

电化学强化水污染治理中羧甲基纤维素应用的研究进展

董跃^{1,2}, 喻纪猛², 隋明锐³, 蒋奕颖², 吴佳欣³, 杨雨茗², 李一平^{1,2}

(1. 河海大学浅水湖泊综合治理与资源开发教育部重点实验室, 江苏南京 210098;
2. 河海大学环境学院, 江苏南京 210098; 3. 河海大学水利水电学院, 江苏南京 210098)

摘要:综述了电化学强化技术(EST)作为以微生物为催化剂进行水污染治理和能源回收的环境友好型水处理技术的研究进展;分析了羧甲基纤维素(CMC)利用丰富的羟基、羧基、羧甲基等基团与碳基、金属/金属氧化物等多种材料复合应用于EST中净水的可行性,发现CMC材料有利于提高EST的能量产率和稳定性;深入讨论了CMC材料在EST中进行污水治理的多种应用,包括作为黏结剂、分散剂、吸附剂等形式。未来应该重点从机理、方法、技术和应用4个角度对基于CMC材料的EST在水污染治理领域的应用进行研究。

关键词:水污染治理;水处理技术;电化学强化技术;羧甲基纤维素

中图分类号:X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2024)05-0148-10

Research progress of application of carboxymethyl cellulose in electrochemical strengthening water pollution treatment //DONG Yue^{1,2}, YU Jimeng², SUI Mingrui³, JIANG Yiyang², WU Jiaxin³, YANG Yuming², LI Yiping^{1,2}

(1. Key Laboratory of Integrated Regulation and Resource Development on Shallow Lake, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Environment, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The research progress of electrochemical strengthening technology (EST) as an environmentally friendly water treatment technology, which uses microorganisms as catalysts for water pollution treatment and energy recovery was reviewed. The feasibility of utilizing carboxymethyl cellulose (CMC), with its rich hydroxyl, carboxyl, carboxymethyl, and other groups, in combination with carbon-based materials, metals/metal oxides, and other materials for water purification in EST was analyzed. It is found that CMC material is conducive to improving the energy yield and stability of EST. In-depth discussions were held on various application of using CMC materials for wastewater treatment in EST, including their use as binders, dispersants, adsorbents, and other forms. In the future, it is essential to focus on the application of CMC-based EST in the field of water pollution treatment from four perspectives of mechanism, method, technology, and application.

Key words: water pollution treatment; water treatment technology; electrochemical strengthening technique; carboxymethyl cellulose

2021年,《Science》杂志再次发布了全球最前沿的125个科学问题,其中污染物可持续处理问题受到广泛关注,这是因为化石燃料枯竭^[1]、水资源短缺^[2]和环境污染^[3]等多重挑战迫使人们积极寻求解决方案^[4]。在此背景下,创新资源循环利用技术成为解决能源^[5]、生态^[6]、环境^[7]等热点问题的关键。电化学强化技术(electrochemical strengthening technique, EST)通过微生物催化多种电化学反应来处理污水^[8]。理论上,EST解决水污染的同时能实现

能源的捕获与利用,成为最有前景的水处理方法之一,然而,其应用仍受到构造材料性能与成本的限制^[9]。因此,有必要寻求性能更为优异的新型材料来增强EST的除废产能。羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)是纤维素引入羧甲基的水溶性衍生物^[10],具有良好的混凝特性、三维多孔结构以及易改性等优点^[11]。同时,CMC丰富的羟基、羧基等基团可使其与其他生物聚合物、合成聚合物、盐等物质复合形成交联性水处理材料^[12],由于其较好的化

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(B210201047, B230201024);国家自然科学基金项目(51909067, 51909065)

作者简介:董跃(1989—),男,副教授,博士,主要从事生物电化学系统研究。E-mail: dongyuehit@163.com

通信作者:隋明锐(1988—),女,副教授,博士,主要从事污水能源化与资源化研究。E-mail: suimingruihit@163.com

学稳定性和生物相容性而被广泛应用为高性能 EST 材料。CMC 及其复合材料不仅赋予 EST 组件吸附、供能、分散等功能,还有助于其内微生物高效产生和转移电子,从而极大地提高 EST 的除污产能效率。

本文拟介绍 EST 的水处理机理、现状及对新型 CMC 材料的需求,简述 CMC 的特点和复合的基本原理,概括各类 CMC 材料及其改善 EST 性能的突出性水处理策略。此外,还将对 CMC 材料的发展趋势及其在水处理领域的应用前景进行分析和展望,以期为进一步设计和开发高性能水处理 EST 提供新的思路和指导。

1 EST 及其电极材料

1.1 EST

EST 为交叉学科型水处理技术,以微生物为强化主体,将其转化的电子与传统电化学相结合,从而实现产电或得到高附加值产物的同时治理水污染^[13-14]。EST 致力于运用电活性微生物氧化分解水中有机污染物,将产生的电子传递到阳极,再由外电路到阴极还原氧化态物质^[15-16]。EST 也是环境友好型水污染治理技术,具有能耗低、产泥少、除污强等优点,在提高污水处理效率与能源回收能力方面展现了巨大的潜力^[17]。EST 根据供电形式分为微生物燃料电池(microbial fuel cell, MFC)和微生物电解池(microbial electrolysis cell, MEC),均由电极、微生物、底物、膜和外电路等构成^[18]。但无论是 MFC 还是 MEC 都存在构型上的局限,无法在水处理领域大规模推广与使用^[19],从材料上革新是解决该问题的重要途径之一。

1.2 电极材料

EST 的研究往往集中在与微生物直接接触的电极材料上,其与整个装置电子传递、内阻以及净水效率息息相关^[20]。现有电极材料常为碳布、碳纸、石墨棒等碳基材料以及不锈钢、铂涂层、钛涂层等金属基材料^[21]。近年来,成本低、比表面积大、传质效率高的天然材料、改性材料也投入了研究之中^[22]。但上述常规材料仍存在着生物亲和性低、质子传递效率低、结构稳定性差等缺陷。通过多种材料进行结合形成新型复合材料能有效提升生物相容性、导电性能等特性^[22],其中,将多功能性 CMC 与其他材料复合能够显著提升 EST 的净水产能性能。CMC 材料不仅具有良好的生物亲和性、导电性、稳定性等优点,而且能制备成 EST 各部分组件,进一步提升 EST 综合效能。

