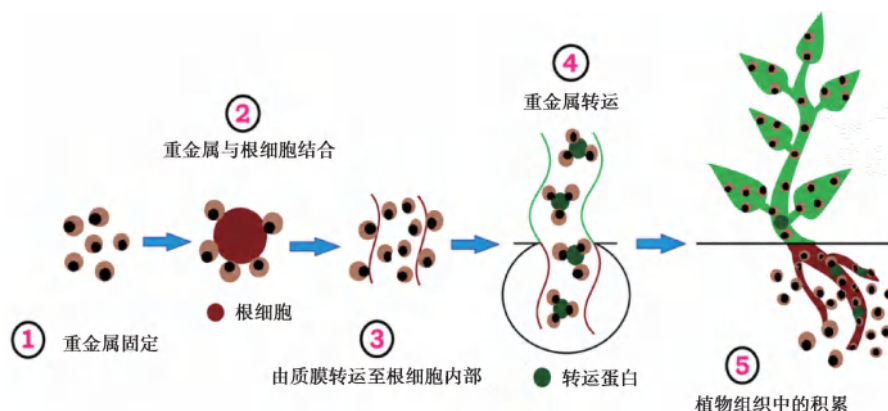


图 4 植物根系“吸收-转运”过程^[21]

Fig. 4 Process of "Absorption-Transferring" in Plant Root Systems^[21]

根际微生物可分泌脱落酸、吡啶乙酸、赤霉素等有机酸改变重金属化学形态,提高重金属的生物可利用性,曹栢枫等^[22]根据有机酸分析测定 CW-MFC 中 Cr^{6+} 质量浓度为 80 mg/L 时,李氏禾根分泌的烷类物质含量达到最大值,磷酸三乙酯作为化感物质能非直接接触重金属离子,通过亲脂作用与 Cr^{6+} 络合。此外,植物根系分泌的碳水化合物、羧酸、氨基酸等作为底物可为阳极附着的产电微生物提供稳定碳源。

植物通气组织将氧气输送至根系,根系皮层间隙可向根际环境释放氧气,提高局部溶解氧(DO)含量,有利于电化学活性菌的富集,同时根系的呼吸作用会持续消耗氧气,在根际形成好氧-厌氧梯度空间分层。Shi 等^[23]发现当 DO 质量浓度为 4.5 mg/L 时,植物根部 Cr 富集量较 3.0 mg/L 时提升 124%,活性菌 *Geobacter* 相对丰度提升,驱动 Cr^{6+} 向 Cr^{3+} 转化,并进一步通过蛋白质及草酸盐结合作用转化为低迁移性残渣态,当 DO 质量浓度升高至 5.0 mg/L 时,过量 O_2 扩散至阳极区破坏厌氧环境,抑制产电菌活性,导致电压与铬去除率下降。

2 MFC 性能影响因素

2.1 阳极材料

理想的电极材料具备良好的电导率、亲水表面及抗腐蚀等特点,这些修饰促进了有效的细胞外电子从电活性微生物转移到电极。碳基材料由于其比表面积大、价格低廉,不需要额外进行修饰,被广泛用作电极材料,常见碳基材料有碳纸、碳布、碳毡、碳刷、碳泡沫和石墨等。然而,碳基电极的活性反应位点有限,不允许在表面上形成足够的微生物生物膜,金属的抗菌特性并不会抑制产电菌这类细菌在其表面形成电活性生物膜^[24]。因此,为了进一步提高碳基材料在 MFC 中的性能,研究者尝试对其进行表面修饰或复合改性,修饰的材料可为金属、金属氧化物、纳米复合材料、导电聚合物等,从而增强电极表面的电子传递能力和微生物的附着效果^[25]。对阳极进行改性,强化其与微生物的界面相互作用,以提升生物电化学还原的驱动力。Ali Yaqoob 等^[26]利用油棕木质素制备 GO,分别负载 ZnO 和 TiO_2 ,纳米颗粒均匀附着于 GO 片层形成导电网络,复合电极第 45 d 对 Co^{2+} 的修复效率高达 91% 和 88.45%。Zhou 等^[27]采用涂覆法制备不同质量的二氧化锰/

碳纳米管 (MnO_2/CNTs) 改性石墨阳极,0.03 g MnO_2/CNTs 的最大输出电压和功率密度显著优于未修饰 CNTs 阳极,实现 98.93% 的 Cu^{2+} 去除率。导电聚合物的 π 电子共轭体系会产生电子离域,形成独特的能带结构降低电离电势,不仅强化了生物电化学还原,其修饰层通过提供更多官能团,间接增强了生物吸附机制。Fan 等^[28]采用溶液浸渍法制备聚苯胺(PANI)-聚多巴胺(PDA)改性碳毡阳极,PDA 的苯环结构与 PANI 的共轭链通过 π - π 堆叠作用延伸电子离域范围降低能隙,对 Cu^{2+} 的去除率达 90.53%,比 CF 阳极提高 38.1%。这些研究表明,通过纳米材料或复合材料对阳极进行改性,是提升 MFC 产电性能和重金属处理效率的有效途径。

