

王子义, 张媛, 刘根深, 等. 微生物燃料电池污水处理及能源化研究进展[J]. 净水技术, 2024, 43(11): 29-38, 147.

WANG Z Y, ZHANG Y, LIU G S, et al. Research progress of microbial fuel cell for wastewater treatment and energization [J]. Water Purification Technology, 2024, 43(11): 29-38, 147.

微生物燃料电池污水处理及能源化研究进展

王子义¹, 张媛², 刘根深¹, 刘伟³, 李致朋^{1,*}

(1. 西北工业大学柔性电子研究院双碳科学与新能源技术中心, 陕西西安 710129; 2. 陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西西安 710001; 3. 西安科技大学理学院, 陕西西安 710054)

摘要 水环境低碳治理是“碳中和”背景下减污降碳关键领域之一。微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)能够利用微生物活性氧化分解污水中的有机物产生电子,减少CO₂排放且无二次污染,是“双碳”背景下国际前沿的新型污水处理技术,为污水处理及其能源化提供了新思路。此外,MFC可有效地将污水中的有机物进行去除的同时实现清洁电力的高效转化,是结合环境治理、能源回收与生态良好发展的新型可持续污水处理技术。文章对MFC近年来处理各领域污水及其能源化的研究进展进行了综述,基于MFC污水处理技术现存的问题,对其系统优化的策略进行了总结,并进一步分析了MFC未来性能优化的方向及能源回收的可行性,试图厘清“双碳”目标下污水能源化的前进方向,以期MFC的研发和应用提供有效的科学支撑。最后,提出了MFC具有促进低碳技术发展,推动能源技术转型和提升可再生能源利用效率的优势,对实现“双碳”目标具有重要的积极作用。

关键词 碳中和 污水处理技术 微生物燃料电池 环境治理 能源回收 系统优化

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2024)11-0029-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.11.004

Research Progress of Microbial Fuel Cell for Wastewater Treatment and Energization

WANG Ziyi¹, ZHANG Yuan², LIU Genshen¹, LIU Wei³, LI Zhipeng^{1,*}

(1. Zero Carbon Science and New Energy Technology Center, Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Xi'an 710001, China;

3. School of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract One of the major areas for lowering pollution and carbon emissions under the background of "carbon neutrality" is low-carbon remediation of water environment treatment. Microbial fuel cell (MFC) is a new wastewater treatment technology that can use microbial active oxidation to decompose organic matter in wastewater to produce electrons, reducing CO₂ emissions and no secondary pollution, providing new ideas for wastewater treatment and its energization. Moreover, MFC can effectively remove organic matter in wastewater and realize efficient transformation of clean electricity at the same time, which is a new sustainable wastewater treatment technology that combines environmental remediation, energy recovery and ecological development. This paper reviews the research progress of wastewater treatment and its energization by MFC in recent years. Based on the existing problems of MFC wastewater treatment technology, the strategies of system optimization are summarized, the performance optimization direction of MFC and the feasibility of energy recovery in the future are further analyzed, and the direction of wastewater energy conversion under the goal of "dual carbon" is attempted to provide effective scientific support for the research and development of MFC application. Finally, it proposes that MFC has the advantages of promoting the development of low-carbon technology, facilitating the transformation of energy

[收稿日期] 2024-01-08

[基金项目] 国家级领军项目(D5113230023);中央高校基本科研业务费专项资金(D5000230358);陕西省重点研发计划(D5140240056)

[作者简介] 王子义(1998—),女,博士,研究方向为微生物燃料电池在污水处理中的应用,E-mail: ziyiwang1010@126.com。

[通信作者] 李致朋(1981—),男,教授,研究方向为双碳科学与技术、燃料电池能源转换和存储、微生物燃料电池、固体氧化物燃料电池,E-mail: iamzpli@nwpu.edu.cn。

technology and improving the utilization efficiency of renewable energy, which has an important positive role in realizing the goal of "dual carbon".

Keywords carbon neutrality wastewater treatment technology microbial fuel cell (MFC) environmental remediation energy recovery system optimization

减碳为污水资源化利用带来新机遇。传统的污水处理方法操作程序复杂,间接排放出大量的温室气体造成环境污染,且废水能源的利用方式单一,造成资源的浪费。微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)能够利用微生物活性氧化分解污水中的有机物产生电子,减少 CO₂ 排放且无二次污染,是“双碳”背景下国际前沿的新型污水處理技术。MFC 凭借同时污水處理和产生清洁电力的广泛应用引起了国内外研究者的高度重视,尤其是日本将含有氡、铀、钍、镭等放射性元素的核污染水排海后增加了危害海洋生态环境的复杂污染物,对依靠海水生存的动植物造成不利影响,甚至危害人类健康^[1-3]。

文章对 MFC 污水處理及其能源化研究进展进行了综述,基于近年来 MFC 污水處理案例, MFC 可有效处理各个领域的污水,并实现污水中有机污染物-清洁电力的高效转化,是结合环境治理、能源回收与生态良好发展的多功能耦合的新型可持续污水處理技术^[4-5]。虽然目前 MFC 在水环境治理及其能源化领域已取得一定的进步,但在能源回收方面还存在一些挑战。因此,文章总结了 MFC 用于水环境治理和能源回收的巨大潜力及现存问题,为后续 MFC 在污水處理领域的技术改进和资源集中利用提供借鉴和依据。最后,分析了 MFC 作为一种可促进低碳技术发展、推动能源结构转型和提升可再生能源利用效率的生物电化学系统,对实现“双碳”目标具有重要的积极作用。

1 MFC 原理及其污水處理优势

英国植物学家 Potter^[6]于 1911 年发现微生物代谢有机质时可以产生电流,首次提出微生物产电概念并制造了世界上第 1 台 MFC 装置。初期搭建的 MFC 虽输出功率较低,性能不稳定,但仍有研究者^[7]使用尿液作为燃料将 MFC 应用于太空,表明 MFC 应用在污水處理领域具备可能性。随着 MFC 深入研究发现,电极-还原微生物还可从海洋底泥中提取能源,扩展了 MFC 修复海洋环境领域中的应

用^[8]。目前,城市生活污水处理的能耗过程中排放 CO₂、CH₄ 和 N₂O 等会对环境产生危害,且需额外电能供应,操作程序也较为复杂;而 MFC 是一种利用微生物作为催化剂将污水中的化学能转化为电能的新型污水處理技术,凭借原料广泛、资源利用率高、操作过程简单、污染小及同时进行污水處理/产电等优势广泛用于各类污水中各种污染物的去除和回收,是满足“碳中和”运行目标最节能最减碳的选择之一。

