

李瑞祥,李田,张晓林,等.微生物电化学技术在石油烃污染土壤修复中的应用研究进展 [J]. 中国环境科学, 2023,43(6):3042~3054.

Li R X, Li T, Zhang X L, et al. Application and progress of microbial electrochemical technology in the remediation of petroleum contaminated soil [J]. China Environmental Science, 2023,43(6):3042~3054.

## 微生物电化学技术在石油烃污染土壤修复中的应用研究进展

李瑞祥,李田,张晓林,周启星<sup>\*</sup> (南开大学环境科学与工程学院,碳中和交叉科学中心,环境污染过程与基准教育部重点实验室,天津 300350)

**摘要:** 石油开采和运输过程中会产生大面积的石油污染场地。碳中和背景下,微生物电化学技术为土壤中石油有机污染物去除提供了新型碳减排修复策略。简要介绍了微生物电化学系统的运行原理和分类,并针对该技术低成本、绿色低碳、能量转化效率高以及可控性强等优势具体分析了其在石油烃污染土壤修复领域应用的可行性。详细概述了微生物电化学系统修复性能的影响因素及增加系统电子受体、提高传质能力以及提高电子传递能力等强化途径,并对现阶段微生物电化学修复技术存在的问题和发展中的局限性进行总结,指出未来的发展方向,以期指导该技术在污染土壤中的实际应用。

**关键词:** 碳中和; 石油烃污染土壤; 微生物电化学系统; 土壤修复

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2023)06-3042-13

**Application and progress of microbial electrochemical technology in the remediation of petroleum contaminated soil.** LI Rui-xiang, LI Tian, Zhang Xiao-lin, ZHOU Qi-xing<sup>\*</sup> (Carbon Neutrality Interdisciplinary Science Centre, Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China). *China Environmental Science*, 2023,43(6): 3042~3054

**Abstract:** Petroleum extraction and transportation can generate large areas of petroleum contaminated sites. In the context of carbon neutrality, microbial electrochemical technology provides a novel low-carbon remediation strategy for the removal of petroleum organic pollutants from soils. Based on this, the operating principle and classification of microbial electrochemical systems were briefly introduced. The feasibility of applying this technology to the remediation of petroleum contaminated soil was specifically analysed with regard to the advantages of low cost, low carbon, high energy conversion efficiency and high controllability. Subsequently, the factors influencing the remediation performance of microbial electrochemical systems were outlined in detail, as well as the enhancement pathways such as increasing the electron acceptors, improving the mass transfer capacity and enhancing the electron transfer capacity of the systems were summarized. The current emerging problems and limitations of microbial electrochemical remediation technology were summarized, and it is suggested that future development should focus on microorganisms, reactors and practical applications in order to guide the practical application in contaminated soils.

**Key words:** carbon neutral; petroleum contaminated soil; microbial electrochemical system; soil remediation

由于人类生活生产活动对环境的累积影响,气候变化问题愈演愈烈,不仅威胁人类健康,还会扰乱生态系统,是当前诸多环境矛盾中的主要矛盾<sup>[1-3]</sup>。碳中和是遏制全球气候变暖的大趋势,是改善生态环境,推动经济发展和增长的新动力<sup>[4-6]</sup>。面对全球气候变化形势日趋严峻的现状,全球各行业开始密切关注CO<sub>2</sub>排放量,多个国家及地区相继提出碳中和目标<sup>[7]</sup>。

土壤是所有陆地生态系统的基础,陆地生态系统碳库主要包括土壤碳库和植被碳库其中土壤碳库占 90%以上<sup>[8-10]</sup>。土壤碳库的作用是双重的,既是CO<sub>2</sub>的“汇”,也是“源”。作为“碳汇”,土壤能够通过植物等从大气中吸收、转化、存储 CO<sub>2</sub>。而作为“碳源”,土壤会通过呼吸作用等释放 CO<sub>2</sub> 等温室气

体<sup>[11]</sup>。因此,即使土壤受到了外界的微小波动,也会造成 CO<sub>2</sub> 浓度的剧烈变化,对全球碳平衡以及气候环境产生巨大影响<sup>[12]</sup>。石油资源在推动国家经济和社会发展的同时,也导致了土壤石油污染问题日趋严重<sup>[13]</sup>。截至 2020 年底,我国已发现油田共 771 个,累计探明石油地质储量达到 422 亿 t<sup>[14]</sup>。因此,对于石油烃污染土壤,围绕减污降碳开展修复技术创新加强减污降碳协同以及非 CO<sub>2</sub> 温室气体减排进而实现碳减排是现阶段的主要问题。

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: NSFC-山东联合基金重点项目(U1906222);国家重点研发计划项目(2019YFC1804104);天津市科技计划项目(19YZCSF00920)

\* 责任作者, 教授, zhouqx@nankai.edu.cn

石油烃污染土壤的修复方法包括物理、化学和生物修复技术<sup>[15]</sup>.其中,生物修复技术因具有环境友好,无二次污染,效果稳定等优点而被广泛研究<sup>[16]</sup>.然而,由于土壤自身特性,在修复过程中会存在氧含量低,硝酸盐等营养元素作为电子受体利用率差等问题,导致微生物富集缓慢,修复周期长,效率低<sup>[17-18]</sup>.因此,如何在土壤中补充电子受体成为厌氧微生物修复需要突破的难点.微生物电化学系统(MES)是一种结合生物技术和电化学氧化还原技术优势的耦合系统,不仅可以很好地提供电子受体,而且还能够从自然环境的微生物群落中定向富集电活性微生物以实现污染物高效快速降解<sup>[19]</sup>.在当前碳达峰和碳中和的宏伟愿景下,MES 因其高效、低耗和稳定的特性,在低碳污染土壤修复领域的优势愈发凸显.本文从 MES 的原理出发,对 MES 在石油烃污染土壤修复中的污染物去除机制进行了论述,基于此对 MES 在碳中和背景下的优势进行了分析,并总结了 MES 在土壤石油烃去除过程中的影响因素和强化途径,对现阶段 MES 与其他修复技术的联用进行了阐述,最后对现阶段存在的问题和未来发展方向进行了总结展望,以期对“双碳”目标下石油烃污染土壤修复领域的发展提供参考.