2 CMC 材料的理化性质

2.1 原料来源与制备流程

可从棉花、木材等植物中提取天然纤维素^[23],利用羧甲基取代纤维素中葡萄糖分子上的羟基氢,进而获得 CMC。最常用的生产原料为各类精制纤维素,包括棉、木薯、稻草等纤维^[24]。众多农业副产品,纺织工业的废料以及家居和办公用品也可合成商业 CMC,常见合成 CMC 的原料成分占比见表 1^[25-34]。经典的 Williamson 醚合成法中,纤维素在碱性环境中发生碱化反应,生成碱纤维素,再与氯乙酸发生醚化反应生成 CMC。然而,该方法常伴随有副反应,导致产量与取代度降低^[35],目前国内外主要采用水媒法和溶媒法合成 CMC^[36]。

表 1 合成 CMC 的原材料成分

Table 1 Raw material component for synthesis of CMC

原材料	成分占比/%			参考文献
	纤维素	木质素	半纤维素	
棉花	87.5	2.0	16.5	[25]
云杉	43.0	29.4	27.6	[26]
杨树	49.0	24.0	20.0	[27]
稻壳	36.0	17.3	24.1	[28]
麦秸	39.2	26.3	17.2	[29]
玉米秸秆	42.7	23.2	17.5	[29]
玉米叶	26.8	24.8	13.2	[28]
竹子	39.4	31.1	20.6	[28]
茶叶废料	31.2	22.8	40.3	[26]
橘子皮	12.0	6.0	5.5	[27]
甘蔗渣	38.3	30.9	22.4	[28]
松木	46.4	8.8	29.4	[30]
办公室用纸	68.6	12.4	11.3	[30]
轧棉机垃圾	20.0	4.6	17.6	[31]
报纸	64.4	4.6	20.0	[31]
小麦	31.1	27.6	3.4	[32]
芦苇	35.0	26.5	21.0	[33]
麻	73.5	15.0	7.5	[34]
亚麻	70.0	19.6	3.0	[25]
黄麻	54.0	17.0	18.5	[34]

2.2 CMC 理化性质及应用领域

CMC 属阴离子型纤维素醚类,为呈白色或微黄色的粉末、絮状,无嗅、无味、无毒,在吸水后能够膨胀并溶解成黏性透明胶体,故具有良好的吸湿性、水溶性等物理特性^[37]。CMC 为纤维素羧甲基化的水溶性衍生物,因此其化学反应类似于纤维素^[38]。然而,由于羧甲基的空间体积比氢原子大,CMC 具有一些不同于纤维素的特殊性质。

CMC 中亲水性羧甲基基团易在水中发生电离,使其有良好的水溶性和化学反应性^[39]。不仅产生静电斥力提高了吸水性,而且改善了其与阳离子的亲和力,更容易通过共价键或氢键与各类材料相连^[40],产生稳定的相互作用力,特别是对氧化还原

体系的黏结力较强。因此,CMC 具有较好的黏结性,能够有效去除污水中的阳离子污染物。

CMC 中大量的羧基和羟基能以氢键相连构成空间网状结构^[41],不仅可作为模板来引导无机粒子的生长,更好地捕获水中污染物质^[42],还能保证无机粒子均匀稳定分散以及发挥净水效用。同时,CMC 较好的吸水能力和结构稳定性有利于细胞排列、增殖与分化以及微生物的定殖^[43]。另外,CMC 易被微生物降解利用,促进共代谢和降解水中有机污染物^[44],可作为基体物强化废水中的净水剂。

CMC 羧甲基基团可产生静电作用,增强对废水中金属离子的吸附能力并提升固化效率^[45]。另一方面,CMC 羟基和葡萄糖苷基能作为高活性配位基

团,可与污水中的重金属离子配位生成纤维素羧乙酸金属盐^[46],起到絮凝、还原等作用^[47]。另外,不仅 CMC 羟基能对印染废水中染料分子产生静电吸引,而且羧基可提供大量结合位点来螯合辅助吸附^[48],可作为吸附剂吸附废水中的污染物。

综上,CMC 分子链上众多羧基、羟基、羧甲基等基团提供了大量的化学修饰位点,已被广泛用于食品健康、生物医学与电化学领域^[49-60](表 2)。同时,CMC 可引入各种化学基团实现复合材料的功能化,使其在 EST 水污染治理中的应用更加科学化、经济化、系统化。

CMC 具备优异的溶解性、分散性、黏结性^[61],已应用在食品、纺织、医药等领域,图 1 为目前 CMC

表 2 CMC 的应用及效果

Table 2 Application and effect of CMC

复合材料名称	用途	机理	应用领域	提升效果	参考文献
CMC/PPy 水凝胶电极	黏结剂	①②③	柔性超级电容器	高拉伸性、高导电率、高比电容	[49]
Si@ CMC-DOP 电极	黏结剂	②	硅电极	初始比容量高、密封性好	[50]
CMC-PANI/PEI/PAAM	分散剂	②④⑤	柔性超级电容器	高比电容、高功率密度	[51]
CMC-S-nZVI	分散剂	④⑤⑦	修复地下水中硝基苯	硝基苯降解率高、可重复利用	[52]
AgNCs/CMC 复合膜	骨架材料	⑤⑥⑦	纳米复合材料	电化学和荧光检测 Cu ²⁺ 能力强	[53]
CMC-GA (CG-ANC. P)膜	骨架材料	②④⑤	敏感智能指示包装	抗氧化能力强、可识别性好	[54]
CMC-PAMAM-Ag 水凝胶	催化剂	⑨	还原水中 4-硝基苯酚	反应速率快、循环稳定性良好	[55]
ZnS@ sPL//Fe ₃ O ₄ @ CMC 水分散胶体纳米复合物	催化剂	④⑥⑩	去除水中污染物、病菌	光催化降解能力强、易于磁回收	[56]
CMC/PEI 双网水凝胶	吸附剂	③④⑥⑦	去除废水中 Cr(VI)	Cr(VI)吸附力高、循环稳定性良好	[57]
CMC/GAs 复合气凝胶珠	吸附剂	②④⑥⑧	去除水体中亚甲基蓝	粒径和孔径较为均一、吸附性好	[58]
CMC-nFe 与微生物体系	底物	④⑤⑦⑩	去除水中 Cr(VI)	Cr(VI)去除率较好、去除速度快	[59]
CMC 作为 MFC 底物	底物	⑦⑧⑩⑪	微生物电化学系统	电压提高、酶+CMC 降解性好	[60]

注:①黏合疏水作用;②氢键和电荷相互作用;③物理作用力;④静电作用;⑤分子间作用;⑥配位作用;⑦氧化还原作用;⑧共聚交联作用;⑨骨架支撑作用;⑩稳定作用;⑪供能物质。