2.2 阴极类型

阴极是生物电化学还原的场所,其反应速率通常制约 MFC 的产电性能,阴极类型可分为非生物型阴极和生物型阴极。非生物型阴极常以 O_2 为电子受体,氧的还原速度慢会影响 MFC 性能,添加催化剂可以提高还原速率,研究多以贵金属 Pt 作为催化剂,但其高成本和毒性并不适合大规模应用,且非生物型阴极存在成本高昂、运行稳定性差及催化剂易受污染等问题,为克服这些缺陷,研究转向利用微生物体内具有特定功能的酶作为催化剂构建生物型阴极,以替代金属催化剂。生物型阴极的优势在于:使用微生物取代金属催化剂,可降低 MFC 的建造成本;同时能够避免催化剂中毒现象,提升 MFC 的运行稳定性^[29]。Liu 等^[30]利用微生物群落协同机制驱动 MFC 运行,变形菌门(Proteobacteria)通过纳米导线结构缩短电子传递路径,介导 Cu^{2+} 的还原过程,放线菌门(Actinobacteria)分泌的胞外酶进一步分解大分子腐殖质,为电化学活性菌补充小分子底物。Zhao 等^[31]基于维生素棒状杆菌(*Corynebacterium vitae* LZU47-1)构建生物阴极,在表面生物膜“吸附-生物还原”作用下对 Cr^{6+} 去除率高达 98.63%,而非生物阴极 Cr^{6+} 去除率仅为 64.75%,有效避免了单一化学路径下 Cr^{3+} 沉积导致的阴极钝化问题。不同于阳极生物膜,阴极生物膜容易结垢阻碍离子进出,导致内阻增大。现有研究向催化剂层添加抗菌剂以抑制生物膜的生长,但效果容易随着抗菌活性的减弱而下降,对此,Rossi 等^[32]在阴极两侧各设置 1 个磁铁,空气侧的磁铁移动驱动水侧磁铁,通过压紧膜层消除水隙并刮除膜

面污垢,使带膜组功率达 121 mW/m^2 ,高于无磁铁带膜组 2 倍,但分离膜易污染仍需定期更换以维持长期稳定性。

2.3 重金属离子含量

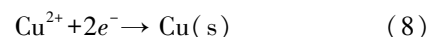
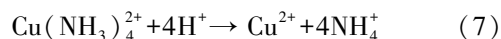
一定范围内提高阴极重金属电子受体浓度能够强化阴极半反应,促进电子从阳极向阴极流动。Huang 等^[33]指出重金属初始浓度的变化会改变阴极电子受体数量,以 Cr^{6+} 为阴极电子受体时,初始质量浓度由 12.8 mg/L 增至 39.2 mg/L ,MFC 最大功率密度随之升高, Cr^{6+} 还原速率由 $(2.0 \pm 0.1) \text{ mg/(g VSS} \cdot \text{h)}$ 提高至 $(2.4 \pm 0.2) \text{ mg/(g VSS} \cdot \text{h)}$ 。植物根系对重金属离子的吸收量与初始质量浓度呈正相关,在高质量浓度下表现出更强的富集能力。Habibul 等^[34]研究黑麦草根对 Cr^{6+} 的去除效果,发现 Cr^{6+} 质量浓度在 9.5 mg/L 和 19 mg/L 时,根部铬积累量分别为 $(3.51 \pm 0.89) \text{ mg/g}$ 和 $(5.59 \pm 1.18) \text{ mg/g}$ 。同时,还原后的 Cr^{3+} 易与根表阴离子基团结合产生沉淀,抑制其向茎叶部分运输。产电性能的提高与电阻的降低有关,刘远峰等^[35]将 Cu^{2+} 质量浓度由 20 mg/L 依次升高至 130 mg/L ,质量浓度梯度的增大加速离子向电极表面迁移,减少离子扩散缓慢导致的浓差极化,内阻由 $1\,080.97 \, \Omega$ 降低为 $231.62 \, \Omega$, Cu^{2+} 去除率由 19.13% 提升至 84.59% 。然而重金属质量浓度过大会抑制微生物活性,导致系统电阻不降反升,王锦等^[36]测定 Pb^{2+} 质量浓度分别在 8.19 mg/L 和 5.5 mg/L 的边界值以下时,对 Pb^{2+} 的去除率均超过 99% ,低质量浓度的 Pb^{2+} 吸附于电极表面填充微小孔隙,促进离子的吸脱附过程,降低电荷转移阻抗,而随着质量浓度增大至 10.92 mg/L 和 13.65 mg/L ,产生的毒性作用致使生物膜破损并脱落,电荷转移通道减少致使电荷转移阻抗急剧增大至 $428.27 \, \Omega$ 和 $546.67 \, \Omega$ 。重金属对微生物的毒性作用是限制 MFC 性能的重要因素,毒性作用会覆盖微生物代谢的酶合成阶段、酶催化反应阶段及活性酶传递环节,导致整个代谢链和电子传递过程瘫痪。Yu 等^[37]构建基于 MFC 的生物传感器测得水中 Cu^{2+} 、 Hg^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Pb^{2+} 、 Cr^{3+} 的抑制率