## 1 MES 在石油烃污染土壤中的应用

### 1.1 MES 的工作原理及分类

微生物电化学技术(MET)作为一种潜在的生产能源和污染物处理技术,不仅能够实现污染物高效快速去除,还能将其中的化学能转化为电能实现同步资源化处理<sup>[20-21]</sup>.MES 是基于 MET 原理的应用,系统整合了生物处理、物理吸附和电化学氧化及还原等作用<sup>[22-23]</sup>.通常情况下,一个典型 MES 由阳极室、阴极室、外电路和分隔材料组成.在 MES 中,功能微生物通过自身代谢作用分解有机底物而产生电子,一部分为自身增殖利用,剩余的电子则传递至固体电极表面,该过程除了能够实现降解污染物的同时回收生物能源,还能够利用微生物的生命活动实现电化学合成、生物传感器利用、污染物回收和生物修复等<sup>[24-26]</sup>.对于 MES,功能微生物发生的胞外电子转移(EET)过程是系统正常运行的关键<sup>[27]</sup>,这类具备 EET 能力的微生物则被称为电活性微生物(如 *Geobacter*, *Shewanella* 等),在系统中这些微生物通

常粘附在电极上,经过驯化和培养后形成电活性生物膜(EAB)<sup>[28-29]</sup>.电活性微生物在系统中以浮游和 EAB 两种形式生长,而这两种方式都能够介导 EET 以实现电子向电极的转移<sup>[30-31]</sup>.浮游形式生长的电活性微生物只能通过中介体进行 EET,而 EAB 则通过纳米线、生物膜导电基质以及中介体等将电子传递至电极,相较于依靠中介体扩散的机制极大提高了电子转移动力学速率<sup>[32-35]</sup>.电活性微生物与电极之间的相互作用使得 MES 在污染物去除与地球生物化学物质转化等方面有着巨大实际应用潜能<sup>[31]</sup>.

MES 作为一类技术的合集,其应用的范围也越来越广,根据不同的功能需求(产电,产氢,资源回收以及水体或土壤修复),被细分为不同技术:微生物燃料电池<sup>[36]</sup>、微生物电解池<sup>[37]</sup>、微生物修复电池<sup>[20]</sup>、微生物脱盐池<sup>[38]</sup>、微生物电合成系统<sup>[39]</sup>等.在 MES 中,阳极室中的微生物氧化反应是所有系统的共同原理,即系统中可生物降解有机物在产电微生物的作用下被降解并产生电子和质子.所产生的电子通过具备 EET 能力的电活性微生物传递至阳极表面,并通过外电路由阳极转移至阴极.同时,阳极室中等量的质子转移至阴极室.在阴极室,电子,质子及其他电子受体进一步反应从而完成生物质能到电能及其他化合物的转化<sup>[20]</sup>.目前,研究较为广泛的 MES 主要是能够用于发电的微生物燃料电池(MFC)和用于产生增殖物质的微生物电解池(MEC)<sup>[40]</sup>.

#### 1.1.1 微生物燃料电池 MFC 为研究最早的 MES 类型,其运行不需要提供任何外部电源,与传统的化学燃料电池相比,主要利用低成本和自给自足的微生物来维持运行<sup>[36]</sup>.在 MFC 中,阳极室始终保持较低的氧化还原电位,最常用的电子供体是乙酸钠,阴极一般使用具有较高还原电位的物质作为电子受体,最常见的阴极电子受体为氧气<sup>[41-42]</sup>.从构型来说, MFC 还可以进一步分为双室 MFC<sup>[43]</sup>、单室 MFC<sup>[44]</sup> 以及三室 MFC<sup>[45]</sup> 等.

#### 1.1.2 微生物电解池 MEC 是通过在阴阳极之间施加一定偏压,以解决阴极发生还原反应的电势高于阳极发生氧化反应的电势的问题,以保证电化学系统运行的系统<sup>[21]</sup>.施加偏压的主要目的是通过氧化底物而生产特定的增值物质(H<sub>2</sub> 等)<sup>[46]</sup>.通常 MEC 的阳极室主要是有机物氧化为小分子物质的过程,而阴极则是进行产氢气或甲烷等的过程<sup>[47]</sup>.作为一

个耗电的系统,MEC 可以被认为是 MFC 的逆过程。就产生增值物质而言,MEC 的能量转化效率高,例如,在产氢方面,与常规电解水等技术相比(1.5~3.5V),MEC 仅需施加很小的外部电压(0.2~0.8V)即可克服热力学障碍而产生氢气,并同步完成污染物的去除<sup>[48-49]</sup>。由于外部电压的施加,MEC 中阴极反应的稳定性大大增强,并且能够有效地调控微生物生存环境以及满足不同化学反应所需电化学条件,从而更快形成更加稳定的生物膜。

## 1.2 MES 的优势

MES 通过功能性微生物之间的相互作用,能够同步实现污染物去除和能源回收,消除了传统污染物处理过程中的二次污染和高能耗等问题,从而被认为是一种碳中和背景下的高效的污染物处理技术<sup>[19,50-51]</sup>。MES 在实现污染物去除和“碳中性”运行方面展现出了较大潜力,与传统的污染物处理技术相比,其优势主要包括:(1)系统中的电活性微生物和其他降解性微生物通过一系列生态学效应能够实现污染物的高效去除和转化,并且以产生电能、氢能等方式将污染物中的化学能进行回收,从而实现了污染物的资源化并降低了系统的总体能量消耗<sup>[19]</sup>;(2)MES 具有更加灵活的复杂污染物去除能力,系统中的关键部分 EAB 不仅包括电活性微生物,而且还包括一些不具备电化学活性的微生物,这类微生物则能够通过发酵或其他生命活动以利用较为复杂的底物,以使得 MES 能够去除更多类型的污染物<sup>[52]</sup>;(3)相较于常规修复技术,MES 具有相对简单温和的运行条件,多种有机化合物均可作为底物,并且运行过程中不需要添加任何有毒有害物质,因此不会随着时间的推移对环境造成二次污染或重大改变,同时,MES 电极反应的驱动力可以加速修复过程,缩短修复时间<sup>[53]</sup>;(4)与传统的电动修复不同,MES 需要很少或不需要外部电源输入,与仅提供一种氧化还原条件的其他修复技术相比 MES 能够同时提供氧化(阳极)和还原(阴极)反应,从而可以更灵活地去除具有不同特征的复杂污染物,避免丰富有机资源的流失,减少二次污染的产生,在低能耗和低碳下去除污染物更具优势<sup>[40]</sup>;(5)在环境修复过程中,系统的监测和控制十分关键,而 MES 产生的电流不仅容易监测和控制,而且很容易传输,对修复环境的变化具有即时反映,因此可以作为实时指标,并为原位传感