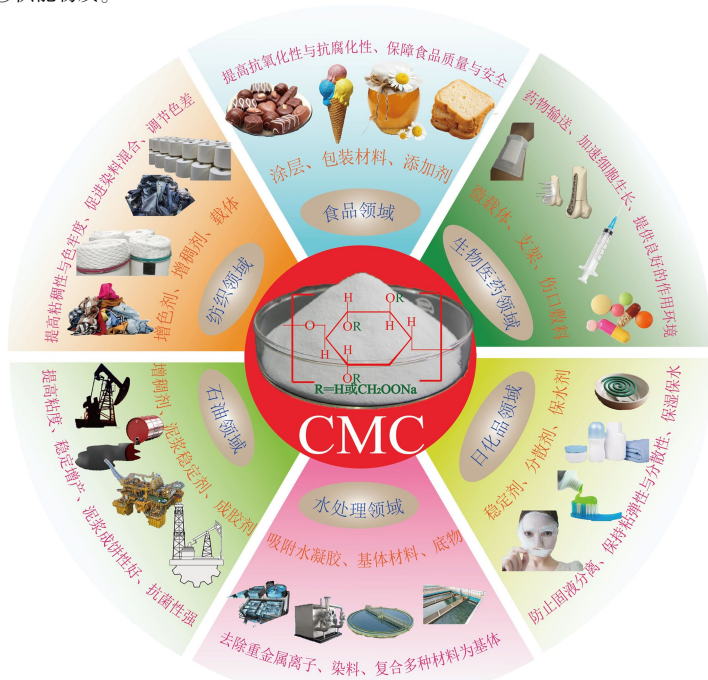


图 1 CMC 应用领域

Fig. 1 CMC Application fields

的主要应用领域。CMC 在水处理行业中既能接枝改性为安全无毒、可生物降解的天然高分子净水絮凝剂,又能作为污水处理厂污泥的调节剂,提高滤饼的固体含量并减少处理成本,还能与其他材料复合,制备出更适用于水处理领域的吸附、固定、分离等功能性材料。

3 CMC 材料在 EST 水污染治理中的应用

在 EST 中,常规碳基材料与金属材料存在非生物相容性、易腐蚀以及成本高等问题难以持久性处理污水^[62]。通过 CMC 进行复合改性,可以显著改善常规材料的性能并降低成本,从而最大化水污染治理效益^[41]。此外,CMC 具有广泛的来源和生物友好的特点,可以发生氧化、酯化和醚化等多种反应,可利用功能性 CMC 材料构建性能优越、绿色高效的 EST 水污染治理技术。

3.1 提高 EST 水污染治理中电极的黏结性能

MFC 被视作绿色低碳可持续的 EST,利用微生物来处理污水并回收电能^[63]。为提高 MFC 的输出功率,采用电容性复合阳极优化微生物附着、促进电子传递、强化充放电等性能^[64]。CMC 为水性黏结剂,黏结可靠、成本低廉、环保安全,能够有效黏结成电容性复合阳极。聚吡咯(polypyrrole, PPy)具有高存储容量、高导电性和氧化还原性,其侧链存在大量的 α - β' 偶联会降低其电化学稳定性^[65-66]。Wang 等^[67]以 PPy-CMC-TiN/CB(碳刷)作为 MFC 阳极,通过 CMC 复合 TiN 成功弥补了 PPy 低稳定性和低溶解度的缺陷,不仅增加了电极的三维结构稳定性,而且 CMC 能促进电活性微生物附着生长,增强电子转移速率和电荷利用率。最终使得 MFC 的最大功率密度(14.11W/m³)比空白碳刷阳极增加 4.72 倍。Wang 等^[67]采用 PPy-CMC 包覆黏结氮掺杂碳纳米管(carbon nano tube, CNT)/海绵(sponge, S)为 MFC 阳极。CMC 不仅能保护和稳定 PPy 层,增大比表面积并抑制容量衰减,便于电子的快速输送,还能降低表面电化学反应的难度。而且,CMC 能增加微生物数量并增强细胞的电化学活性,从而加速阳极表面与微生物之间的电子转移。经测试 PPy-CMC/N-CNT/S 比 PPy/N-CNT/S 和 N-CNT/S 的最大功率密度分别高 1.34 倍和 1.71 倍。

3.2 提高 EST 水污染治理中电子的传递效率

CMC 复合多种材料形成网络结构能促使无机粒子均匀分布并提供了更多的电子传递途径,应用于 EST 电极可有效提高电子传递效率。陈静^[68]混合 CMC 与石墨烯修饰铜片为阴极,不锈钢网为阳极构建了双室 MFC。CMC 作为石墨烯的导电增强剂,

稳定其导电结构并避免团聚,使阴极附着有分布均匀的小颗粒石墨烯,增加了电子传递位点并提高了电子转移速率,从而使 MFC 最大功率密度达到未修饰的 4.33 倍。进一步,陈静^[68]将该 CMC 复合石墨烯铜片作为阳极,CMC 使阳极聚集更多的电活性细菌,更好地促进了微生物与电极之间的电子传递过程,极大地降低了 MFC 内阻,最终 MFC 最大功率密度为铜片阳极的 17 倍。此外,CMC 材料作为 EST 阳极能增强生物相容性,促进电子在微生物与阳极间的传递。Christwardana 等^[69]用卡拉胶在碳毡表面捕获纤维素作为阳极结构,亲水性阳极中纤维素与微生物之间的弱键或相互作用使更多的微生物黏附并形成生物膜,降低了电极表面电阻率,从而有利于细胞外电子的转移活性。并且纤维素提供了羧基,增强了微生物与阳极间的直接电子转移。不仅使得微生物膜重为 90 mg,而且 MFC 功率密度为 70.98 mW/m² 远高于普通碳毡 MFC。同时,CMC 作为纤维素的亲水性衍生物同样具有大量羧基,也可作为复合阳极中电活性微生物的支持介质,发挥良好的电导率和亲水性,极大地促进 EST 中电子的传递。