为 $1.95\% \sim 13.99\%$,其中 Hg^{2+} 对酶活性的破坏最强,使得 MFC 峰值电压由 520 mV 降低至 447 mV , Cu^{2+} 的抑制率随着其含量提高由 7.9% 上升为 18.48% 。微生物对重金属离子含量存在毒性阈值,Gai 等^[38]测定 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} 对 MFC 阳极电压输出的最低毒性浓度分别为 $303 \, \mu\text{mol/L}$ 和 $600 \, \mu\text{mol/L}$,而 Cd^{2+} 和 Hg^{2+} 与蛋白质巯基 ($-\text{SH}$) 的高亲和力结合会破坏脱氢酶、细胞色素 c 氧化酶等关键酶活性,在添加后立即导致电压下降,其中 Hg^{2+} 毒性最强。

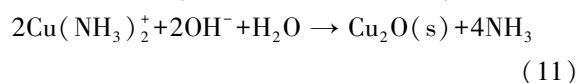
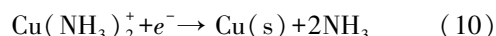
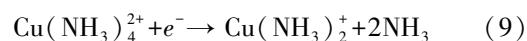
2.4 pH

pH 通过制约产物形态及反应路径影响 MFC 系统的整体性能,Zhang 等^[39]发现铜氨络合物 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 在碱性路径下无需解离,去除率高达 96% ,而酸性路径下的去除率为 84% ,如式(7)~式(11)。

酸性路径:



碱性路径:



酸性环境提供充足的 H^+ 加速阴极还原,而过低的 pH 会损伤阳极微生物,何则强等^[40]测得 pH 为 1 时,阴极室过高的 H^+ 含量导致质子交换膜两侧梯度剧增,引发 H^+ 向中性阳极室扩散破坏产电菌 F026 生长,加剧电极极化,阴极电压从 0.81 V 降至 0.76 V 。当阳极室内 pH 维持在中性条件时有利于产电微生物的代谢和产电,Jin 等^[41]分别在 pH 为 4.0、5.0、6.0 下运行 MFC, pH 在 6.0 时典型的 *Geobacter* 相对丰度达到 18% ,通过快速修复脱氧核糖核酸(DNA)损伤维持活性,表面致密生物膜利用杆状菌纳米线结构形成高效电子传递网络, Cu^{2+} 在 36 h 内完全去除。

不同重金属离子在 MFC 中实现高效还原去除的最适 pH 范围存在差异,表 1 总结了各类重金属离子在其最佳 pH 条件下的金属去除率。

表 1 不同重金属离子在最佳 pH 下的去除效能
Tab. 1 Removal Efficiency of Different Heavy Metal Ions at Optimum pH

金属离子	初始质量浓度/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	pH	去除效率	最大输出功率	参考文献
Cu^{2+}	150.00	6.0	100.00%,36h	336.16 mW/m^2	[41]

(续表1)

金属离子	初始质量浓度/(mg·L ⁻¹)	pH	去除效率	最大输出功率	参考文献
Cr ⁶⁺	10.00	8.0	43h内达97.00%	21.40 mW/m ²	[42]
Cd ²⁺ 、Zn ²⁺	Cd ²⁺ :22.50 Zn ²⁺ :26.20	6.8~7.1	Cd ²⁺ :90.00% Zn ²⁺ :97.00%	3.60 W/m ²	[43]
Fe ³⁺	500.00	2.4	7d内达99.00%	(8.60±2.30) W/m ³	[44]
Ag ⁺	50.00	7.0	98.20%	1.93 W/m ²	[45]
Ni ²⁺	2.93	7.2	>95.00%	—	[46]
Au ³⁺ 、Cu ²⁺	Au ³⁺ :250.00 Cu ²⁺ :1 000.00	Au ³⁺ :2.0 Cu ²⁺ :5.2	Au ³⁺ :100.00% Cu ²⁺ :53.00%	—	[47]
Pb ²⁺ 、Hg ²⁺	250.00	7.0	Pb ²⁺ :82.00% Hg ²⁺ :74.85%	3.89 mW/m ²	[48]
Pb ²⁺	40.00	4.0	96.71%	(8.20±0.24) mW/m ²	[49]