1.1 MFC 的基本原理

MFC 电池室由玻璃、有机玻璃、聚丙烯酸或任何其他在自然界中高度惰性的材料构成,基本组成部分包括阳极、阴极和分离器或质子交换膜^[9-11]。被称为外生电细菌或电活性细菌的微生物作为催化剂氧化阳极室中的生物质或生物燃料,产生电子、质子和其他代谢物,这个过程是环境友善的。质子从阳极转移到阴极室,和氧化剂(一般是氧气)发生还原反应生成水,从阴极排出。电子依靠合适的电子传递介质通过直接或间接的途径转移到阳极上,并通过外部负载完成电路,产生电流,从而完成污水處理和产生清洁电力的转化(图 1)。

影响 MFC 效率的参数有电池构型设计、电极间距、电极性质、催化剂(微生物)类型、基质类型和组成、pH、温度等^[12]。在各种影响因素中,MFC 构型、电极材料和微生物类型是改善 MFC 的关键。MFC 常用的两种构型是双室和单室,双室 MFC 的优点在于可以在阳极室和阴极室中分别设置参比电极,可分别对阳极、质子交换膜和阴极进行研究以提高 MFC 的功率输出^[13]。但双室 MFC 设计复杂,阴极传质阻力较大,内阻较高,功率密度较低^[14-15]。单室 MFC 通常只有 1 个阳极腔,不需要在阴极腔中充气,设计简单。此外,单室 MFC 可使用与周围空气直接接触的空气阴极,减少质子交换膜的使用,成本更低。然而,单室 MFC 电极距离过近可能会导致氧气在阳极扩散,从而限制了产电细菌的生长,并可能导致短路。因此,现在有相当多的研究集中在改进 MFC 的构型参数上。成本低、反应活性位点多、孔

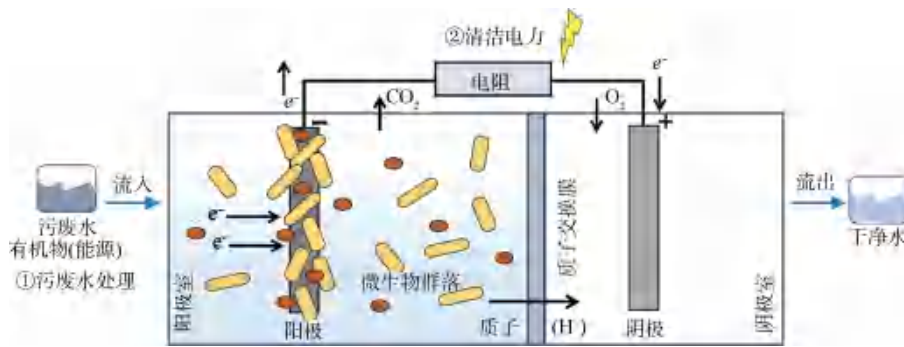


图 1 MFC 原理及应用

Fig. 1 Principles and Application of MFC

隙率高、生物亲和性好、促进氧还原反应的电极材料被用于 MFC 以提高其效率^[16]。此外,微生物作为 MFC 的催化剂,是 MFC 的核心组成,对 MFC 污水处理及功率密度的提升起关键作用^[17]。不同的微生物对底物的利用范围不同,导致 MFC 产电和污水净化的能力有很大差异。目前来说,MFC 常用于污水脱氮、脱硫、去除有机物和重金属,研究较多

的微生物菌群为硝化菌群、反硝化菌群和硫酸盐还原菌群等,其处理不同污染的机理如表 1 所示。然而,目前 MFC 底物利用效率较低,输出功率有限,影响了实际应用,微生物种类的探究将推动 MFC 的发展。尤其是,将产电菌的研究结合 MFC 电池构型、电极材料和操作条件的优化将加快 MFC 向工程化应用转变的进展。

表 1 MFC 去除污染物机理

Tab. 1 Mechanism of MFC for Pollutant Removal

去除污染物类型	菌种	污染物去除机理	参考文献
脱氮 硝酸盐 亚硝酸盐 铵 氮	硝化菌群、反硝化菌群	(I)硝化; (II)异养反硝化; (III)自养反硝化; (IV)厌氧氨氧化; (V)异化硝酸盐还原为铵	[18-20]
脱硫 硫酸盐 硫化物	硫酸盐还原菌群、硫化细菌菌群	(I)硫酸盐还原; (II)硫化物生产; (III)硫化物氧化	[21]
有机物 多环芳烃	多环芳烃厌氧降解菌群、硫酸盐还原菌群、硝酸盐还原菌群、产甲烷微生物菌群、金属离子还原菌群	(I)硫酸盐还原反应体系; (II)硝酸盐还原反应体系; (III)金属离子还原反应体系; (IV)产甲烷还原反应体系	[22]
卤代芳烃	可降解卤代芳烃的微生物类群	(I)复杂卤代芳烃取代基的脱支阶段; (II)卤代芳烃的卤基被取代,并被氧原子激活的阶段; (III)芳香环裂解成为脂肪酸类化合物,并进入微生物的物质代谢循环的阶段	[23-24]
硝基芳香烃	硝基芳香烃类化合物生物还原菌	(I)硝基经硝基还原酶作用还原成羟胺芳香化合物; (II)由羟胺裂解酶作用水解脱氨基; (III)形成二羟基芳香化合物进入开环途径	[23-24]
有机氟污染物	复杂有机污染物降解菌	(I)酯化; (II)引入羟基; (III)脱羧; (IV)引入甲酰或乙酰基; (V)脱氟; (VI)部分降解或由氨基取代哌嗪; (VII)在哌嗪环处形成共轭物或取代三号碳原子上羧基	[25]

(续表1)

去除污染物类型		菌种	污染物去除机理	参考文献
金属	铁 锰 铜 铬	重金属离子还原菌、 异化重金属还原菌	微生物和电化学共同作用 (I) 重金属同化作用是微生物将重金属同化为细胞物质; (II) 重金属异化是异化重金属还原菌将重金属作为 外部电子受体还原	[26-27]

1.2 MFC 污水處理优势

MFC 技术凭借以下优势广泛用于各领域污水中各种污染物的去除和回收,是满足“碳中和”运行目标的新型污水處理技术。

(1) MFC 资源利用率高且环保

平时不易处理的有机、无机物质或污水淤泥等可以作为 MFC 中被微生物呼吸催化和降解的底物来源,并转变成电能,提高了资源利用率,有助于减少环境污染。此外,由于 MFC 利用微生物作为催化剂,而室温、常压、接近中性的温和操作环境有利于微生物生长,同时也利于降低电池维护成本,提高安全性。