器提供动力,对生物修复过程进行在线监测和动态控制<sup>[54-55]</sup>;(6)MESs 的性质使其能够与其他的污染物处理技术很好地结合,既可作为污染物去除的预处理技术也可以作为深度处理技术,能够更好地发挥各个技术的优势,从而实现了难降解污染物的去除<sup>[56]</sup>。除此之外,MESs 还具有低成本、绿色低碳、能量转化效率高以及可控性强等优点,因此,MES 作为治污与产能一体化的新一代污染物处理技术,能够较好地满足“双碳目标”下的需求,有望广泛应用于污染物处理与清洁能源生产行业。

## 1.3 MES 修复石油烃污染土壤可行性分析

在 MESs 中,微生物会通过自身生命活动与人为引入的固体电极进行电子传递,使得阳极和阴极之间产生氧化还原电位差,从而驱动电子自发从低电位向高电位转移,在外电路形成电流,而土壤中的有机污染物则能够在该过程中借助阴阳极耦合进行的氧化还原反应而被去除<sup>[57-59]</sup>。由于石油烃类有机污染物通常是长链的复杂有机物,因此在 MESs 中,石油烃类污染物首先被石油烃降解微生物(如多环芳烃降解菌和碳氢化合物降解菌)分解成小分子底物,然后在阳极被电活性微生物进一步降解,产生的电子再通过微生物电子传递作用传递到阳极(图 1)<sup>[60]</sup>。

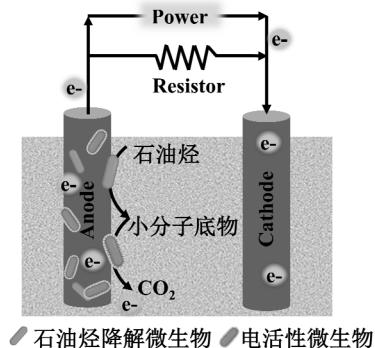


图 1 MES 中石油烃去除机制

Fig.1 Removal mechanism of petroleum hydrocarbon in MES

目前,石油烃污染处理技术根据技术原理划分为物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术<sup>[61]</sup>。物理修复技术主要包括电动修复技术、热脱附技术、气相抽提技术、生物炭吸附技术以及土壤置换技术等<sup>[62]</sup>。与上述技术相比,MESs 所需外部能源较低,对土壤结构破坏能力低,对土壤生态系统扰动较

小、无二次污染并且成本较低<sup>[63]</sup>.石油污染土壤常用的化学修复技术主要包括化学淋洗技术、化学氧化技术、等离子体降解技术和光催化降解技术等<sup>[64]</sup>.与化学修复技术相比,MESs 能够极大地降低外源有毒化学物质的添加、降低二次污染的风险并且能够最大程度地维持土壤的结构和微生态环境<sup>[65]</sup>.与其他生物技术(植物修复技术,动物修复技术和微生物修复技术)相比,MESs 的修复周期更短,对污染环境的适应能力和范围更强并且弥补了生物活动缓慢导致的不可预测性<sup>[66]</sup>.

表 1 MES 在土壤修复中的应用

Table 1 Application of MES in soil remediation

MES 类型	目标污染物	去除效率 (%)	修复周期 (d)	参考文献
单室空气阴极 MFC	DDE	39	60	[72]
单室空气阴极 MFC	阿特拉津	92	63	[73]
单室空气阴极 MFC	异丙甲草胺	55	23	[74]
单室空气阴极 MFC	异丙甲草胺	97	100	[75]
单室空气阴极 MFC	四环素	50	7	[76]
单室空气阴极 MFC	四环素,磺胺嘧啶	75,96	58	[77]
单室空气阴极 MFC	菲	87	163	[45]
单室空气阴极 MFC	苯酚	90	10	[78]
管状插入式空气阴极 MFC	总石油烃	90	120	[70]
单室柱形 MFC	六氯苯	71	56	[79]
单室柱形 MFC	阿特拉津,六氯苯	95,78	63	[80]
单室 MFC	原油	82	55	[81]
MERC	阿特拉津	93	7	[82]
MERC	除草剂异丙隆	97	25	[83]
双室空气阴极 MFC	镉,铅	31,44	143 和 108	[84]
双室 MFC	柴油	83	21	[85]
三室 MFC	铜	42	72	[86]
三室 MFC	Cu 和 BDE-209	66,86	60	[43]
MEC	总石油烃	21	42	[56]
MEC	总石油烃	10	42	[87]

在传统的土壤微生物修复过程中主要受几个因素的限制:土壤中电子受体缺乏、生物及非生物竞争对有机底物的消耗、土壤功能菌数量少活性低、土壤电子传递效率低以及副产物积累等,而 MES 则能够很好地解决这些问题<sup>[67-68]</sup>.首先 MESs 中的电极能够为微生物代谢有机污染物提供取之不尽、用之不竭的电子供体/受体,克服了石油烃在厌氧环境条件下电子受体缺乏的问题,同时缓解了由人为添加化学试剂带来的二次污染<sup>[69-70]</sup>.其次,由于 MES 具备产生生物电的特性,能够很大程度地刺激系统中功能性微生物的生长和代谢活动并提高其活性<sup>[68]</sup>.

土壤中存在的矿物质和一些生物炭物质也能够与 MES 产生的电子进行偶联从而促进土壤中的电子传递效率,提高系统中的氧化还原反应效率进而强化有机污染物的生物修复<sup>[59-71]</sup>.

因此,MESs 以其能耗低,修复效果好,资源可回收等优点被广泛研究<sup>[63]</sup>.据调查,MESs 已经被证明针对土壤中污染物具有较广的修复范围和较好的修复效果,能够高效地去除绝大部分土壤中的有机污染物(石油烃类,农药类以及抗生素类等)和重金属污染物(表 1).总之,MESs 在石油烃污染土壤中的应用是可行且符合双碳时代下的污染物处理技术要求的,能够在实现减污的同时完成降碳.