3.3 提高 EST 水污染治理中隔膜的质子扩散能力

典型双室 MFC 中质子交换膜(proton exchange membrane, PEM)是决定质子在两极间转移的关键组件^[70],也是影响废水处理效率的关键因素。合成聚合物 PEM(如 Nafion 膜)的机械性能和质子导电性良好^[71],但成本高、不环保、渗透性差以及长时间运行易导致膜污染限制了其在水处理方面的应用^[72]。因此,成本低且稳定性较高的天然聚合物 PEM 备受关注。然而,由于其质子传导性较差,需改性复合或引入质子导体增强效能。Terbish 等^[73]以壳聚糖(chitosan, Cs)与 CMC、海藻酸盐和聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)混合,制备可生物降解的 CMC 共混膜。然而,Cs/CMC 在达到最高电压后立即显著性下降,虽不适用于 MFC 中持续性处理污水,但仍为 CMC 材料在水处理中的应用做出了尝试。另一项研究中,Mahmoud 等^[74]制备了新型聚电解质杂化膜,以 CMC 和 PVA 为基体,具备无毒、可生物降解等特性。与丙烯酰胺混合后提升了离子电导率,形成 NH⁺促进质子在膜上的运输。进一步加入羧基化碳纳米管和磺化活性炭,提高了质子运输和电化学性能。Son 等^[75]制备了 CMC/GCCs(GO 均匀分散 CNTs 构成 GCCs 配合物)纳米复合膜。CMC 与 GO 片中含氧官能团的氢键作用以及 CMC、GO 与 CNTs 表面之间均匀且强烈的 π - π 相互作用,使得复合膜的抗拉强度和杨氏模量分别比纯

CMC 膜提高了约 121% 和 122%。进一步地, Ampaiwong 等^[76]采用硼氢化钠作为化学还原剂制备了 CMC/rGO 薄膜,降低了 CMC 膜的水溶性(达 98%)并提高了其抗拉强度(达 15%)和弹性模量(达 32%)。

3.4 提高 EST 水污染治理中电极区的催化活性

阴极嵌入沉积物中的单介质沉积物微生物燃料电池(sediment microbial fuel cell, SMFC)可利用微生物的催化作用高效降解有机污染物同时去除铜离子。然而,高浓度的铜离子严重限制了微生物的催化效果。因此, Liu 等^[77]在 SMFC 阳极区添加了 CMC 固载耐铜菌微珠,其含有的耐铜菌能够通过生物催化氧化作用将有机污染物转化为小分子物质并为铜离子提供电子促进沉降。同时,微珠中 CMC 可作为共底物增强耐铜菌的催化活性,保护耐铜菌催化性不受高浓度铜离子的影响。此外,CMC 有助于促进多种铜转运蛋白的产生、生物膜的形成和 SMFC 内阻的减低。最终使得该 EST 对有机污染物和铜离子去除率分别达到未添加微珠时的 1.48 ~ 1.65 倍和 1.15 倍。

CMC 还可以作为金属氧化物纳米复合催化材料的载体。Mahmoud 等^[78]制备了纳米复合微球 CMC/CuO-TiO₂,其对硝基苯酚、甲基橙、伊红黄和 K₃[Fe(CN)₆]均表现出优异的催化活性。Helmiyati 等^[79]固定铜纳米粒子形成 Fe₃O₄@SA-CMC-CuNP 催化剂。CMC 内部网络结构复合后形成了联合支撑的多孔结构,促进了活性位点和硝基酚之间的相互作用。可在 NaBH₄ 存在的情况下将 95.0% 的 4-硝基苯酚还原,并且可循环使用多达 5 次而结构稳定不损失任何活性。另外,CMC 能增强水体中净水催化剂的催化活性。Gao 等^[80]以 CMC-Fe₃O₄/BC 为催化剂,其中 CMC 能够稳定 Fe—O 键使得 Fe₃O₄ 颗粒之间产生空间位阻和静电斥力,更多地在 BC 表面均匀分布。此外,CMC 包覆 Fe₃O₄ 能够牢固负载在 BC 上并构成 C=O 键,在催化氧化 H₂O₂ 等电子转移中发挥重要作用,产生更多的 ·OH,促进水中萘的降解。并且 CMC 的加入使萘降解为结构简单的羧酸和脂肪族降解中间体,使得萘氧化降解过程中具有更好的电子转移效率,持续激活 H₂O₂ 来触发芬顿反应得到 1440 min 近 100% 水中萘的去除率。

3.5 提高 EST 水污染治理中极区的吸附活性

EST 耦合 CMC 材料的电化学吸附作用对极区水体中微生物产生积极效应,将使水体更稳定清洁。Yang 等^[81]设计了导电聚合物修饰碳化 CMC 的阳极,具有更好的生物相容性和更大的电化学活性面

积,吸附了大量电活性微生物定殖。并且 CMC 材料中的官能团、表面电荷和亲水性决定了静电吸引、表面相互作用,促进了电活性生物膜的附着,并加快了细胞外电子转移中快速电子转移的比例,从而提高了 EST 处理废水的吸附降解性能和功率输出。此外,CMC 材料对 EST 极区中的染料与重金属离子同样具有良好的电化学吸附能力。EST 中 CMC 材料为提高染料分子的吸附和生物降解提供了新途径, Vuong 等^[82]利用 CMC 包封纳米零价铁,其作为电子源能有效地吸附还原刚果红染料分子中的发色团(-N=N-)为 N—H 键。并且 CMC 的三维网状结构可形成孔洞截留污染物和定殖微生物,还能产生静电相互作用和氢键吸附染料分子和电负性微生物。因此,显著提高了电子转移效率,从而极大地提高 EST 处理染料的性能。CMC 材料富含的羟基、羧基等表面活性基团对重金属具有显著的吸附性能。Xi 等^[83]制备 CMC 稳定 FeS@胞外聚合物去除水中 Cr(VI),使其具有更大的表面积和更多的吸附位点。CMC 和胞外聚合物的高比表面积和大量官能团不仅为水中 Cr(VI)提供吸附位点,而且具有极好的吸附络合性能。此外,其良好的生物亲和性有助于吸附电活性微生物并促进 EST 中的电子转移,最终能够去除水体中近 98% 的 Cr(VI)。