(2) 操作简单且能量转化率高

传统污水處理过程操作复杂、繁琐,甚至会造成二次污染。而 MFC 具有操作和功能上的优势,无需较大外部能量输入,例如单室 MFC 的阴极气体仅需简单的通风就可得到补充,确保 MFC 有效运作,产生高能量转化效率。

(3) 可与常规污水處理技术进行创新性结合,发挥产能和净化双重作用

与厌氧消化、连续循环曝气系统等工艺相比, MFC 对环境要求更低,污泥产出率更小,处理周期更短,可大大提升资源利用效率。且 MFC 与传统污水處理技术如好氧生物法和厌氧生物法结合,可明显提升 COD_{Cr} 去除效率,产电的同时可弥补污水處理过程消耗的电能^[28-29]。

MFC 可以达到更全面、高效的去除效果,为实现“碳中和”,开发新的清洁低碳高效且可替代化石能源的能源技术提供新视角。

2 MFC 污水處理及其能源化应用现状

水污染主要是由于城镇污水和工业废水排放而导致的地表水污染,这些水体在海陆空领域都有所分布,具有储量大、面积广、成分复杂以及不易净化、难处理等特点, MFC 因具备资源利用率高且环保、操作简单、能量转化效率高、产能和净化协同等优点,在处理各领域废水方面均有广泛应用。

2.1 处理海洋污水中的应用

沿海水域由于海水养殖废水、船舶含油污水、放射性废水等排放导致水体中硝酸盐、硫酸盐、重金属、有机碳等显著增加,存在污染风险^[30]。近年来, MFC 在深度脱盐方面取得了重要进展,例如研究者们^[31-32]使用原始污泥中的厌氧菌源构建了一种同步进行“产电-脱盐-去污”的微生物脱盐燃料电池,通过在中间脱盐室使用模拟海水, MFC 的脱盐率高达 95% 以上,为地下废水的脱盐提供了借鉴依据。研究人员^[33]使用沉积物微生物群落作为催化剂证明了沉积物 MFC 可通过生物降解实现加重海洋重度污染沉积物的烷烃酸盐和邻苯二甲酸盐极性化合物的去除。研究人员^[34]在海洋港口布局了沉积物 MFC,测试其减少沉积物中硫化物、磷酸盐和铵释放的潜力,验证了 MFC 可潜在地保护海洋环境免受此类死区形成的影响。Brock 等^[35]报道了使用沉积物中的厌氧微生物作为催化剂建立了淡水沉积物 MFC 实现对菲和芘的去除效果,对这两种多环芳烃的去除效率分别为 96.14% ± 1.28% 和 92.13% ± 3.29%。此外, Cu²⁺、Zn²⁺、Fe²⁺ 等重金属离子具有较高的氧化还原电位,可以作为 MFC 阴极的电子受体参与氧化还原反应,从而实现 MFC 分离或去除重金属离子的效果,这一过程是微生物与电化学共同作用的结果。MFC 同步处理海洋废水中重金属和产电提供了 1 项持续创新和持续发展的技术。例如, Liu 等^[36]利用硫酸盐还原菌构建了不同系统构型的 MFC 技术评估处理含 Zn 和 Cu 的海水养殖废水效率,所有系统对 Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 的去除性能都很好,且平均输出电压最高可达 (1 074.88 ± 49.90) mV,这表明 MFC 系统在污染物去除和能量回收方面具有广泛的应用潜力。此外, MFC 中的微生物还可氧化分解船舶舱底油污水等含油污水中的油污,直接产生供 MFC 蓄能的质子和电子,并在阴极发生电化学反应产生能量。这种新型的生物治理方法已在研究中得到证实,如佟伟^[37]利用 MFC 技术从产电和船舶舱底油污水處理两方面着手,使用沼泽红假单胞

菌作为催化剂构建了 MFC,对船舶舱底油污水中乳化柴油的降解率为 85.20%, COD_{Cr} 去除率为 79.89%,很大程度上减轻了船舶含油污水对海洋环境的影响。

此外,日本政府将含有高浓度的硝酸盐及像铀(U^{6+})等放射性核素的核污染水排放到太平洋,对人类生活 and 经济发展将产生非常不利的影响^[38]。核废料中 MFC 产生电能的同时去除硝酸盐和 U^{6+} 的适用性已得到证实。Vijay 等^[39]利用硝酸盐在阴极处作为电子受体,构建 1 个双室 MFC,生物阴极中 90% 的 U^{6+} 可以被回收为磷酸铀酰,功率密度为 2.91 W/m^3 。MFC 对 U^{6+} 的去除是通过吸附-还原-沉积机制进行的。 U^{6+} 被 MFC 阴极吸附,吸附后的 U^{6+} 进一步电还原为 UO_2 沉积在 MFC 阴极表面。吸附 U^{6+} 的减少引发了吸附 U^{6+} 解吸反应的再平衡,并诱导 U^{6+} 的再吸附,再吸附后的 U^{6+} 可进一步电还原为 UO_2 ,实现 U^{6+} 的连续脱除^[40]。利用 MFC 技术降解各种废水的同时产生清洁电力有着巨大的发展潜力,随着利用 MFC 技术进行生物和化学治理水环境研究的进一步深入,其必将在可持续能源发展方面实现更广泛的应用价值。

2.2 处理陆地污水中的应用

陆地废水包括生活污水和工业废水等,常含氮、硫等污染物,具有大量细菌和病原体,对动植物和人类健康具有一定的损害性。其中,氮在废水中主要以硝酸盐、亚硝酸盐、氨、铵等形式存在。MFC 除氮机理如表 1 所示,通过顺序硝化和反硝化进行的。反硝化是将具有催化反硝化反应所需酶的反硝化微生物接种到阴极室,通过生物催化反应处理含氮废水并同时发电^[18]。与非生物过程相比,其优点是该过程不会因硝酸盐等中间化合物的积累而受到抑制^[19]。在反硝化菌的帮助下,硝酸盐被生物还原为亚硝酸盐,硝酸盐和亚硝酸盐都可以被厌氧细菌用作终端电子受体在好氧环境中被生物或电化学氧化^[20]。除氮外,废水中还含有硫酸盐和硫化物形式的含硫无机物。与硝酸盐类似,含硫酸盐废水的处理也需要还原和氧化过程。不同的是,由于 MFC 中存在氧化还原环境,富硫酸盐废水的处理可在阳极室中组合成 1 个步骤,MFC 中硫代谢与有机物耦合协同处理含硫酸盐的废水。因此,处理富硫化物废水的一种节能方法是在阳极室接种硫酸盐还原和硫