## 2 MES 修复性能影响因素与强化途径

MES 已经被证明能够在满足碳中和需求的前提下绿色高效地去除污染土壤中的石油烃类污染物<sup>[40]</sup>.但是,同其他修复技术相比,MESs 在对石油烃污染土壤进行修复的过程中也会不可避免地受到不同因素的影响.作为 MESs 的核心,MESs 中的微生物不仅会受到初始环境因素的影响,还会受到污染物等因素的影响<sup>[53]</sup>.而污染土壤作为系统的主要电子和质量传递的媒介,其理化性质,如孔隙度、水分、有机物的浓度和组成等,也会在很大程度上决定石油烃的去除性能<sup>[66]</sup>.在探明 MESs 修复效率影响因素的基础上,有针对性地强化改进 MESs 的修复性能,是提高石油烃污染土壤修复效率的必由之路.

### 2.1 影响因素

石油烃污染土壤修复效率不仅会受到土壤本身影响,而且还会受到 MESs 自身组成的影响<sup>[40]</sup>.

**2.1.1 土壤介质的影响** 土壤是一种比水更复杂的介质,并且土壤的传质速度更慢,因此土壤的类型以及理化性质能够很大程度的影响 MESs 的修复效率<sup>[88]</sup>.不同类型的土壤具有不同的物理和化学性质,如 pH 值、含水率、电导率、土壤颗粒大小/孔隙度、土壤总有机碳和阳离子交换容量等,与 MESs 性能和污染物去除密切相关.例如,对于两种不同的被柴油污染土壤(沙土和粘土),Mao 等<sup>[89]</sup>使用直流电阻技术对两种土壤的电导率变化进行了电导率成像,结果表明,电导率的变化与沙质土壤中的柴油去除率有很好的相关性,但在粘土中则不同,因为粘土的特点是比表面积较大,因此表面导电性也较大.

天然土壤的 pH 值范围很广,从酸性到碱性,相应的 pH 值为 4~10。土壤 pH 值与土壤的理化和生物特性密切相关,直接影响到污染物的去除以及微生物的反应和活动,进而影响修复性能<sup>[90]</sup>。MESs 中的功能性微生物通常在中性环境下具备较好的性能。pH 值的差异会引起生物大分子(如蛋白质和核酸)所带电荷的变化,影响其生物活性<sup>[91]</sup>。因此,在大多数研究中,在阳极修复被有机物污染的土壤时,初始土壤 pH 值在 6.07~8.26 之间为宜<sup>[88]</sup>。在 MESs 运行过程中,电极附近 pH 值变化的总体趋势与水体 MESs 相似,阳极周围的局部 pH 值可能由于质子积累而降低,而阴极周围的局部 pH 值则由于质子消耗而趋于上升<sup>[84]</sup>。由于土壤介质具有较大的内阻,会阻碍电子和质子的传输,从而产生从阳极到阴极的 pH 值梯度,导致在系统中形成从阳极到阴极的酸碱过渡区对微生物的生长和活性产生不利影响<sup>[68]</sup>。此外,pH 值还能够通过改变土壤系统中离子(如重金属例子)的存在形式而影响系统的内阻,例如阳极的酸化能够增强土壤颗粒表面对重金属的解吸,降低了系统内阻,而阴极的碱化则会导致阳离子的沉淀,降低了电导率,从而增加了系统内阻<sup>[84]</sup>。因此,确定同时适合电活性微生物和降解性微生物的 pH 值对提高系统的修复性能具有重要意义。

土壤中的水分不仅能为微生物的生存提供湿润适宜的环境,也是物质溶解和物质转移的必要条件<sup>[67]</sup>。土壤水分的增加可以降低系统内阻,提高微生物的活性和代谢率,水分的增加还能够促进亲水性污染物溶解为水溶性状态,这能够极大地促进电子转移和污染物降解<sup>[68]</sup>。因此,土壤含水率与 MESs 修复性能之间往往存在正相关关系<sup>[92-93]</sup>。在 Wang 等<sup>[68]</sup>的研究中,在对被石油烃污染的盐碱地进行生物修复的过程中,当土壤含水量从 23% 增加到 33% 时,系统的整个发电能力和石油烃污染物的去除率均有不同程度的提升。

MES 中,从微生物细胞到电极的胞外电子转移决定了 MES 中污染物的降解和电力的产生,而这一关键步骤则与土壤电导率有很大关系<sup>[79]</sup>。土壤电导率代表了土壤传输电流的能力,它包括两条主要传导途径:一条是通过土壤中的水分(液体传导或孔隙流体传导),另一条是沿土壤颗粒表面(固体传导或表面传导)<sup>[60]</sup>。低的土壤电导率则会阻碍系统内部的质

量和电子传递,限制了 MES 在土壤修复中的性能<sup>[94]</sup>。

土壤孔隙度是指单位体积土壤中孔隙体积所占的百分比,主要影响系统的质量传递,包括电子的传输以及污染物和氧气的扩散。一般来说,土壤孔隙度的增加会提高质量传递的效率,减少浓度极化,从而提高微生物对污染物的去除率<sup>[88]</sup>。例如,当 MES 土壤的孔隙度从 44.5% 增加到 51.3% 时,系统中的氧和质子的运输和电荷的输出被促进,最终促进了石油烃的降解<sup>[71]</sup>。

除此以外,仍有许多因素会影响 MES 的修复性能,包括温度、微生物种类、有机物和营养元素等<sup>[95]</sup>。因此,在应用 MESs 之前,必须对土壤的性质进行详细分析。

### 2.1.2 MES 系统自身影响

MES 是石油烃污染土壤修复的直接执行部分,其本身结构和各组成部分性质都会影响修复性能<sup>[25,96]</sup>。与水系统不同,土壤生物修复的主要挑战是电子受体的匮乏和电子传递的低效<sup>[15]</sup>。而通过优化 MESs 的构型则能够很好地解决这一问题。通过调整 MESs 的电极位置,将阴极放置于覆盖的水层中能够提供更多的电子受体以保证修复效率,但是可能会存在电极距离较远而使得系统内阻偏高、氧气在水中的溶解度低等问题<sup>[97-98]</sup>。空气阴极 MES 通过将阴极直接与氧气接触能够将具有相对较高氧化电位的 O<sub>2</sub> 作为整个系统的电子受体,并且具有相对简单结构和较低的成本<sup>[36,99]</sup>。而该构型也被证明能够有效地对土壤中石油烃类污染物进行去除,Li 等<sup>[45]</sup>使用空气阴极 MFC 对污染土壤进行修复,运行 163d 后,土壤中菲的浓度从 100mg/kg 下降到 13mg/kg。但是,该构型仍有不足之处。例如,该构型中的电极间隔较大而导致的高内阻、阴极发生反应速率较慢必须使用催化剂以及阳极微生物活性由于没有 PEM 而受到限制等<sup>[73]</sup>。