3.6 提高 EST 水污染治理中底物的协同脱除能力

理论上凡是可被微生物降解的有机物均可作为 EST 水处理的原料^[84]。Manzoor 等^[85]通过水解 CMC 为 EST 碳源,通过不同微生物物种之间的协同作用进行 CMC 和有机污染物的利用。CMC 提供碳源和能量,增加了微生物的群落多样性,从而优化电活性微生物的共代谢途径产生关键酶或辅酶,增强 EST 过氧化还原机制来协同氧化降解多种有机污染物并将化学能转化为电能。此外, Ren 等^[86]利用 C. 纤维素分解菌和 G. 硫还原菌的协同降解作用,在 EST 中分解 CMC 来净化水体,最终促使 CMC 和 COD 的降解率分别为 64% 和 38%。EST 添加 CMC 不仅能共代谢降解有机污染物,还能协同脱除重金属离子。Cao 等^[87]选择了具有降解 CMC 和发电双重功能的菌株 Lsc-8,CMC 为菌株的定殖和稳定生长提供有利条件,有效地协同其去除有机污染物,从而加速了生物膜-阳极界面的电子转移。并且,利用微生物降解有机物的同时可进行重金属生物修复,对重金属进行吸收和细胞外还原。另外,CMC 和有机污染物经过微生物的氧化产生电子和质子,并通过 EST 以重金属离子为电子受体沉淀重金属离子,最终使 EST 能去除水体中(95.22 ± 2.72)% 的 Cr(VI)。

4 研究展望

利用功能性 CMC 材料构建性能优越、绿色高效的 EST 进行水污染治理,可以最大化水污染治理效益。CMC 可以提高 EST 水污染治理中电极的黏结性能、电子的传递效率、隔膜的质子扩散、电极区的催化活性、极区的吸附活性以及底物的协同脱除能力。CMC 材料相较合成聚合物更能提高 EST 在水处理中的竞争力,从而实现低成本、高性能、长寿命、易普及的革新。CMC 材料在结构和性能方面的多样性,为 EST 提供了新的创新动力和研究着力点,通过 CMC 材料构建新颖、低成本、高效率的 EST,更符合未来污水处理发展的需求。进一步利用 CMC 材料来优化 EST,建议从以下几方面展开研究:

a. 在机理方面进行研究,处理组分复杂的实际污水。污水中可能同时含有多种重金属离子、有机溶剂、染料分子等污染物,限制了 EST 的除污产能性能。因此,需深入研究 CMC 材料基体界面的微观结构以及明确 CMC 材料对微生物的电子传递、污染物的协同降解等机制。从机理上革新 EST,从而同时处理水中多种污染物,可为污水处理奠定坚实的理论基础。

b. 在方法方面进行耦合,提高 EST 污水处理效能。利用 CMC 材料出色的吸附性、生物亲和性,可设计出电极、隔膜等高性能 EST 水处理组件。然而,现行的水处理法规愈发严格,单一的 EST 难以同时实现高效、经济、节能的水处理目标。因此,将 EST 与光催化、人工湿地等水处理系统相结合可以事半功倍,实现能源的最大化利用并满足法规要求。

c. 在技术方面进行调整,拓展组件的水处理能力。通过调整 CMC 材料的比例、添加其他高性能材料或改性来避免 EST 材料的浪费和提高对难降解有机污染物的去除效率;制备不同形状更适用于养殖场、实验室、工厂等水处理领域的 EST,从而加强 CMC 材料与 EST 各部分组件之间的紧密联系,使 EST 在实际污水处理中变得更加稳定、成熟。

d. 在应用方面进行调整,寻找成本降低途径和方案。目前 EST 仍在试验阶段,受限于成本等问题无法大规模投入工程化应用。然而,通过 CMC 材料制备性能优异且经济的 EST 组件,具有可大规模生产持续性水处理装置的潜力。将 EST 应用在特定的湖泊、河流、景观等水体中,选择成本和效果合适的 CMC 材料,有助于推动 EST 的工程化应用。

参考文献:

[1] 曾萌,张园园,王红瑞,等. 中国水-能源纽带关系双向

消耗核算研究[J]. 水资源保护,2022,38(5):159-165. (ZENG Meng,ZHANG Yuanyuan,WANG Hongrui, et al. Bidirectional consumption accounting of water-energy nexus in China[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):159-165. (in Chinese))

[2] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):55-62. (WU Qingsong, MA Junxia, ZUO Qiting, et al. Quantitative analysis on harmony degree of water resources-economic society-ecological environment coupling system in the Tarim River Basin[J]. Water Resources Protection,2021,37(2):55-62. (in Chinese))

[3] 陈文龙,罗欢,吴琼,等. 基于“先泥后水”模式的重污染河道底泥碳氮硫同步去除技术研究[J]. 水资源保护,2023,39(3):16-23. (CHEN Wenlong, LUO Huan, WU Qiong, et al. A synchronous removal technology of carbon, nitrogen and sulfur pollutants from sediment in heavily polluted rivers based on “treating sediment before water” model[J]. Water Resources Protection,2023,39(3):16-23. (in Chinese))

[4] MIKUL I H, BALETA J, WANG X B, et al. Green development challenges within the environmental management framework [J]. Journal of Environmental Management,2021,277:111477.

[5] 贡力,董洲全,贾治元,等. 水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9. (GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2023,51(4):1-9. (in Chinese))

[6] 许士国,苏广宇,谢楚依,等. 碧流河水库入流消落区生态改善的潜坝技术及效应[J]. 水资源保护,2022,38(5):26-31. (XU Shiguo, SU Guangyu, XIE Chuyi, et al. Submerged dam technology and its effect of ecological improvement in inflow-water-level-fluctuating zone of Biliuhe Reservoir [J]. Water Resources Protection,2022,38(5):26-31. (in Chinese))

[7] 李敏娟,燕文明,陈翔,等. 锁磷剂和增氧剂对沉积物内源污染物钴的吸附[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):90-97. (LI Minjuan, YAN Wenming, CHEN Xiang, et al. Adsorption of endogenous pollutant Co in sediments, by phosphorus-locking agent and oxygen-enhancing agent [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):90-97. (in Chinese))

[8] LOGAN B E, RABAEY K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies [J]. Science,2012,337(6095):686-690.