3 MFC耦合体系处理重金属废水

3.1 MFC-微生物电解池(MEC)

MEC是一种需要较小的外加电压驱动电化学生活性菌降解有机物的生物电化学系统,而MFC的输出电压一般较低,因此构造MFC-MEC耦合体系可利用MFC产生的生物电驱动MEC,在MEC厌氧阴极室内达到高效产氢和还原低氧化还原电位重金属离子的目的,具有能量自给、节约成本的特点^[50]。采用串联设计可提升电压驱动阴极还原,Zhang等^[51]对比MFC_{Cr}、MFC_{Cu}串联和并联情况下与MEC耦合的性能,两种方式下的开路电压分别为1.20 V和0.94 V,串联方式下Cr⁶⁺和Cu²⁺的还原率分别达到67.6%和60.4%;而并联方式电流分配不均引发电压反转和电子利用效率下降,还原率仅为62.9%和55.3%。

3.2 MFC-人工湿地(CW)

MFC-CW是将微生物燃料电池与CW耦合而成的污水处理工艺,通过“植物-基质-微生物”的协同作用实现废水净化与生物产电。CW内部垂直空间形成氧化还原梯度,生物阳极置于湿地床层厌氧区,微生物降解有机物释放电子,好氧区阴极利用根系氧气完成还原反应,CW本身可利用基质吸附、植物吸收方式截留重金属,现有研究根据进水方式不同可分为MFC-垂直流人工湿地(VFCW)和MFC-水平流人工湿地(HFCW)^[52]。填充介质的理化性质影响MFC-CW对重金属的去除效果,Mu等^[53]以生物陶瓷、沸石、方解石和火山岩为基质构建MFC-CW,火山岩具有优异的孔隙结构和较大的比表面

积,对Cr⁶⁺的去除率达99%,高于其他3种基质,构建上向流芦苇种植MFC-CW系统并设置开路MFC-CW等对照,闭路MFC-CW对Cr⁶⁺达到99.2%,高于开路MFC-CW的84.8%,COD去除率达到96.7%,表明植物作用与生物电化学过程能够强化铬和有机物的去除。

3.3 MFC-光电催化(PEC)

PEC技术利用半导体材料在光照下激发价带电子跃迁至导带,形成具有氧化还原能力的光生电子-空穴对,通过外加偏压的方法促进光生空穴与电子的分离抑制其结合,提升对光能的利用率及光催化的效率,而MFC所提供的生物电很好地匹配这一偏压,从而衍生出MFC-PEC这一耦合体系^[54]。TiO₂因亲水性和化学稳定性良好常被用作光催化剂,但光生电子-空穴对易复合导致催化效率低下,相关研究通过对电极进行改性提高催化效率,张红锐等^[55]制备Ag改性TiO₂纳米管电极作为MFC-PEC阳极,Ag的费米能级低于TiO₂,产生Schottky势垒促进光生电子从TiO₂导带快速转移至Ag同时阻挡电子从Ag回流至TiO₂,对Cu-EDTA的去除率达80.41%,是纯TiO₂的2倍;Zhou等^[56]采用层自组装技术制备光催化电极,将聚苯乙烯磺酸钠(PSS)与纳米TiO₂在氟掺杂氧化锡(FTO)基底上逐层交替沉积,形成8层PSS/TiO₂双分子结构,通过施加负偏压加速电子从光催化剂电极向工作电极的转移,2h内对Cu²⁺去除率达100%,对Pb²⁺、Cd²⁺去除率高于90%。

3.4 MFC-好氧颗粒污泥(AGS)

AGS 是微生物自凝聚作用形成的颗粒化生物聚集体,外部呈现为好氧区,内部因氧传质限制形成缺氧/厌氧区,为氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO_B)等好氧、兼性及厌氧微生物提供适宜的生存环境,这种结构使 AGS 具备高生物量持留性、优异的沉降性能及抵御环境毒性的能力^[57],作为生物阳极催化剂与 MFC 耦合,颗粒结构为电化学活性菌提供理想的生物膜载体。AGS 的 EPS 可高效螯合重金属, Yang 等^[58]对比 AGS-MFC 和絮状污泥 FS-MFC 在处理含铜废水的表现,能量色散 X 射线光谱(EDS)显示 AGS-MFC 阳极生物膜的铜元素信号强度高于 FS-MFC,且 Cu²⁺在 AGS-MFC 中的吸附符合准二级动力学模型($R^2>0.999$),表明其以化学吸附为主导。AGS 在不同重金属含量胁迫下可动态调整微生物群落结构以维持系统污染物去除效能,覃容华等^[59]发现在低 Cr⁶⁺含量下,优势菌群以甲烷丝菌属(*Methanothrix*)和甲烷杆菌属(*Methanobacterium*)的产甲烷菌为主,由甲烷代谢间接驱动还原,当质量浓度增大到 100 mg/L 时以 *Geobacter* 和互营杆菌属(*Syntrophobacter*)为主,Cr⁶⁺通过微生物菌群之间的联营机制进行还原,在 80 mg/L 时实现 99.70%的还原率。