由于阴极和阳极是 MES 的两个基本组成部分,还是微生物群落的生长和附着的主要场地,所以电极的排列和材料对土壤修复的性能起着决定性的作用<sup>[100-101]</sup>。电极的合理布置不仅能够减少反应器中的传质阻力,还能够增加阴极上的投影面积,从而提高降解性能<sup>[102]</sup>。同样,对于阴极来说,电极的合理布置,能够增加系统与电子受体的接触,进而提高修复效率<sup>[103]</sup>。除了电极布置,高效的土壤修复效率还需要选择合适的电极材料。一般来说,由于不同的电

极材料在理化性质(如表面积、电导率、稳定性和生物相容性)上有所不同,它们在微生物群落的适应和筛选、电子传递、内阻和电极表面反应方面也有所不同<sup>[104-105]</sup>.具体来说,阳极材料决定了电极的导电性和阳极接收传递电子的速率.此外,阳极的表面结构也是底物和代谢物传质中的主要影响因素之一<sup>[41,100,106]</sup>.理想的阳极材料应具有较强的生物相容性、较大的比表面积、较高的机械强度、低成本、抗腐蚀和优良的导电性等特性<sup>[107-109]</sup>.虽然金属在众多材料中表现出良好的导电性,但金属的光滑表面不利于微生物的粘附.而且金属材料容易腐蚀,成本相对较高,导致应用受到限制<sup>[100]</sup>.目前,MES 中最通用的阳极材料是碳基材料,其材质的特点使其能够很好地融入环境介质,在场地修复中很有前景<sup>[110]</sup>.阴极中电子受体是否充足也是一个关键限制因素.因此,阴极材料的选择也会影响 MES 的修复性能<sup>[110]</sup>.阴极材料还会直接影响着阴极室中反应的动力学(例如 MFC 中的氧还原反应).一般,阴极材料的选择与阳极的选择相似,大多数使用碳质材料<sup>[111]</sup>.此外,由于不锈钢材料具备高导电性、机械强度高和成本低而被广泛用于 MES<sup>[112]</sup>.不锈钢材料也可以作为 MES 中复合电极的骨架.例如,通过辊压法制成的以不锈钢网为骨架的空气阴极已被证明能够应用于石油烃污染土壤修复<sup>[113]</sup>.

## 2.2 MES 修复性能强化途径

在石油烃污染土壤修复中,最关键的强化方式主要包括:增加系统电子受体、提高传质能力以及提高电子传递能力<sup>[40]</sup>.基于上述影响因素的分析,本节重点讨论具体强化方法.

**2.2.1 优化土壤性质** 对于特定的土壤类型,有机物含量和颗粒大小等参数基本上固定,而通过调整包括土壤电导率、土壤含水量和孔隙度等参数以提高修复性能则是可行的<sup>[94,114-115]</sup>.研究表明,通过向污染土壤中添加特定物质,能够很大程度的改善土壤的性质,有利于提升 MES 的修复性能,主要包括碳纤维<sup>[116]</sup>、生物炭<sup>[94]</sup>、表面活性剂<sup>[115]</sup>以及沙子<sup>[71]</sup>等.而添加的材料主要通过增强传质、降低内阻或促进微生物生命活动从而增强 MES 土壤修复效率.

碳纤维作为一种导电材料,不仅能够用作 MES 的电极材料,而且还能够作为外源物质添加至土壤中促进石油烃类污染物的去除<sup>[113]</sup>.在 Li 等人的研究

中<sup>[116]</sup>,通过在石油烃污染土壤中添加碳纤维,使得系统的内阻降低了 58%,经过一段时间运行后,与不加碳纤维和开路控制的 MES 相比,添加碳纤维的 MES 对石油烃的去除效率提高了 100%,同时,系统的有效修复距离也扩展到 20cm,是不含碳纤维 MES 的 3.3 倍.而且,修复完成后碳纤维可以很容易地从修复的土壤中分离出来,有利于降低实际应用中的成本.生物炭具有成本低、导电性高、结构多孔等优点,可促进电子转移,富集更多功能微生物<sup>[117-119]</sup>.在 Li 等<sup>[94]</sup>的研究中,使用生物炭对土壤进行改良,结果表明,生物炭的加入提高了石油烃的降解能力,比未添加生物炭的 MES 的降解率提高了 17%,而这是由于生物炭的添加对系统中的微生物群落进行了选择性富集.生物炭改良不仅可以提高土壤中污染物的去除率,还可以与系统中的微生物共同构建导电网络以增加电子传递的效率,进而促进微生物的新陈代谢和修复性能<sup>[59]</sup>.同样,在土壤中添加表面活性剂也能够刺激特定微生物的生长,在 Li 等<sup>[120]</sup>的研究中,由于添加了表面活性剂,部分功能性微生物的生命活动被促进以强化了微生物建立的电代谢网络,使得系统的石油烃去除效率较未添加表面活性剂的 MES 增加了 328%.通过在污染土壤中加入与土壤性质不同的沙子,可以扩大受污染土壤的孔隙,以形成更多的通道,以实现土壤传质的强化和系统内阻的降低<sup>[71]</sup>.例如,在用沙子修正土壤的 MES 中,石油烃的去除效率达到 22%,比未添加沙子的 MES 提高了 84%.此外,通过向 MES 中添加易生物降解碳源能够促进系统中的电子转移并且提高相关氧化酶的活性,进而提升修复效率<sup>[121]</sup>.如上所述,土壤的高含水率可以促进污染物的降解.因此,在生物修复过程中,通过使用外源物质尽量减少土壤水的蒸发来提高污染物的去除效率将是一个有效的策略<sup>[114]</sup>. Wang 等<sup>[122]</sup>在 MES 阳极周围设置了土壤-聚丙烯酰胺水凝胶(SHB)或石墨颗粒-聚丙烯酰胺水凝胶(GHB)的保湿层,结果表明阳极周围的保湿层可以大大延长和提高土壤中的碳氢化合物降解.与其他反应器相比,添加 SHB 的反应器的发电量和总石油烃的去除率分别提高了 43%~100% 和 164%.