[9] THAPA B S, KIM T, PANDIT S, et al. Overview of

- electroactive microorganisms and electron transfer mechanisms in microbial electrochemistry[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347:126579.
- [10] RAHMAN M S, HASAN M S, NITAI A S, et al. Recent developments of carboxymethyl cellulose [J]. *Polymers*, 2021, 13(8):1345.
- [11] ZENG Yang, TANG Xiangtao, QIN Yan, et al. Enhanced removal of methylene blue from wastewater by alginate/carboxymethyl cellulose-melamine sponge composite[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 244:125280.
- [12] GODIYA C B, CHENG Xiao, LI Dawei, et al. Carboxymethyl cellulose/polyacrylamide composite hydrogel for cascaded treatment/reuse of heavy metal ions in wastewater[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 364:28-38.
- [13] KELLY P T, HE Zhen. Nutrients removal and recovery in bioelectrochemical systems: a review [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 153:351-360.
- [14] 侯俊,王岩博,张明,等. 微生物-物化耦合降解毒死蜱研究进展[J]. *水资源保护*, 2021, 37(2):15-20. (HOU Jun, WANG Yanbo, ZHANG Ming, et al. Research progress on degradation of chlorpyrifos by microbial-physicochemical coupling method [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37(2):15-20. (in Chinese))
- [15] YOU Juping, JI Zhenyi, ZHAO Jingkai, et al. Configurations of bioelectrochemical reactor for environmental remediation: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 471:144325.
- [16] WANG W, CHANG J S, LEE D J. Integrating anaerobic digestion with bioelectrochemical system for performance enhancement: a mini review[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 345:126519.
- [17] LIU Hongbo, QIN Song, LI Anze, et al. Bioelectrochemical systems for enhanced nitrogen removal with minimal greenhouse gas emission from carbon-deficient wastewater: a review [J]. *Science of The Total Environment*, 2023, 859:160183.
- [18] YAN Weifu, XIAO Yong, YAN Weida, et al. The effect of bioelectrochemical systems on antibiotics removal and antibiotic resistance genes: a review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 358:1421-1437.
- [19] APOLLON W, RUSYN I, GONZÁLEZ-GAMBOA N, et al. Improvement of zero waste sustainable recovery using microbial energy generation systems: a comprehensive review[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 817:153055.
- [20] HINDATU Y, ANNUAR M S M, GUMEL A M. Mini-review: anode modification for improved performance of microbial fuel cell[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 73:236-248.
- [21] LOGAN B E, HAMELERS B, ROZENDAL R A, et al. Microbial fuel cells: methodology and technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(17):5181-5192.
- [22] MIER A A, OLVERA-VARGAS H, MEJIA-LÓPEZ M, et al. A review of recent advances in electrode materials for emerging bioelectrochemical systems: from biofilm-bearing anodes to specialized cathodes [J]. *Chemosphere*, 2021, 283:131138.
- [23] WANG Hui Feng, LI Zichao, YAHYA OUI S, et al. Effective adsorption of dyes on an activated carbon prepared from carboxymethyl cellulose: experiments, characterization and advanced modelling [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417:128116.
- [24] 谷芳,马嘉欣,车春波. 玉米秸秆制备羧甲基纤维素的研究及结构表征[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(9):240-245. (GU Fang, MA Jiaxin, CHE Chunbo. Preparation and structural characterization of carboxymethyl cellulose from corn stalk [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(9):240-245. (in Chinese))
- [25] BELACHEW T, GEBINO G, HAILE A. Extraction and characterization of indigenous Ethiopian castor oil bast fibre[J]. *Cellulose*, 2021, 28(4):2075-2086.
- [26] DEMIRBAŞ A. Thermochemical conversion of biomass to liquid products in the aqueous medium [J]. *Energy Sources*, 2005, 27(13):1235-1243.
- [27] DI BLASI C, BRANCA C, GALGANO A. Biomass screening for the production of furfural via thermal decomposition [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2010, 49(6):2658-2671.
- [28] RABEMANOLONTSOA H, SAKA S. Comparative study on chemical composition of various biomass species[J]. *RSC Advances*, 2013, 3(12):3946-3956.
- [29] PASANGULAPATI V, RAMACHANDRIYA K D, KUMAR A, et al. Effects of cellulose, hemicellulose and lignin on thermochemical conversion characteristics of the selected biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114:663-669.
- [30] MOSIER N, WYMAN C, DALE B, et al. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2005, 96(6):673-686.
- [31] LEE J. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol[J]. *Journal of Biotechnology*, 1997, 56(1):1-24.
- [32] TAN F, HE L, ZHU Q, et al. Characterization of different types of agricultural biomass and assessment of their potential for energy production in China[J]. *Bioresources*, 2019, 14(3):6447-6464.
- [33] WANG Yanting, FAN Chunfen, HU Huizhen, et al. Genetic modification of plant cell walls to enhance biomass yield and biofuel production in bioenergy crops [J]. *Biotechnology Advances*, 2016, 34(5):997-1017.