氧化细菌^[41]。

目前,MFC 应用于多种陆地废水的处理已成为各国研究的热点。Suransh 等^[42]创建了 1 个分散式 MFC 系统同时处理生活废水并产生能源,该装置部署在住宅现场,并使用 36 L 中试规模装置运行了 92 d, COD_{Cr} 、硝酸盐、氨氮去除率最高,分别为 93.52%、84.93%、74.78%,试点户用 MFC 的可持续运行作为低成本的现场应用提供了积极的指示。此外,MFC 已陆续利用所有工业废水进行发电,MFC 的最大功率密度为 86 mW/m^3 (乳品废水)、 41 mW/m^3 (洗涤剂废水)、 20 mW/m^3 (软饮料废水)、 1 mW/m^3 (石化废水)。此外,MFC 的 COD_{Cr} 平均去除效率为 75% (乳品废水)、44% (洗涤剂废水)、79% (软饮料废水)、7% (石化废水),这些去除率对应于不同类型工业废水中存在的有机物的生物电化学利用来产生能量,将批次持续时间从 7 d 增加到 14 d 不会影响营养物质和重金属的去除^[43]。

2.3 处理航空航天污水中的应用

电力供应和生物尿液处理一直是航空航天工程师面临的巨大挑战。与生活废水相比,人类尿液由有机成分和无机盐组成,具有高导电性,是 MFC 燃料的选择之一^[44]。在 MFC 中,阳极区由脲酶阳性细菌产生的脲酶通过酶促作用可降解尿素,释放出副产物 NH_4^+ 和 CO_2 。 NH_4^+ 在电势和离子浓度作用下迁移至阴极区,在好氧(或厌氧)条件下与 O_2 发生硝化反应生成 NO_3^- 和 NO_2^- ;阴极区的细菌则通过生物反硝化过程将 NO_3^- 和 NO_2^- 还原为 N_2 ^[45]。此外,随着反应的 pH 升高,部分 NH_4^+ 与 OH^- 发生化学反应生成 NH_3 溢出^[46]。

目前的太空厕所方案仅限于通过反流人类液体废物将人类尿液回收到饮用水中。研究^[47]表明,利用尿液作为 MFC 的燃料是可能的。废水回收和废物管理系统已经在国际空间站上运行,从太空厕所的废水中收集清洁和新鲜的饮用水,特别是尿液^[48]。具体地,使用 1 个特定舱室收集航天器上所产的生物废物,这个过程释放电子并转移到阴极,产生可给小型电子设备充电的电力。然而,这项技术也存在挑战,尿液处理再利用的程序复杂,且尿液中的有机酸和高钙含量会对空间站上废水回收和废物管理系统中的组件造成腐蚀和破坏。此外,微生物的生长增多还会造成机组电磁阀堵塞,停止工作。

因此,需要一种更智能先进的技术,改善水管理技术的局限性。选择微藻并整合到 MFC 中的“绿色预处理”技术被证明更有前途,因为它不仅可以修复废水,还可以修复来自不同来源的固体生物废物,留下可用于培育优质植物的固体堆肥土壤^[49]。因此,在太空厕所设计中集成和内置具有相当光合作用的微藻 MFC,在成本和食物重量方面都是有希望的,并且可以携带到航天器进行长期任务飞行,是航天器使用的新一代高效电源。

3 MFC 在污废水处理及资源化研究重点分析

3.1 MFC 系统优化的策略

尽管 MFC 用于废水处理及对助力“双碳”目标的优势显著,但由于发电量不足,MFC 成为实用废水处理及能源设备还有很长的路要走。为了提高 MFC 的性能,目前集成系统在现有的 MFC 中经济可行。微流控技术和神经网络是两种新兴技术,在 MFC 系统和运行参数优化方面具有巨大潜力。除此之外,为 MFC 开发了高转换效率电源管理系统(PMS),从多个 MFC 收集生物电,通过管理不稳定的电源来处理电源和电源需求的各种变化,大大提高了 MFC 的能源利用率,对推动 MFC 工程化应用的发展意义非凡。

3.1.1 微流控微生物燃料电池(MMFC)

如上文所述,质子交换膜是影响 MFC 水净化效率和发电能力的 1 个重要因素,减少质子交换膜的使用不仅可以降低 MFC 的成本,也是 MFC 技术未来的发展趋势。微流控技术由于层流和微纳尺度结构的优点,使得 MMFC 比典型的 MFC 具有更低的成本和更大的潜力^[50-51]。对微流控通道试验条件的有力控制为研究和优化无膜 MFC 提供了一个独特的机会,特别是在流动的作用方面^[52]。并且,MFC 目前的发展主要依靠试验,对数值模拟的研究较少。微流控技术的多通道设计有利于帮助 MFC 通过模拟对试验进行验证,其阳极液和阴极液从相应的入口泵入不同的通道,并在流动通道中汇合,形成可分离反应物的共层流。混合微生物形成的生物催化剂氧化阳极液中的底物产生电子和质子。细菌通过生物膜基质中的导电材料将电子从它们的膜结合电子载体转移到阳极,阳极中的电子则通过外部电路转移到阴极。质子通过电解液被输送到阴极。

然后,阴极电解质、电子和质子在阴极内完成还原反应。最后,混合溶液通过出口排出电池(图 2)。Ouyang 等^[53]提出了一种可靠且通用的 MMFC 池模型,通过研究 MMFC 在不同工况下的输出性能和能量效率,并采用多目标粒子群算法对电池性能进行综合优化。在提高能效的基础上,最大功率密度和电流密度可达 1.193 W/m^2 和 3.51 A/m^2 。微流控技术和 MFC 技术的集成帮助对 MFC 输出功率密度的参数通过试验和模拟进行分析和优化,成为相关领域的研究人员提供生物传感器和能源生产研究的多功能平台。

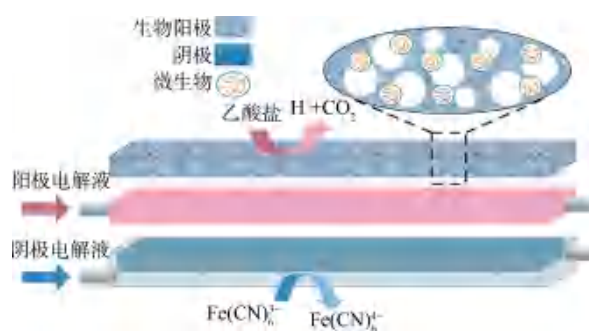


图 2 MMFC 的结构示意图^[53]