通过添加外源物质以改变土壤性质可以有效地提高 MESs 的修复效率.但是,许多因素仍需要被考虑,包括成本、毒性以及可回收性,从而更加符合

碳中和背景下修复技术的要求。

**2.2.2 合理的MES构型** 常规的双室MFC以及单室空气阴极MFC是研究最为广泛的石油烃污染土壤修复系统<sup>[15]</sup>。而研究人员为了追求更为绿色高效的修复系统,开发了多种新型MES修复系统。为了解决传统MFC内阻大以及难以实现原位修复的困难,管状插入式空气阴极MFC被成功构建<sup>[78,98,123]</sup>。这种构型通常是通过将由分离器分隔的阳极和阴极层的组件包裹在一个管子上而构成的,其中阴极层向内暴露在空气中以提供电子受体,而阳极则向外暴露在周围的污染土壤/沉积物中<sup>[60,124]</sup>。这种配置可以在很大程度上减少MES的内阻,从而促进电子转移以及质量传递<sup>[15]</sup>。Lu等<sup>[125]</sup>已经证明了这种构型能够高效地处理石油污染土壤,在其研究中,管状插入式空气阴极MFC被放置在到水饱和的石油污染土壤中,经过64d的修复后,总石油烃的降解效率达79%,是开路对照的2倍。除了增加石油烃的去除率,Lu等<sup>[70]</sup>还证明了这种配置对系统的有效修复半径也有明显改善,通过应用该构型MFC,经过120d修复后,在1~34cm的影响半径内,90%的石油烃污染物被去除。而且,就石油烃去除而言,该构型MFC的影响半径(90~300cm)是管半径的11~12倍,显示了在原位生物修复方面的巨大应用潜力。由于U形结构的MES已被证明具有空气流通性好以及低内阻的优势<sup>[126]</sup>,所以,Wang等<sup>[68]</sup>将这种结构应用于土壤修复。经过25d的运行,靠近阳极(<1cm)的石油烃类污染物的降解效率从7%提高到15%,提高了120%。此外,这种配置明显加速了两个阳极层之间的夹层土壤中石油烃的降解,同时增强了阳极侧面土壤中污染物的降解。

除了应用MFC之外,目前也有研究者将MEC应用在石油烃污染土壤的修复当中,Zhang等<sup>[56]</sup>采用0.7V的弱电压以富集和稳定土壤微生物群落,经过42d的修复,土壤中的石油烃去除效率达到了21%,在达到相同修复效率的前提下,相比MFC实现了更快的石油烃修复周期<sup>[121]</sup>。

**2.2.3 合适的电极材料及布置** 碳基材料(如碳布、碳网、石墨毡、石墨板和颗粒活性碳等)电极虽然已被证明能够有效去除土壤中石油烃,但它们具有明显的优点和缺点<sup>[40]</sup>。例如,碳布相对较高的成本、活性炭相对较低的电导率以及石墨板的低表面

积等<sup>[127-128]</sup>。因此,新型电极材料的研发也是目前的热点之一。两种碳基材料的结合可以使其优势最大化,在Liang等<sup>[129]</sup>的研究中构建了碳纳米管修饰碳毡的MFC阳极并且取得了80%的菲去除率,是使用未修饰电极MFC的2倍。使用其他材料对碳材料进行修饰也是提高修复效率的一种方法,Yu等<sup>[130]</sup>通过使用Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>和膨润土-Fe对碳毡阳极进行了修饰并应用于污染土壤修复中,在使用碳毡、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>修饰碳毡和膨润土-Fe修饰碳毡的MFCs中,土壤中石油烃的降解效率分别达到了27%、28%和31%,表明使用修饰阳极的MFC中的修复效率明显提高,而这是由于使用修饰电极的MFC具有更高的电化学活性、更低的内阻和更有效的电子转移。

除了选择有效的电极材料外,还可以设计合理的电极排列以强化MES对污染土壤的修复<sup>[131]</sup>。Zhang等<sup>[102]</sup>在底部有空气阴极的MFCs中以两种不同的方式(水平或垂直)排列了多个阳极,并比较了它们对土壤中石油烃的去除性能。135d后,水平排列的多阳极MFCs去除了13%的石油烃,比垂直排列的多阳极MES高出51%,比断开的对照组高出95%。这主要是由于多阳极水平排列的MES可以减少反应器中的传质阻力,从而提高降解性能。合理的布置电极排列还能够扩大MESs对石油烃污染土壤的修复范围,Li等<sup>[132]</sup>设计了具有多电极的MFCs,其三层阳极被平行地插入污染的土壤中。结果显示,与开路对照组相比,每层的石油烃降解速度都在加快,而石油烃的净降解率则达到了18%。同样,缩短电极间隔也被证明能够有效地强化土壤修复效率,在Yu等<sup>[63]</sup>的研究中使用不同电极距离的MFC对土壤进行修复,结果表明电极间距为4cm的MFSs对蒽的去除率最高(34%),是电极间距为6,8,10cm的MESs去除率的1.1、1.8、1.5倍,这主要是因为电极间距的减少会降低MFCs中的电阻并且刺激微生物增加其代谢反应速率,这有利于电子从阳极到阴极的转移,从而导致电子转移速率的增加。

**2.2.4 多技术联用** 与其他修复技术联用以发挥各自的优势形成互补也是提高MES修复效率的有效策略之一<sup>[133-134]</sup>。各种耐油植物(如黑麦草、紫花苜蓿、鸢尾)已经被证明拥有吸收和积累碳氢化合物以净化土壤的能力<sup>[135]</sup>。植物根系的分泌物能够为微生物的生长提供营养,而微生物则能够将石油碳氢化