4 结语与展望

4.1 总结与挑战

MFC 技术作为 1 种能够同步处理重金属废水和回收生物电能的方法,展现出良好的应用前景。本文综述了 MFC 处理重金属废水的去除机制、影响因素及耦合工艺的研究进展。结果表明,MFC 通过生物电化学还原这一主要机制还原重金属,并协同化学沉淀、生物吸附、植物根系吸收机制高效处理重金属废水,同时系统性能受电极材料、阴极类型、pH 和重金属含量多因素影响,通过与 CW、PEC 等工艺耦合,进一步提升处理效能。然而,该技术走向实际应用仍面临一系列挑战:实验室规模下的实际功率通常较低,难以满足实际能源回收的需求;重金属离子对阳极电活性微生物的毒性抑制作用显著,是限制系统长期稳定运行的关键因素;实际废水的成分复杂,多种离子共存竞争电子和有机污染物对 MFC 的处理效能和稳定性构成严峻考验。

4.2 未来展望

针对当前 MFC 处理重金属废水存在的研究瓶

颈,未来的研究重点应从这些方面展开:深入解析重金属与微生物的相互作用机制,筛选和构建耐受性、高电活性的功能菌群;开发高性能、低成本的电极材料和非贵金属催化剂,以加速反应动力学并降低成本;推进 MFC 与其他工艺的深度耦合,探索其放大化应用的可行性,融合人工智能算法,优化系统参数,实时调控生物电化学过程,推动废水处理高效智能化及“双碳”目标的实现。

参考文献

- [1] Fang C L, Achal V. The potential of microbial fuel cells for remediation of heavy metals from soil and water—Review of application[J]. *Microorganisms*, 2019, 7(12): 697.
- [2] Oladimeji T E, Oyedemi M, Emetere M E, et al. Review on the impact of heavy metals from industrial wastewater effluent and removal technologies[J]. *Heliyon*, 2024, 10(23): e40370.
- [3] 侯秀娟. 浅谈水中重金属的污染来源和危害及去除方法[J]. *饮料工业*, 2019, 22(5): 73-77.
Hou X J. Discussion on the source, harm and removal method of heavy metals in water[J]. *Beverage Industry*, 2019, 22(5): 73-77.
- [4] Bagchi S, Behera M. Assessment of heavy metal removal in different bioelectrochemical systems: A review[J]. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2020, 24(3): 04020010.
- [5] Gajda I, Stinchcombe A, Greenman J, et al. Microbial fuel cell-A novel self-powered wastewater electrolyser for electrocoagulation of heavy metals[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017, 42(3): 1813-1819.
- [6] Logan B E, Rossi R, Ragab A, et al. Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems[J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2019, 17(5): 307-319.
- [7] Do M H, Ngo H H, Guo W S, et al. Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 639: 910-920. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.05.136.
- [8] 金世轩. 基于三维石墨烯气凝胶的微生物燃料电池阳极研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
Jin S X. Study on three-dimensional graphene aerogel as the anode for microbial fuel cells[D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [9] 陈丹丹, 罗小波, 李芳柏. 穿梭体影响微生物群落胞外电子传递过程的研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(8): 1419-1425.
Chen D D, Luo X B, Li F B. Effects of shuttles on extracellular electron transfer of microbial community[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(8): 1419-1425.