Fig. 2 Schematic Diagram of MMFC^[53]

3.1.2 人工神经网络(ANN)预测 MFC

MFC 系统具有很强的非线性和高耦合性,涉及控制科学、微生物学、电化学等学科^[54]。由于其相互关联的处理特性,ANN 可以在 MFC 试验中发挥关键作用。目前的研究^[55-57]是收集数据并使用 ANN 对不同 MFC 功率密度所涉及的温度、浓度、流速、基质种类、膜材料、电极配置和生物膜群落对 MFC 发电量的影响。Lim 等^[58]利用 ANN 预测 MFC 中存在的生物膜群落,即厌氧黏杆菌、芽孢杆菌、梭菌、丛毛单胞菌、脱硫单胞菌、地杆菌和假单胞菌根据污泥接种物的理化性质对 MFC 废水处理的发电量的影响,极大地帮助了未来对产电菌的基因作用和杂种优势研究。为了最大化功率密度,Nasrabadi 等^[59]通过使用粒子群优化训练神经网络,对 MFC 系统中的微生物的电导率、外部电阻、阳极表面积、微通道高度和温度进行优化,比从其他研究获得的最大功率密度提高了 46%。目前,通过分析 ANN 的拓扑结构可以对提高 MFC 的参数进行有效筛选和优化,极大地帮助预测 MFC 功率输出的最佳模型。然而,MFC 是一个涉及流体力学、生物电化学反应

动力学、传质和热平衡多物理场耦合的复杂系统,还需要对 ANN 的结构和参数进行大量的训练和深入的研究,以更好地优化 MFC 的系统,提升废水处理及其能源化效率。

3.1.3 基于变压器的 PMS

由于其低功率密度和低输出电压,单个 MFC 在实际应用中的使用受到限制,难以直接为大多数电气负载供电^[60]。通常来说,为了提高电压而串联连接 MFC 可能会导致电压反转,从而导致能量损失和生物膜损坏^[61-62]。因此,需要由 PMS 控制的多个 MFC 同时运行,以提高 MFC 的输出功率,该 PMS 适用于运行具有复杂非线性动力学的生物电化学系统。Nguyen 等^[63]描述了一种新颖的 PMS,使单个 MFC 拥有在线最大功率点(MPP)跟踪和高功率转换效率(高达 85%)。而且,每当 PMS 的电压下降到预定义的阈值以下时,PMS 都会通过将 MFC 与电路断开连接来防止电压反转。在另一项工作^[64]里,研究了用于连接 MFC 和 PMS 的不同配置,以提高电压而不会发生逆转。研究方法的最佳配置如图 3 所示:将单个 PMS 连接到单个 MFC 或并联连接的 MFC(升压电压从小于 0.2 V 增至 3.3 V);然后,几个这样的独立 PMS 串联连接(使用 2 个 PMS 增加到 6.6 V)。有趣的是,串联到 PMS 的活动损失(例如燃料不足),电容器的电压反转发生在串联连接的 PMS 中,而不是在 MFC 中。然而,保护 MFC 免于故障的好处远远超过了这种电压反转的影响。这种方法对于 PMS 和 MFC 作为实际电子设备中的电源的应用可能是有益的。

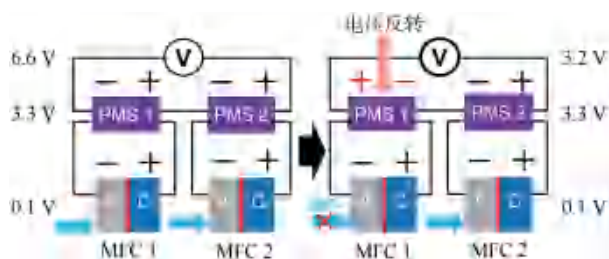


图 3 使用能量收集和电源管理系统提高 MFC 输出电压的最佳配置^[64]

Fig. 3 Optimal Configuration for Increasing MFC Output Voltage by Use of Energy-Harvesting and Power Management Systems^[64]

3.2 MFC 污废水处理及能源化研究展望

MFC 实现污废水处理及其能源化的优势突出,

主要包括能量转化效率高、操作条件温和、资源利用率高且环保,是结合环境保护、能源回收与生态良性循环的多功能耦合的新型可持续污废水处理技术。MFC 目前虽已取得一定的进展,但其在水环境治理及能源化中的应用还存在一些挑战亟需解决,如技术成熟度低,投资成本与产出的不平衡,商业化难度大是限制应用扩大的关键因素,其中投资成本最高的是电极和膜材料,且这些商用材料不能二次使用,造成环境污染和浪费。其次 MFC 产电效率低,且复杂环境中难以将微生物电化学的复杂过程与现有的成像技术结合,电极与细菌之间的相互作用没有被完全了解,导致 MFC 的商业化道路充满挑战。更重要的是,MFC 电能输出小,亟需开发更优的后续能量回收装置。为使 MFC 向实际污废水处理工程化应用方向转化,今后应从 MFC 污废水处理及能源化进行针对性的研究和技术创新方面寻求突破:

(1) 利用天然材料,开发绿色无污染,价格低廉的高性能电极和分隔材料以获得更低的内阻和更高的功率密度;

(2) 在控制成本的条件下,优化 MFC 系统组成部分,利用模拟技术探究污废水处理最佳运行条件,加强与现行污废水处理工艺耦合联用,积极研发新型高效的反应器,进一步扩大 MFC 反应器规模和提高 MFC 的废水处理效率;

(3) 筛选培养高效产电和更强活性的产电微生物,利用模拟技术与现有成像技术结合,研究复杂环境条件下电极与细菌之间的相互作用机制,为 MFC 的实际应用提供指导作用;

(4) 采用微流控技术将 MFC 缩小成芯片大小的系统,使 MFC 具有更低的成本和更高的性能和能量效率,并通过仿真技术探究 MFC 中多场耦合-生物电化学反应动力学、传质、流体动力学和热平衡多个物理场中的相互机制;

(5) 目前 MFC 存在功率密度低、产电不稳定等缺点。此外,其外部电阻能量均以热能形式消耗,使 MFC 产电量无法正常驱动电子器件。考虑 MFC 的能量收集及回收问题,为 MFC 设计包括静态管理系统和动态最大功率点跟踪系统的 PMS,将 MFC 产生的微弱能量进行存储变换,输出稳定的电流驱动负载,以改善上述问题,使 MFC 产生的电力得到进一步利用。