合物代谢成容易被植物吸收的小分子,以减轻其毒性压力<sup>[136]</sup>.因此,植物根系和根际微生物群落之间能够形成具备有机物降解、吸收和稳定的共生系统以实现土壤修复<sup>[137-138]</sup>.通过将植物与 MES 整合以修复石油烃污染土壤,不仅能够利用植物-微生物之间的关系将太阳能转化为生物电,而且还能原位修复石油烃污染土壤<sup>[139]</sup>.植物 MES 的创新之处在于植物有能力通过光合作用利用 CO<sub>2</sub>以分泌根部有机物,并且将这些有机物质运送到土壤中为微生物群落提供更多营养物质,还能够有效缓解石油烃污染物对其毒害作用<sup>[139-141]</sup>.此外,植物的蒸腾作用可以增强物质的流动性,进而促进土壤中的传质<sup>[133]</sup>.因此,植物的应用不仅增加了 MES 中生物可利用有机物,而且还大大改善了 MES 中的质量传递.植物的光合作用还能够增加整个系统中的氧气以提供更多的电子受体<sup>[142-143]</sup>.植物 MES 也已经被证明能够有效地在石油烃污染土壤修复过程中起到作用,在 Zhang 等<sup>[56]</sup>的研究中首次使用了植物-MEC 以修复有机污染土壤,在 42d 的运行时间里,21% 的总石油烃被有效去除,而自然衰减和仅使用植物的仅达到了 4% 和 9%.这主要是由于 MES 与植物-微生物共生修复系统的结合,充分整合了根际降解微生物(将复杂污染物转化为小分子物质)、电活性微生物(通过外部电极消耗碳氢化合物代谢产物)和植物根际(分泌微生物营养物质和吸收碳氢化合物分子)的功能.在此基础上,Zhang 等<sup>[87]</sup>还通过在系统中添加导电磁铁矿,以增强修复效率与对照组(PCK)相比,总石油烃增加了 174%~232%.这主要是由于磁铁矿的加入与外电极形成了导电网络,并通过异化铁还原、种间直接电子传递和长距离电子传递,增强了微生物种间互作,减少了系统中的电子积累,最终强化石油烃去除.

将一些物理方法与 MES 相结合也可以提高污染物的去除效率渗透性反应屏障(PRBS)具有隔离、捕获和去除污染物的能力,因此 PRBS 作为一种物理方法被广泛用于土壤的原位修复<sup>[144]</sup>.通过结合渗透性反应屏障和 MESs(PRBS-MESs),土壤中的污染物可以在电极附近被拦截并进一步去除.应用于渗透性反应屏障的多孔电极材料也可以促进微生物的附着和生长.此外,被拦截的污染物可以被富集的微生物降解<sup>[145]</sup>.例如,Liang 等<sup>[134]</sup>构建了一个带有多孔

石墨毡阳极的 PRBs-MESs 来去除土壤中的苯并[a]芘.在他们的研究中,苯并[a]芘的去除效率达到 57%,是开路的控制反应器的 1.3 倍,而该系统的高效降解主要归功于多孔阳极的物理吸附、微生物的厌氧生物降解和阳极上的生物电化学降解.

MES 修复效率的影响因素多种多样,因此,为了保证其修复效率,在应用该系统之前,必须对土壤的属性进行详细分析,需要有针对性的设计系统的构型和选择电极材料,有必要在实际应用中综合考虑它们之间的关系,从而找到更具成本效益和修复效率的修复系统.

### 3 展望和结论

目前,MESs 已经展示了其在石油烃污染土壤修复方面的优势,为土壤修复提供了一个灵活、可持续和生态友好的解决方案,并且不会影响修复后土地的使用,被认为是碳中和背景下能够较好实现减污降碳的低碳可持续原位修复技术.但新技术的发展往往需要长时间的检验与优化,在 MESs 大规模投入土壤修复应用之前,仍有许多挑战需要克服.

首先,现阶段的 MES 在土壤中的应用大多数都停留在实验室或者中试规模阶段,而在复杂的地理和自然环境(如不可控的温度、多变的气候等)下的研究有限,距离实际大规模应用仍有一段距离<sup>[146]</sup>.虽然研究人员已经通过多种途径解决这一问题,例如扩大单个 MES 的尺寸、堆叠多个 MES 以及布设多个 MES 等,但这也会使得整个修复系统内阻增大以及成本剧增等问题.因此,未来应用中必须合理选择 MESs 构型和电极安排,以适应不同深度、范围、污染土壤类型和其他物理化学参数.将 MESs 与其他技术相结合同样也可以提高场地修复效率,组合技术将弥补单一技术的不足,具有广阔的应用前景.对于现场测试来说,MESs 的现场安装和维护也被证明是实际应用的一个障碍<sup>[67]</sup>.因此,MESs 现场应用的长期稳定性也是值得研究的问题之一.

其次,功能性微生物作为 MES 系统的核心,其稳定快速的富集、驯化和稳定是决定修复性能好坏的关键,一般来说,污染物的去除需要 MES 中不同功能的微生物群落进行不同微生物活动才能够完成<sup>[147]</sup>.但是,目前很少有研究报道 MESs 在生物修复期间的微生物群落的组成和变化.在未来的研究中,需要

更加关注 MESs 运行前后的微生物群落变化和组成,及时更新修复场地微生物信息,甚至可以通过研发和添加特定微生物菌剂以强化修复性能.同样,对于生物修复,需要特定的微生物来修复不同污染物的土壤,但特定微生物可能存在耐受性差难以存活,对此则可以通过基因工程对微生物进行改造使其更好地适应环境.电活性微生物在 MESs 中也发挥着重要作用,有必要进一步了解其代谢机制和电子转移机制,以更好地控制微生物活性从而提高污染物处理能力.

土壤的复合污染也是目前存在的难题之一,而大多数研究集中在去除单一污染物或同一类型的混合污染物.因此,污染物是作为电子受体还是电子供体被去除,以及不同污染物对微生物的毒性需要仔细研究.同时,污染场地存在污染物类型以及浓度的预先调查也是重点之一.

最后,加快发展绿色低碳高效修复,要构建绿色可持续修复分析框架和评价指标体系.为了满足碳中和时代的要求和发展,对 MESs 进行生命周期评估,以确定整个生命周期地环境性能和最可持续的处理方案也必不可少.而目前在此方面的研究仍为空缺,所以应进一步研究 MESs 修复石油烃污染土壤中使用的材料、损害评估(如人类健康、生态系统、资源)以及投入产出清单(如空气、水、土壤、原材料等).

除了这些之外,还有很多问题值得探索,例如开发新型低成本耐腐蚀电极以及易安装 MES 构型等,然而,尽管存在上述问题,MES 仍然是一种适用于土壤修复的生态友好技术.将这一技术从实验室试验转向现场应用,仍需克服许多重大的技术、经济和环境障碍.未来的研究应该集中在 3 个主要领域,即微生物、反应器(电极和配置)和实际应用.总之,任何技术的发展都不是一蹴而就的,MES 作为跨学科技术之一,需要多学科多技术交叉融合才能够不断优化和改进并投入实际应用.