- [34] OKTAE J, LAUTENSCHLÄGER T, GÜNTHER M, et al. Characterization of willow bast fibers (*Salix* spp.) from short-rotation plantation as potential reinforcement for polymer composites[J]. *Bioresources*, 2017, 12(2):4270-4282.
- [35] CASABURI A, ROJO Ú M, CERRUTTI P, et al. Carboxymethyl cellulose with tailored degree of substitution obtained from bacterial cellulose [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75:147-156.
- [36] 李外, 赵雄虎, 季一辉, 等. 羧甲基纤维素制备方法及其生产工艺研究进展[J]. *石油化工*, 2013, 42(6):693-702. (LI Wai, ZHAO Xionghu, JI Yihui, et al. Progresses in preparation and production technology for carboxymethyl cellulose [J]. *Petrochemical Technology*, 2013, 42(6):693-702. (in Chinese))
- [37] 龙柱, 杨红新. 羧甲基纤维素改善纸张强度的研究[J]. *中华纸业*, 2003, 24(10):42-44. (LONG Zhu, YANG Hongxin. Study of carboxymethylcellulose on improvement of paper strength[J]. *China Pulp & Paper Industry*, 2003, 24(10):42-44. (in Chinese))
- [38] YILDIRIM-YALCIN M, TORNUK F, TOKER O S. Recent advances in the improvement of carboxymethyl cellulose-based edible films [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2022, 129:179-193.
- [39] KAUR P, BOHIDAR H B, NISBET D R, et al. Waste to high-value products: the performance and potential of carboxymethylcellulose hydrogels via the circular economy [J]. *Cellulose*, 2023, 30(5):2713-2730.
- [40] XU Hanping, ZHU Jingqiao, XU Mincai, et al. Flexible and alternately layered high electrochemical active electrode based on mxene, carboxymethyl cellulose, and carbon nanotube for asymmetric micro-supercapacitors [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 645:974-984.
- [41] WANG Zhen, GAO Ming, PENG Jie, et al. Nanoarchitectonics of heteroatom-doped hierarchical porous carbon derived from carboxymethyl cellulose carbon aerogel and metal-organic framework for capacitive deionization [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 241:124596.
- [42] 沈丹萍. 基于纤维素及其衍生物的生物矿物复合材料的制备研究[D]. 上海:复旦大学, 2012.
- [43] ZENNIFER A, SENTHILVELAN P, SETHURAMAN S, et al. Key advances of carboxymethyl cellulose in tissue engineering & 3D bioprinting applications [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 256:117561.
- [44] 赵凤. 羧甲基纤维素修饰纳米零价铁在水环境中的腐蚀老化研究[D]. 长沙:湖南大学, 2017.
- [45] 王京. 改性 CMC 吸附材料的制备及其吸附性能的研究 [D]. 绵阳:西南科技大学, 2015.
- [46] SONG Yating, NIU Li, MA Peilin, et al. Rapid preparation of antifreezing conductive hydrogels for flexible strain sensors and supercapacitors[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(7):10006-10017.
- [47] YANG Jingwen, ZHANG Xianhao, CHEN Lin, et al. Antibacterial aerogels with nano-silver reduced in situ by carboxymethyl cellulose for fresh meat preservation [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 213:621-630.
- [48] LIU Shaobo, LIU Yunguo, JIANG Luhua, et al. Removal of 17 β -Estradiol from water by adsorption onto montmorillonite-carbon hybrids derived from pyrolysis carbonization of carboxymethyl cellulose [J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 236:25-33.
- [49] CHENG Ya, REN Xiuyan, DUAN Lijie, et al. A transparent and adhesive carboxymethyl cellulose/polypyrrole hydrogel electrode for flexible supercapacitors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(24):8234-8242.
- [50] WANG Zechen, HUANG Tao, LIU Zhaolin, et al. Dopamine-modified carboxymethyl cellulose as an improved aqueous binder for silicon anodes in lithium-ion batteries[J]. *Electrochimica Acta*, 2021, 389:138806.
- [51] LI Yueqin, GONG Qiang, HAN Lin, et al. Carboxymethyl cellulose assisted polyaniline in conductive hydrogels for high-performance self-powered strain sensors [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 298:120060.
- [52] GAO Feilong, ZHANG Mingyi, ZHANG Wenzhu, et al. Synthesis of carboxymethyl cellulose stabilized sulfidated nanoscale zero-valent iron (CMC-S-nZVI) for enhanced reduction of nitrobenzene [J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 315:123704.
- [53] LI Duanming, WANG Kanglong, LIU Jun, et al. Fabrication of silver nanoclusters and nanocomposite films based on coordinated electrodeposition of carboxymethyl cellulose [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2022, 307(7):2100885.
- [54] ALNADARI F, AL-DALALI S, PAN Fei, et al. Physicochemical characterization, molecular modeling, and applications of carboxymethyl chitosan-based multifunctional films combined with gum arabic and anthocyanins [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2023, 16(12):2984-3002.
- [55] ZHANG Cuizhi, GAO Kairu, CHU Xiaomeng, et al. Carboxymethyl cellulose/polyamidoamine hydrogel loaded with nano-Ag particles as recoverable efficient catalyst for reduction of 4-nitrophenol in water [J]. *Cellulose*, 2023, 30(6):3729-3743.
- [56] MANSUR A A P, CUSTÓDIO D A C, DORNELES E M S, et al. Nanoplexes of ZnS quantum dot-poly-L-lysine/iron oxide nanoparticle-carboxymethylcellulose for photocatalytic degradation of dyes and antibacterial activity in wastewater

- treatment [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 231 :123363.
- [57] SONG Li, LIU Fuqiang, ZHU Changqing, et al. Facile one-step fabrication of carboxymethyl cellulose based hydrogel for highly efficient removal of Cr(VI) under mild acidic condition[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 369 : 641-651.
- [58] LIU Huie, TIAN Xiaowen, XIANG Xiaoxiao, et al. Preparation of carboxymethyl cellulose/graphene composite aerogel beads and their adsorption for methylene blue [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 202 :632-643.
- [59] SU Mei, YIN Weizhao, LIU Li, et al. Enhanced Cr(VI) stabilization in soil by carboxymethyl cellulose-stabilized nanosized Fe⁰ (CMC-nFe⁰) and mixed anaerobic microorganisms [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 257 :109951.
- [60] MANZOOR N, ZULQARNAI N, ANEES M, et al. Comparative performance of carboxymethyl cellulose as substrate for electricity generation in microbial fuel cell; a review[J]. *Latin American Applied Research*, 2021, 51 (3) :217-222.
- [61] SUNEETHA M, MOO O S, CHOI S M, et al. Tissue-adhesive, stretchable, and self-healable hydrogels based on carboxymethyl cellulose-dopamine/PEDOT: PSS via mussel-inspired chemistry for bioelectronic applications [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 426 :130847.
- [62] 江奇, 瞿美臻, 张伯兰, 等. 电化学超级电容器电极材料的研究进展[J]. *无机材料学报*, 2002, 17(4) :649-656. (JIANG Qi, QU Meizhen, ZHANG Bolan, et al. Progress of research on electrode materials for electrochemical supercapacitors[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2002, 17(4) :649-656. (in Chinese))
- [63] 卢娜, 周顺桂, 倪晋仁. 微生物燃料电池的产电机制 [J]. *化学进展*, 2008, 20(7/8) :1233-1240. (LU Na, ZHOU Shungui, NI Jinren. Mechanism of energy generation of microbial fuel cells [J]. *Progress in Chemistry*, 2008, 20(7/8) :1233-1240. (in Chinese))
- [64] 汤占肃. 聚吡咯复合材料在微生物燃料电池中的产电和脱色性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
- [65] TAHIR M, HE Liang, LI Lihong, et al. Pushing the electrochemical performance limits of polypyrrole toward stable microelectronic devices [J]. *Nano-Micro Letters*, 2023, 15(1) :49.
- [66] LIU Qin, ZHOU Yan, CHEN Shuilian, et al. Cellulose-derived nitrogen and phosphorus dual-doped carbon as high performance oxygen reduction catalyst in microbial fuel cell[J]. *Journal of Power Sources*, 2015, 273 :1189-1193.
- [67] WANG Yuyang, PAN Xu, CHEN Ye, et al. A 3D porous nitrogen-doped carbon nanotube sponge anode modified with polypyrrole and carboxymethyl cellulose for high-performance microbial fuel cells[J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2020, 50(12) :1281-1290.
- [68] 陈静. 石墨烯修饰电极对微生物燃料电池产电性能的影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [69] CHRISTWARDANA M, HANDAYANI A S, YUDIANTI R, et al. Cellulose-carrageenan coated carbon felt as potential anode structure for yeast microbial fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(8) : 6076-6086.
- [70] VIDHYESWARI D, SURENDHAR A, BHUVANESHWARI S. General aspects and novel PEMs in microbial fuel cell technology: a review [J]. *Chemosphere*, 2022, 309 : 136454.
- [71] 张全. 质子交换膜污染机理分析以及在微生物燃料电池中的应用[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- [72] XU Juan, SHENG Guoping, LUO Hongwei, et al. Fouling of proton exchange membrane (PEM) deteriorates the performance of microbial fuel cell[J]. *Water Research*, 2012, 46(6) :1817-1824.
- [73] TERBISH N, LEE C H, POPURI S R, et al. An investigation into polymer blending, plasticization and cross-linking effect on the performance of chitosan-based composite proton exchange membranes for microbial fuel cell applications[J]. *Journal of Polymer Research*, 2020, 27(9) :280.
- [74] MAHMOUD A, FAHMY A, NASER A, et al. Novel sulfonated poly (vinyl alcohol)/carboxy methyl cellulose/acrylamide-based hybrid polyelectrolyte membranes [J]. *Scientific Reports*, 2022, 12(1) :22017.
- [75] SON Y R, PARK S J. Green preparation and characterization of graphene oxide/carbon nanotubes-loaded carboxymethyl cellulose nanocomposites [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1) :17601.
- [76] AMPAIWONG J, RATTANAWALEEDIROJN P, SAENKIETTIYUT K, et al. Reduced graphene oxide/carboxymethyl cellulose nanocomposites: novel conductive films [J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2019, 19(6) :3544-3550.
- [77] LIU Shuhui, HUANG Wunjie, LIN Chiwen, et al. Enhanced copper removal and bioelectricity generation in sediment microbial fuel cells through biostimulation and bioaugmentation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 350 :131458.
- [78] MAHMOUD M E, KHALIFA M A, ATTIA A A, et al. Adsorptive capture of uranium (VI) onto a novel nanocomposite of reduced graphene oxide @ titanium dioxide @ carboxymethylcellulose [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2023, 53 :103834.
- [79] HELMIYATI H, YUNARTI R T, DINI F W. Magnetic alginate-carboxymethyl cellulose to immobilize copper