3.3 MFC 助力实现“双碳”目标的意义

MFC 通过其独特的工作原理和环保特性,为实现“双碳”目标提供了重要的技术支持和理论依据,有望在未来的环境保护和能源转型中发挥更加重要的作用,主要体现在以下 3 个方面。

(1)促进低碳技术发展:MFC 作为一种可以将污水中的有机物直接转化为电能的生物电化学系统,不仅减少了对化石燃料的依赖,还能有效减少温室气体排,有助于控制碳排放,推动低碳技术的发展。

(2)推动能源结构转型:MFC 的发展和应用从依赖化石燃料向可再生能源转变,有助于推动能源结构的转型,促进可持续发展,助力“双碳”目标的实现。

(3)提升可再生能源利用效率:MFC 利用污水中的有机物发电,不仅提高了资源的利用率,还有助于减少环境污染。通过这种方式,MFC 可以作为一种可再生能源技术,为实现“双碳”目标提供支持。

综上所述,MFC 作为一种将化学能直接转化为电能的装置,在环境保护和能源利用效率方面具有明显的优势。然而,要实现其在商业领域的广泛应用,还需要克服技术成熟度低、成本和市场竞争力等方面的挑战。随着研究的深入和技术的进步,有理由相信这些难题最终将被解决,从而使 MFC 成为一种重要的可再生能源技术,助力“双碳”目标实现。

4 结论与展望

传统废水处理工艺具有操作程序复杂、能源利用形式单一、容易导致二次污染、有害物质无法全部消除等一系列困难,不能满足国家“双碳”的战略需求。MFC 作为一种同步污废水处理/清洁发电的可再生清洁能源技术,在各领域污废水环境治理中的应用已逐步显现出它独有的环境价值,是减污降碳关键技术之一,可助力持续加快发展方式绿色转型,是实现“碳中和”的实践途径。基于 MFC 在水环境治理及资源化中取得的研究进展,我们有理由相信针对 MFC 现存问题进行深入研究和工艺探索,加快其工业化应用进程,扩大其在污泥处理、生物修复、海水淡化等多个领域的应用,为水环境治理行业及可持续发展能源道路增光添彩。

参考文献

- [1] 马若霞, 杨彬. 我国核电站放射性化学废水的处理工艺[J]. 水污染及处理, 2019, 7(2): 73-76.
MA R X, YANG B. The treatment technology of radioactive chemical wastewater from nuclear power plant in China [J]. Water Pollution and Treatment, 2019, 7(2): 73-76.
- [2] LIU F, LUO Y, HU B. Simultaneous elimination of U(VI) and Eu(III) by phytic acid decorated MXenes@MOFs composites in water: Performance, kinetics and mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 327: 124912. DOI: 10.1016/j.seppur.2023.124912.
- [3] 刘晓星. 日本福岛核废水排海将带来哪些危害? [J]. 中国科技奖励, 2021(4): 72-73.
LIU X X. What harm will the Fukushima nuclear wastewater discharge bring? [J]. China Awards for Science and Technology, 2021(4): 72-73.
- [4] 王明鹏, 廉昺斐, 姜丽敏, 等. 微生物燃料电池技术在环境修复中的研究进展[J]. 曲阜师范大学学报(自然科学版), 2023, 49(4): 113-119.
WANG M P, LIAN B F, JIANG L M, et al. Research progress of microbial fuel cell technology for environmental remediation [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2023, 49(4): 113-119.
- [5] 刘杨, 杨平. 从废水中回收沼气能及氢能与电能[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(10): 133-139.
LIU Y, YANG P. Recovery of biogas energy, hydrogen energy and electric energy from wastewater [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 33(10): 133-139.
- [6] POTTER M C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1911, 84(571): 260-276.
- [7] VERBEELEN T, LEYS N, GANIGUÉ R, et al. Development of nitrogen recycling strategies for bioregenerative life support systems in space [J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 708810. DOI: 10.3389/fmicb.2021.700810.
- [8] PENNISI E. Geobacteria: Microbes use mud to make electricity [J]. Science, 2002, 295(5554): 425-426.
- [9] ZHANG K, MA Z, LI X, et al. Good microbial affinity of phenolic carbon felt as an efficient anode for microbial fuel cells [J]. Bioelectrochemistry, 2021, 138: 107700. DOI: 10.1016/j.bioelechem.2020.107700.
- [10] RETHINASABAPATHY M, LEE J H, ROH K C, et al. Silver grass-derived activated carbon with coexisting micro-, meso- and macropores as excellent bioanodes for microbial colonization and power generation in sustainable microbial fuel cells [J]. Bioresource Technology, 2020, 300: 122646. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.122646.
- [11] DUARTE K D Z, KWON Y. *In situ* carbon felt anode