- [10] Wang Q, Huang L P, Pan Y Z, et al. Impact of Fe(III) as an effective electron-shuttle mediator for enhanced Cr(VI) reduction in microbial fuel cells: Reduction of diffusional resistances and cathode overpotentials [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 321: 896–906. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.10.011.
- [11] Meng C H, Dai S N. Microbial fuel cells for heavy metal wastewater treatment: Mechanisms, applications, and challenges [J]. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 2025, 141: 140–146. DOI: 10.54097/v3yp0b72.
- [12] Modin O, Wang X F, Wu X, et al. Bioelectrochemical recovery of Cu, Pb, Cd, and Zn from dilute solutions [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235: 291–297. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.07.058.
- [13] Zhao C C, Shang D W, Zou Y L, et al. Changes in electricity production and microbial community evolution in constructed wetland-microbial fuel cell exposed to wastewater containing Pb(II) [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139127. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.139127.
- [14] Tao H C, Zhang L J, Gao Z Y, et al. Copper reduction in a pilot-scale membrane-free bioelectrochemical reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(22): 10334–10339.
- [15] Colantonio N, Kim Y. Cadmium(II) removal mechanisms in microbial electrolysis cells [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 311: 134–141. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.02.062.
- [16] Li M, Deng X, Sun W, et al. Extracellular polymeric substances of acidophilic microorganisms play a crucial role in heavy metal ions adsorption [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(6): 4857–4868.
- [17] Tang S E, Zhuang X L, Zhao W Q, et al. Catalytic role of biogenic gold nanoparticles in improving Cr(VI) removal efficiency of biocathode microbial fuel cells [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2024, 99(6): 1364–1376.
- [18] Yang G Q, Huang L Y, Yu Z, et al. Anode potentials regulate *Geobacter* biofilms: New insights from the composition and spatial structure of extracellular polymeric substances [J]. *Water Research*, 2019, 159: 294–301. DOI: 10.1016/j.watres.2019.05.027.
- [19] Jiang C L, Zhong H, Jin Y N, et al. Mechanisms of microbial fuel cells alleviating bio-clogging in constructed wetlands [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67: 106275. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.106275.
- [20] Wang L, Xu D Y, Zhang Q Y, et al. Simultaneous removal of heavy metals and bioelectricity generation in microbial fuel cell coupled with constructed wetland: An optimization study on substrate and plant types [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(1): 768–778.
- [21] Yaashikaa P R, Kumar P S, Jeevanantham S, et al. A review on bioremediation approach for heavy metal detoxification and accumulation in plants [J]. *Environmental Pollution*, 2022, 301: 119035. DOI: 10.1016/j.envpol.2022.119035.
- [22] 曹栢桐, 刘子昕, 韦翠屿, 等. 六价铬胁迫对李氏禾根系分泌物和微生物组成的影响 [J]. *环境工程*, 2024, 42(2): 175–181.
- Cao B F, Liu Z X, Wei C Y, et al. Effect of Cr(VI) stress on root exudates and microbial composition of *Leersia hexandra swartz* [J]. *Environmental Engineering*, 2024, 42(2): 175–181.
- [23] Shi Y C, Tang G, You S H, et al. Effect of external aeration on Cr(VI) reduction in the *Leersia hexandra swartz* constructed wetland-microbial fuel cell system [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3309.
- [24] Baudler A, Schmidt I, Langner M, et al. Does it have to be carbon? Metal anodes in microbial fuel cells and related bioelectrochemical systems [J]. *Energy & Environmental Science*, 2015, 8(7): 2048–2055.
- [25] 何万远, 欧阳二明. 微生物燃料电池阳极材料的研究概况 [J]. *应用化工*, 2023, 52(8): 2432–2436, 2442.
- He W Y, Ouyang E M. Research overview of anode materials for microbial fuel cell [J]. *Applied Chemical Industry*, 2023, 52(8): 2432–2436, 2442.
- [26] Ali Yaqoob A, Ibrahim M N M, Yaakop A S, et al. Utilization of biomass-derived electrodes: A journey toward the high performance of microbial fuel cells [J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(5): 99.
- [27] Zhou J, Zhang H N, Zuo T, et al. Enhanced copper-containing wastewater treatment with MnO₂/CNTs modified anode microbial fuel cell [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022, 159: 157–167. DOI: 10.1016/j.psep.2021.12.060.
- [28] Fan L P, Zhao Y D. Improvement of remediation ability of copper-contaminated soil by plant microbial fuel cell based on PANI-PDA anode modification [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2025, 20(6): 101009.
- [29] 张林芸, 王鲁宁, 姚淑华, 等. 生物阴极 MFC 处理重金属废水研究进展 [J]. *辽宁化工*, 2024, 53(8): 1236–1239.
- Zhang L Y, Wang L N, Yao S H, et al. Research progress in treatment of heavy metal wastewater with biological cathode MFC [J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2024, 53(8): 1236–1239.
- [30] Liu S H, Huang W J, Lin C W, et al. Copper removal and microbial community analysis in a single medium sediment microbial fuel cell [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2021, 44: 102348. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102348.
- [31] Zhao S, Chen Z J, Khan A, et al. Elevated Cr(VI) reduction in a biocathode microbial fuel cell without acclimatization inversion based on strain *Corynebacterium vitæruminis* LZU47-1 [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(4): 3193–3203.
- [32] Rossi R, Yang W L, Zikmund E, et al. *In situ* biofilm removal from air cathodes in microbial fuel cells treating domestic wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2018, 265: 200–206.