- nanoparticles as a green and sustainable catalyst for 4-nitrophenol reduction[J]. *Heliyon*,2023,9(3):e14111.
- [80] GAO Yue, XUE Yanan, ZHEN Kai, et al. Remediation of soil contaminated with PAHs and γ -HCH using Fenton oxidation activated by carboxymethyl cellulose-modified iron oxide-biochar [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023,453:131450.
- [81] YANG Pinpin, GAO Yaqian, XUE Lefei, et al. Lignocellulose reconstituted shape-controllable self-supporting carbonaceous capacitance-anodes with high electron transfer rates for high-performance microbial electrochemical system [J]. *Bioresource Technology*, 2023,380:129072.
- [82] VUONG N M T, NGUYEN P T, NGUYEN T K O, et al. Application of Nano zero-valent iron particles coated by carboxymethyl cellulose for removal of Congo red dye in aqueous solution [J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*,2023,8:100469.
- [83] XI Yanni, XIE Tanghuan, LIU Yanfen, et al. Carboxymethyl cellulose stabilized ferrous sulfide @ extracellular polymeric substance for Cr(VI) removal: characterization, performance, and mechanism[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2022,425:127837.
- [84] 王敏. 底物对微生物燃料电池产电性能及微生物群落结构的影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2014.
- [85] MANZOOR N, CAO Lianbin, DENG Dandan, et al. Cellulase extraction from cellulolytic bacteria promoting bioelectricity production by degrading cellulose [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2018, 829: 241-248.
- [86] REN Z Y, WARD T E, REGAN J M. Electricity production from cellulose in a microbial fuel cell using a defined binary culture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007,41(13):4781-4786.
- [87] CAO Lianbin, MA Yamei, DENG Dandan, et al. Electricity production of microbial fuel cells by degrading cellulose coupling with Cr(VI) removal[J]. *Journal of Hazardous Materials*,2020,391:122184.
- (收稿日期:2023-12-15 编辑:王芳)

(上接第 94 页)

- [35] DAGASAN Y, RENARD P, STRAUBHAAR J, et al. Automatic parameter tuning of multiple-point statistical simulations for lateritic bauxite deposits [J]. *Minerals*, 2018,8(5):220.
- [36] KANEKO H. Cross-validated permutation feature importance considering correlation between features[J]. *Analytical Science Advances*,2022,3(9/10):278-287.
- [37] APLEYD W, ZHU Jingyu. Visualizing the effects of predictor variables in black box supervised learning models[J]. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*,2020,82(4):1059-1086.
- [38] XENOCHRISTOU M, HUTTON C, HOFMAN J, et al. Short-term forecasting of household water demand in the UK using an interpretable machine learning approach[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2021,147(4):04021004.
- [39] RIBEIRO M, SINGH S, GUESTRIN C. “Why should I trust you?”: explaining the predictions of any classifier [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: Association for Computing Machinery,2016:1135-1144.
- [40] XU Chongchong, LIAO Zhicheng, LI Chaojie, et al. Review on interpretable machine learning in smart grid [J]. *Energies*,2022,15(12):4427.
- (收稿日期:2023-09-17 编辑:施业)

(上接第 140 页)

- [43] BROGI S R, HA S Y, KIM K, et al. Optical and molecular characterization of dissolved organic matter in the Arctic ice core and the underlying seawater (Cambridge Bay, Canada): implication for increased autochthonous dissolved organic matter during ice melting[J]. *Science of the Total Environment*,2018,627:802-811.
- [44] LIN Hui, GUO Laodong. Variations in colloidal dissolved organic matter composition with molecular weight within individual water samples as characterized by flow field-flow fractionation and EEM-PARAFAC analysis [J]. *Environmental Science & Technology*,2020,54(3):1657-1667.
- [45] CATALÁ T S, RECHE I, FUENTES-LEMA A, et al. Turnover time of fluorescent dissolved organic matter in the dark global ocean[J]. *Nature Communications*,2015,6:5986.
- [46] SHUTOVA Y, BAKER A, BRIDGEMAN J, et al. Spectroscopic characterisation of dissolved organic matter changes in drinking water treatment: from PARAFAC analysis to online monitoring wavelengths [J]. *Water Research*,2014,54:159-169.
- [47] YAMASHITA Y, SCINTO L J, MAIE N, et al. Dissolved organic matter characteristics across a subtropical wetland's landscape: application of optical properties in the assessment of environmental dynamics [J]. *Ecosystems*,2010,13(7):1006-1019.
- (收稿日期:2024-01-06 编辑:王芳)