- modification via codeveloping *Saccharomyces cerevisiae* living-template titanium dioxide nanoclusters in a yeast-based microbial fuel cell [J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 474: 228651. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2020.228651.
- [12] IEROPOULOS I A, YOU J, GAJDA I, et al. A new method for modulation, control and power boosting in microbial fuel cells [J]. *Fuel Cells*, 2018, 18(5): 663–668. DOI: 10.1002/fulce.201800009.
- [13] KHAMIS A, NORDIN N D, MOKHTAR M H. Performance of double chamber microbial fuel cell: Effect of waste water, electrode thickness and distance [J]. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 2020, 20(2): 619–626.
- [14] ZHANG T, CHEN Y, LI Y, et al. Investigating the effect of anode materials on the performance and microbial community in an integrated chamber-free microbial fuel cell [J]. *Fuel*, 2024, 357: 129648. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.129648.
- [15] CHEN J, YANG J, ZHAO Y, et al. Research progress in the application of metal organic frameworks and its complex in microbial fuel cells: Present status, opportunities, future directions and prospects [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(62): 23956–23966.
- [16] ZHANG J, XIA Z, DAI L. Carbon-based electrocatalysts for advanced energy conversion and storage [J]. *Science Advances*, 2015, 1(7): 1500564. DOI: 10.1126/sciadv.1500564.
- [17] LUO J, YANG J, HE H, et al. A new electrochemically active bacterium phylogenetically related to *Tolumonas osonensis* and power performance in MFCs [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 139: 141–148. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.04.031.
- [18] 孙玉凤, 宋晗. 生物反硝化处理硝酸盐氮废水及影响因素研究 [J]. *清洗世界*, 2021, 37(9): 4–7.
- SUN Y F, SONG H. Study on biological denitrification treatment of nitrate nitrogen wastewater and its influencing factors [J]. *Cleaning World*, 2021, 37(9): 4–7.
- [19] 狄斐, 隋倩雯, 高超龙, 等. 反硝化除磷工艺实现亚硝酸盐积累的参数优化 [J]. *中国环境科学*, 2022, 42(6): 2647–2655.
- DI F, SUI Q W, GAO C L, et al. Parameter optimization for the achievement of nitrite accumulation by denitrifying phosphorus removal process [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(6): 2647–2655.
- [20] 赵军令, 韩艳兴, 马卫平, 等. 废水生物脱氮新技术研究综述 [J]. *河南科技*, 2010(3): 74–75.
- ZHAO J L, HAN Y X, MA W P, et al. Review on new technologies of biological nitrogen removal from wastewater [J]. *Henan Science and Technology*, 2010(3): 74–75.
- [21] XU X, CHEN C, LEE D J, et al. Sulfate-reduction, sulfide-oxidation and elemental sulfur bioreduction process: Modeling and experimental validation [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 147(11): 202–211.
- [22] 唐涛涛, 李江, 杨钊, 等. 多环芳烃生物降解及转化途径的研究进展 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2019, 35(2): 403–413.
- TANG T T, LI J, YANG Z, et al. Research progress on biodegradation and transformation pathways of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing)*, 2019, 35(2): 403–413.
- [23] 吴朵而, 陈龙, 马香娟, 等. 基于电活性微生物的芳香类污染物转化机制研究进展 [J]. *微生物学报*, 2023, 63(1): 30–44.
- WU D E, CHEN L, MA X J, et al. Transformation mechanism of aromatic hydrocarbon pollutants based on electroactive microorganisms [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2023, 63(1): 30–44.
- [24] 闵军, 陈卫卫, 李俊德, 等. 微生物降解硝基芳烃及其卤代衍生物的研究进展 [J]. *微生物学报*, 2020, 60(12): 2816–2835.
- MIN J, CHEN W W, LI J D, et al. Microbial degradation of nitroaromatics and their halogenated derivatives [J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, 60(12): 2816–2835.
- [25] 王彬浩, 关晓彤, 颜庆云, 等. 含氟有机废水处理过程活性污泥微生物群落研究进展 [J]. *微生物学通报*, 2019, 46(8): 2020–2037.
- WANG B H, GUAN X T, YAN Q Y, et al. Research progresses of activated sludge microbial communities in fluorine-containing organic wastewater treatment processes [J]. *Microbiology China*, 2019, 46(8): 2020–2037.
- [26] WANG L. Research progress on the effect of heavy metal ions on cathode performance of microbial fuel cells [J]. *Advances in Environmental Protection*, 2020, 10(6): 799–806.
- [27] WANG H, ZHAI P, LONG X, et al. Research progress on using biological cathodes in microbial fuel cells for the treatment of wastewater containing heavy metals [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2023, 14: 1270431. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1270431.
- [28] 陶虎春, 倪晋仁, 易丹, 等. 微生物燃料电池与传统厌氧消化处理人工废水的比较 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 2008(1): 23–28.
- TAO H C, NI J R, YI D, et al. Comparison of artificial wastewater treatment between microbial fuel cell reactor and conventional anaerobic digester [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2008(1): 23–28.
- [29] 赵磊. 微生物燃料电池技术与光催化技术应用于废水处理的初步研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- ZHAO L. Preliminary study on the application of microbial fuel cell technology and photocatalysis technology to wastewater treatment [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [30] 巴登 S. A. 海洋污染和海洋生物资源 [M]. 北京: 海洋出版

- 社, 1991.
- BA D S A. Marine pollution and marine living resources [M]. Beijing: Maritime Press, 1991.
- [31] 刘敏, 于欣, 王磊, 等. 微生物脱盐燃料电池的产电-脱盐研究[J]. 广东化工, 2019, 46(13): 256-259.
- LIU M, YU X, WANG L, et al. Study on electricity generation-desalination of microbial desalination fuel cell [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(13): 256-259.
- [32] ZHAN X, CHEN Z, ZHAO P. Rapid remediation of nitrate pollution of groundwater [J]. Journal of Coastal Research, 2019, 97: 71-81. DOI: 10.2112/si97-009.1.
- [33] XIA C, XU M, LIU J, et al. Sediment microbial fuel cell prefers to degrade organic chemicals with higher polarity [J]. Bioresource Technology, 2015, 190: 420-423. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.072.
- [34] YAN Z, SONG N, CAI H, et al. Enhanced degradation of phenanthrene and pyrene in freshwater sediments by combined employment of sediment microbial fuel cell and amorphous ferric hydroxide [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 199: 217-225. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.10.087.
- [35] BROCK A L, KOSTADINOVA K, MØRK-PEDERSEN E, et al. Remediation of marine dead zones by enhancing microbial sulfide oxidation using electrodes [J]. Marine Pollution Bulletin, 2023, 193: 115142. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2023.115142.
- [36] LIU F F, LU T, ZHANG Y X. Performance assessment of constructed wetland-microbial fuel cell for treatment of mariculture wastewater containing heavy metals [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 168: 633-641. DOI: 10.1016/j.psep.2022.10.026.
- [37] 佟伟. 微生物燃料电池技术处理船舶舱底油污水及其产电性能[D]. 济南: 山东交通学院, 2022.
- TONG W. Treatment of bilge water from ships by microbial fuel cell technology and its electrical performance [D]. Jinan: Shandong Jiaotong University, 2022.
- [38] 岳林炜. “日本不能再污染海洋、污染地球了” [N]. 人民日报, 2022-07-27(15).
- YUE L W. "Japan can no longer pollute the oceans and pollute the earth" [N]. People's Daily, 2022-07-27(15).
- [39] VIJAY A, KHANDELWAL A, CNHABRA M, et al. Microbial fuel cell for simultaneous removal of uranium (VI) and nitrate [J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 388: 124157. DOI: 10.1016/j.cej.2020.124157.
- [40] MACASKIE L, EMPSON R, CHEETHAM A, et al. Uranium bioaccumulation by a *Citrobacter sp.* as a result of enzymically mediated growth of polycrystalline HUO_2PO_4 [J]. Science, 1992, 257(5071): 782-784.
- [41] 黄梓良, 付国楷, 杨丽丽, 等. 微生物燃料电池中硫代谢的研究进展[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(12): 47-54.
- HUANG Z L, FU G K, YANG L L, et al. Research progress of sulfur metabolism in microbial fuel cells [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(12): 47-54.
- [42] SURANSH J, JADHAV D A, NGUYEN D D, et al. Scalable architecture of low-cost household microbial fuel cell for domestic wastewater treatment and simultaneous energy recovery [J]. Science of the Total Environment, 2023, 857: 159671. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2022.159671.
- [43] ALMATOUQ A, AHMED M E, KHAJAH M, et al. Performance of tubular microbial fuel cells using different industrial wastewater [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 55: 104166. DOI: 10.1016/j.jwpe.2023.104166.
- [44] 唐俊利, 马冠生, 李剑虹, 等. 山东省成年居民 24 h 尿量的调查分析 [J]. 中国慢性病预防与控制, 2015, 23(11): 842-844.
- TANG J L, MA G S, LI J H, et al. Investigation and analysis of 24 h urine volume of adult residents in Shandong Province [J]. Chinese Journal of Prevention and Control of Chronic Diseases, 2015, 23(11): 842-844.
- [45] YANG N, LIU H, JIN X C, et al. One-pot degradation of urine wastewater by combining simultaneous halophilic nitrification and aerobic denitrification in air-exposed biocathode microbial fuel cells (AEB-MFCs) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 748: 141379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141379.
- [46] KUNTKE P, SMIECH K M, BRUNING H, et al. Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell [J]. Water Research, 2012, 46(8): 2627-2636.
- [47] NAYAK S, SEVDA S. Urine based bioelectrochemical system: Resources recovery and domestic wastewater treatment prospectives [J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 20: 101257. DOI: 10.1016/j.biteb.2022.101257.
- [48] CARTER L, TOBIAS B, OROZCO N. Status of ISS water management and recovery [C]. Saint Paul: Proceedings of the 42nd International Conference on Environmental Systems, 2012.
- [49] MATSENA M, CHIRWA E M N. Biofuels and bioenergy-opportunities and challenges [M]. Netherlands: Elsevier, 2021.
- [50] WU C, ALMUAALEMI H Y M, SOHAN A S M M F, et al. Effect of flow velocity on laminar flow in microfluidic chips [J]. Micromachines, 2023, 14(7): 1277. DOI: 10.3390/mi14071277.
- [51] ZHAO B, MO F, WU W, et al. Deformation patterns and coordination mechanisms of cross-size microchannels during thermocompression bonding process [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 26: 3701-3709. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.08.141.
- [52] XU X, XU N, ZHANG W, et al. Mass transfer mechanism and relationship of gas-liquid annular flow in a microfluidic cross-junction device [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2023, 64(12): 37-48.