- DOI: 10.1016/j.biortech.2018.06.008.
- [33] Huang L, Chen J, Quan X, et al. Enhancement of hexavalent chromium reduction and electricity production from a biocathode microbial fuel cell[J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2010, 33:937-945. DOI: 10.1007/s00449-010-0417-7.
- [34] Habibul N, Hu Y, Wang Y K, et al. Bioelectrochemical chromium (VI) removal in plant-microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50 (7) : 3882 - 3889.
- [35] 刘远峰, 耿风华, 刘建波, 等. 微生物燃料电池处理含铜废水的研究[J]. *环境污染与防治*, 2017, 39(2): 185-190.
Liu Y F, Geng F H, Liu J B, et al. Study on treatment of copper-containing wastewater by microbial fuel cell [J]. *Environmental Pollution & Control*, 2017, 39(2): 185-190.
- [36] 王锦, 王丽, 韩煦葳, 等. Pb(II)对CW-MFC系统效能及生物膜电极催化活性的影响机制研究[J]. *环境科学学报*, 2025, 45(6): 53-67.
Wang J, Wang L, Han X W, et al. Research on the influence mechanism of Pb(II) on the performance of CW-MFC system and the catalytic activity of biofilm electrodes [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2025, 45(6): 53-67.
- [37] Yu D B, Bai L, Zhai J F, et al. Toxicity detection in water containing heavy metal ions with a self-powered microbial fuel cell-based biosensor[J]. *Talanta*, 2017, 168: 210-216. DOI: 10.1016/j.talanta.2017.03.048.
- [38] Gai R Z, Liu Y Y, Liu J, et al. Behavior of copper, nickel, cadmium and mercury ions in anode chamber of microbial fuel cells [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2018, 13(3): 3050-3062.
- [39] Zhang L J, Tao H C, Wei X Y, et al. Bioelectrochemical recovery of ammonia - copper (II) complexes from wastewater using a dual chamber microbial fuel cell [J]. *Chemosphere*, 2012, 89(10): 1177-1182.
- [40] 何则强, 张蕊, 龙秋萍, 等. 双室微生物燃料电池对电解锰废水中Cr(VI)的去除及其产电性能研究[J]. *中国有色金属学报*, 2018(9): 1937-1947.
He Z Q, Zhang R, Long Q P, et al. Removal of Cr(VI) from electrolytic manganese wastewater and electricity production by dual-chamber microbial fuel cell [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018(9): 1937-1947.
- [41] Jin J, Amanze C, Anaman R, et al. Electrochemical responses and microbial community shift of electroactive biofilm to acidity stress in microbial fuel cells[J]. *Minerals*, 2022, 12(10): 1268.
- [42] Xafenias N, Zhang Y, Banks C J. Evaluating hexavalent chromium reduction and electricity production in microbial fuel cells with alkaline cathodes[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(8): 2435-2446.
- [43] Abourached C, Catal T, Liu H. Efficacy of single-chamber microbial fuel cells for removal of cadmium and zinc with simultaneous electricity production [J]. *Water Research*, 2014, 51: 228-233. DOI: 10.1016/j.watres.2013.10.062.
- [44] Lefebvre O, Neculita C M, Yue X D, et al. Bioelectrochemical treatment of acid mine drainage dominated with iron[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 241: 411-417. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2012.09.062.
- [45] Lim B S, Lu H, Choi C, et al. Recovery of silver metal and electric power generation using a microbial fuel cell [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2015, 54(13): 3675-3681.
- [46] Liu Y Y, Shen L Y, Song P F, et al. Nickel(II) removal from wastewater by microbial fuel cell [J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2019, 14(1): 196-204.
- [47] Al-Ashheh S, Bagheri M, Aidan A. Removal of heavy metals from industrial wastewater using microbial fuel cell[J]. *Engineering in Life Sciences*, 2022, 22(8): 535-549.
- [48] Aleid G M, Alshammari A S, Ahmad A R D, et al. Advancement in microbial fuel cells technology by using waste extract as an organic substrate to produce energy with metal removal[J]. *Processes*, 2023, 11(8): 2434.
- [49] 薄涛, 季民. 筒状单室不锈钢电极微生物燃料电池回收重金属铅可行性分析[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(4): 858-865.
Bo T, Ji M. Feasibility analysis for lead recovery in cylinder-shape, single-chamber microbial fuel cell with stainless steel electrodes [J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(4): 858-865.
- [50] 潘璐璐, 吴丹菁, 刘维平. MFC-MEC耦合系统产电性能及处理含镉重金属废水的研究[J]. *化工学报*, 2019, 70(1): 242-250.
Pan L L, Wu D J, Liu W P. Electrical performance of MFC-MEC coupling system and treatment of heavy metal wastewater containing cadmium[J]. *CIESC Journal*, 2019, 70(1): 242-250.
- [51] Zhang Y, Yu L H, Wu D, et al. Dependency of simultaneous Cr (VI), Cu (II) and Cd (II) reduction on the cathodes of microbial electrolysis cells self-driven by microbial fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 273: 1103-1113. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2014.09.126.
- [52] 夏函青, 伍永钢, 江文亨, 等. 人工湿地-微生物燃料电池系统的发展及展望 [J]. *化工进展*, 2019, 38 (12) : 5548 - 5556.
Xia H Q, Wu Y G, Jiang W T, et al. Review on development and prospect of constructed wetland coupled with microbial fuel cell [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38 (12) : 5548-5556.
- [53] Mu C X, Huang K L, Wang L. Constructed wetland coupled microbial fuel cell (CW-MFC) with Phragmites australis planted for hexavalent chromium removal and electricity generation [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024, 67: 106238. DOI: 10.1016/j.jpwe.2024.106238.