(下转第 147 页)

- WU Y C, DING X, YANG L W, et al. Evaluation of drainage system capacity and waterlogging risk in Xianyang City of Shaanxi Province based on InfoWorks ICM model[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2020, 42(4): 552–559.
- [7] ZHOU Q Q, LUO J H, QIN Z, et al. Conceptual planning approach of low impact developments for combined water quality-quantity control at an urban scale: A case study in Southern China[J]. *Journal of Flood Risk Management*, 15(1): e12760. DOI: 10.1111/jfr3.12760.
- [8] 高超. 牡丹江城市排水系统评估与防涝规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- GAO C. Research on assessment of urban drainage system and planning of waterlogging prevention in Mudanjiang City [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [9] 罗鸣, 叶兴成, 王以超, 等. 河道边界水位对管道排水能力的影响分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2018, 29(3): 169–174.
- LUO M, YE X C, WANG Y C, et al. Impact analysis of river boundary water level on drainage capacity of pipeline [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2018, 29(3): 169–174.

(上接第 38 页)

- [53] OUYANG T, LIU W, SHI X, et al. Multi-criteria assessment and triple-objective optimization of a bio-anode microfluidic microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2023, 382: 129193. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.129193.
- [54] MA F, YIN Y, PANG S, et al. A data-driven based framework of model optimization and neural network modeling for microbial fuel cells[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 162036–162049. DOI: 10.1109/access.2019.2951943.
- [55] FENG Y, BARR W, HARPER W F, JR. Neural network processing of microbial fuel cell signals for the identification of chemicals present in water [J]. *Journal of Environmental Management*, 2013, 120: 84–92. DOI: 10.1016/j.jenvman.2013.01.018.
- [56] KING S T, SYLVANDER M, KHEPERU M, et al. Detecting recalcitrant organic chemicals in water with microbial fuel cells and artificial neural networks [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 497: 527 – 533. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.108.
- [57] RAMON-FERNANDEZ A D, SALAR-GARCIA M J, FERNANDEZ D R, et al. Evaluation of artificial neural network algorithms for predicting the effect of the urine flow rate on the power performance of microbial fuel cells[J]. *Energy*, 2020, 213: 118806. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118806.
- [58] LIM C E, CHEW C L, PAN G T, et al. Predicting microbial fuel cell biofilm communities and power generation from wastewaters with artificial neural network [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 52: 1052 – 1064. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.08.290.
- [59] NASRABADI A M, MOGHIMI M. Energy analysis and optimization of a biosensor-based microfluidic microbial fuel cell using both genetic algorithm and neural network PSO [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(7): 4854–4867. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2021.11.125.
- [60] KIM Y, HATZELL M C, HUTCHINSON A J, et al. Capturing power at higher voltages from arrays of microbial fuel cells without voltage reversal[J]. *Energy & Environmental Science*, 2011, 4(11): 4662–4667.
- [61] LEDEZMA P, GREENMAN J, IEROPOULOS I. MFC-cascade stacks maximise COD reduction and avoid voltage reversal under adverse conditions [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 134: 158–165. DOI: 10.1016/j.biortech.2013.01.119.
- [62] GURUNG A, KIM J, JUNG S, et al. Effects of substrate concentrations on performance of serially connected microbial fuel cells (MFCs) operated in a continuous mode[J]. *Biotechnology Letters*, 2012, 34(10): 1833–1839.
- [63] NGUYEN C, TARTAKOVSKY B, WOODWARD L. Harvesting energy from multiple microbial fuel cells with a high-conversion efficiency power management system[J]. *ACS Omega*, 2019, 4(21): 18978–18986.
- [64] KIM T, YEO J, YANG Y, et al. Boosting voltage without electrochemical degradation using energy-harvesting circuits and power management system-coupled multiple microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2019, 410: 171–178. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2018.11.010.