(下转第38页)

- 理出水 COD 预测模型[J]. 现代信息科技, 2022, 6(23): 72-76.
- Shen P, Li M H, Zhang C. Effluent COD prediction model of sewage treatment based on CSO optimized fuzzy neural network [J]. Modern Information Technology, 2022, 6(23): 72-76.
- [18] 张玉泽, 姚立忠, 罗海军. 基于量子加权最小门限单元网络的出水 COD 预测[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(5): 1857-1864.
- Zhang Y Z, Yao L Z, Luo H J. Prediction of effluent COD based on quantum weighted minimal gated unit network[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(5): 1857-1864.
- [19] 陈伟, 金柱成, 俞真元, 等. 基于经验小波变换的鄱阳湖 COD_{Mn} 预测[J]. 环境工程技术学报, 2023, 13(1): 180-187.
- Chen W, Kim J S, Yu J W, et al. Forecasting COD_{Mn} of Poyang Lake based on empirical wavelet transform [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2023, 13(1): 180-187.
- [20] 陈树龙, 黎志伟, 黄祖安, 等. 基于 BiLSTM 深度学习模型的污水处理厂水质预测[J]. 当代化工研究, 2024(5): 96-98.
- Chen S L, Li Z W, Huang Z A, et al. Water quality prediction of sewage treatment plant based on BiLSTM deep learning model [J]. Modern Chemical Research, 2024(5): 96-98.
- [21] Wang T Y, Chen W, Tang B. Water quality prediction using ARIMA-SSA-LSTM combination model [J]. Water Supply, 2024, 24(4): 1282-1297.
- [22] Li Z H, Lu J H, Lu J Y. Energy efficiency evaluation and optimization for wastewater treatment plant[J]. Desalination and Water Treatment, 2024, 319: 100487. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100487.
- [23] Pang J F, Luo W, Yao Z Y, et al. Water quality prediction in urban waterways based on wavelet packet denoising and LSTM [J]. Water Resources Management, 2024, 38(7): 2399-2420.
- [24] Yang C Y, Guo Z Y, Geng Y, et al. Optimized deep learning models for effluent prediction in wastewater treatment processes [J]. Environmental Science: Water Research & Technology, 2024, 10(5): 1208-1218.
- [25] Wang J Q, Huang Y L. Evaluation of mine water quality based on the PCA-PSO-BP model [J]. Journal of Water and Climate Change, 2024, 15(2): 593-606.
- [26] 李健, 刘坚, 于广平, 等. 支持向量机在污水处理厂出水 COD 预测中的应用[J]. 环境保护与循环经济, 2023, 43(8): 18-21, 26.
- Li J, Liu J, Yu G P, et al. Application of support vector machine in COD prediction of wastewater treatment plant [J]. Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology, 2023, 43(8): 18-21, 26.
- [27] Zhang Q Y, Feng Y, Qiu A G, et al. Dynamic decision-making for inspecting the quality of treated sewage[J]. Urban Climate, 2024, 53: 101752. DOI: 10.1016/j.uclim.2023.101752.
- [28] Karamichailidou D, Alexandridis A, Anagnostopoulos G, et al. Modeling biogas production from anaerobic wastewater treatment plants using radial basis function networks and differential evolution[J]. Computers & Chemical Engineering, 2022, 157: 107629. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2021.107629.

(上接第 29 页)

- [54] Xu Z C, Chen S Y, Guo S Y, et al. New insights in light-assisted microbial fuel cells for wastewater treatment and power generation: A win-win cooperation [J]. Journal of Power Sources, 2021, 501: 230000. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.230000.
- [55] 张红锐, 张田, 隆曦孜, 等. 光催化与微生物燃料电池耦合对 Cu-EDTA 的降解特性[J]. 化工学报, 2022, 73(5): 2149-2157.
- Zhang H R, Zhang T, Long X Z, et al. Degradation characteristics of Cu-EDTA by coupling of photocatalysis and microbial fuel cell [J]. CIESC Journal, 2022, 73(5): 2149-2157.
- [56] Zhou P, Xu Y M, Cui T H. A new photoelectrocatalytic water purification system for simultaneous removal of organic pollutants and heavy metal ions in water [J]. Research, 2025, 8: 654. DOI: 10.34133/research.0654.
- [57] 程洁, 欧阳二明. pH 和碳氮比对 MFC-好氧颗粒污泥系统处理废水的影响[J]. 工业水处理, 2022, 42(8): 120-127.
- Cheng J, Ouyang E M. Effect of pH and carbon-nitrogen ratio on wastewater treatment by MFC-aerobic granular sludge system [J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(8): 120-127.
- [58] Yang P, Xiao J X, Hou Y Q, et al. Cooperative removal of Cu (II) by anaerobic granular sludge and flocculent sludge seeded MFC in treating Cu (II) containing organic wastewater [J]. Desalination and Water Treatment, 2025, 323: 101268. DOI: 10.1016/j.dwt.2025.101268.
- [59] 覃容华, 宿程远, 陆欣雅, 等. Cr(VI) 浓度对 MFC-颗粒污泥耦合体系运行效能及微生态的影响[J]. 广西师范大学学报: 自然科学版, 2023, 41(3): 242-254.
- Qin R H, Su C Y, Lu X Y, et al. Effects of Cr(VI) concentration on the performance and microecology of MFC-granular sludge coupling system [J]. Journal of Guangxi Normal University: Natural Science Edition, 2023, 41(3): 242-254.