## 参考文献:

- [1] Zhao X, Ma X, Chen B, et al. Challenges toward carbon neutrality in China: Strategies and countermeasures [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2022,176:105959.
- [2] Watts N, Adger W N, Agnolucci P, et al. Health and climate change: policy responses to protect public health [J]. The Lancet, 2015,386 (10006):1861–1914.
- [3] Parmesan C, Yohe G. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems [J]. Nature, 2003,421(6918):37–42.
- [4] Tozer L, Klenk N. Discourses of carbon neutrality and imaginaries of urban futures [J]. Energy Research & Social Science, 2018,35:174–181.
- [5] Hao X, Liu R, Huang X. Evaluation of the potential for operating carbon neutral WWTPs in China [J]. Water Research, 2015,87:424–431.
- [6] 周启星,李晓晶,欧阳少虎.关于“碳中和生物”环境科学的新概念与研究展望 [J]. 农业环境科学学报, 2022,41(1):1–9.  
Zhou Q, Li X, Ouyang S. Carbon-neutral organisms as the new concept in environmental sciences and research prospects [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022,41(1):1–9.
- [7] 李瑞祥,王鑫,李田.低碳污水微生物氮转化工艺研究进展 [J]. 工业水处理, 2022,42(6):22–32.  
Li R, Wang X, Li T. Research progress on the microbial technology of nitrogen transformation from low carbon wastewater [J]. Industrial water treatment, 2022,42(6):22–32.
- [8] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century [J]. Science, 2015,348(6235):1261071.
- [9] Guerra C A, Berdugo M, Eldridge D J, et al. Global hotspots for soil nature conservation [J]. Nature, 2022,610(7933):693–698.
- [10] Bossio D A, Cook-Patton S C, Ellis P W, et al. The role of soil carbon in natural climate solutions [J]. Nature Sustainability, 2020,3(5): 391–398.
- [11] Cox P M, Betts R A, Jones C D, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model [J]. Nature, 2000,408(6809):184–187.
- [12] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. Science, 2004,304(5677):1623–1627.
- [13] Li D, Xu W, Mu Y, et al. Remediation of petroleum-contaminated soil and simultaneous recovery of oil by fast pyrolysis [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(9):5330–5338.
- [14] 展海银,周启星.胜利油田石油开采场污染特征、源汇关系与管控对策 [J/OL]. 生态学杂志: 1–12 [2023–04–18].  
Zhan H, Zhou Q. Pollution characteristics, source-sink relationship and control countermeasures in Shengli Oilfield [J]. Chinese Journal of Ecology, 1–12 [2023–04–18].
- [15] Wu Y, Jing X, Gao C, et al. Recent advances in microbial electrochemical system for soil bioremediation [J]. Chemosphere, 2018,211:156–163.
- [16] He Y, Zhou Q, Mo F, et al. Bioelectrochemical degradation of petroleum hydrocarbons: A critical review and future perspectives [J]. Environmental Pollution, 2022,306:119344.
- [17] Huang Y, Pan H, Wang Q, et al. Enrichment of the soil microbial community in the bioremediation of a petroleum-contaminated soil amended with rice straw or sawdust [J]. Chemosphere, 2019,224:265–271.
- [18] Wang H, Lu L, Chen H, et al. Molecular transformation of crude oil contaminated soil after bioelectrochemical degradation revealed by FT-ICR mass spectrometry [J]. Environmental Science & Technology, 2020,54(4):2500–2509.
- [19] Logan B E, Rabaei K. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies [J]. Science, 2012,337(6095):686–690.

- [20] Wang H, Ren Z J. A comprehensive review of microbial electrochemical systems as a platform technology [J]. *Biotechnology Advances*, 2013,31(8):1796–1807.
- [21] Cheng S, Logan B E. Sustainable and efficient biohydrogen production via electrohydrogenesis [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2007,104(47):18871–18873.
- [22] Wu D, Sun F, Zhou Y. Degradation of chloramphenicol with novel metal foam electrodes in bioelectrochemical systems [J]. *Electrochimica Acta*, 2017,240:136–145.
- [23] Huang L, Cheng S, Chen G. Bioelectrochemical systems for efficient recalcitrant wastes treatment [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2011,86(4):481–491.
- [24] Rabaei K, Rozendal R A. Microbial electrosynthesis—revisiting the electrical route for microbial production [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2010,8(10):706–716.
- [25] Santoro C, Babanova S, Cristiani P, et al. How comparable are microbial electrochemical systems around the globe? An electrochemical and microbiological cross-laboratory study [J]. *ChemSusChem*, 2021,14(11):2267–2267.
- [26] Wang X, Aulenta F, Puig S, et al. Microbial electrochemistry for bioremediation [J]. *Environmental Science and Ecotechnology*, 2020, 1:100013.
- [27] Fan Y, Tang Q, Li F, et al. Enhanced bioreduction of radionuclides by driving microbial extracellular electron pumping with an engineered CRISPR platform [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(17):11997–12008.
- [28] Logan B E. Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2009,7(5):375–381.
- [29] Koch C, Harnisch F. Is there a specific ecological niche for electroactive microorganisms? [J]. *ChemElectroChem*, 2016,3(9): 1282–1295.
- [30] Borole A P, Reguera G, Ringeisen B, et al. Electroactive biofilms: Current status and future research needs [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011,4(12):4813–4834.
- [31] Lovley D R. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006,4(7):497–508.
- [32] Marsili E, Baron D B, Shikhare I D, et al. *Shewanella* secretes flavins that mediate extracellular electron transfer [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008,105(10):3968–3973.
- [33] Liu H, Ramnarayanan R, Logan B E. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004,38(7):2281–2285.
- [34] McLean J S, Wanger G, Gorby Y A, et al. Quantification of electron transfer rates to a solid phase electron acceptor through the stages of biofilm formation from single cells to multicellular communities [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010,44(7):2721–2727.
- [35] Kumar A, Hsu L H Kavanagh P, et al. The ins and outs of microorganism-electrode electron transfer reactions [J]. *Nature Reviews Chemistry*, 2017,1(3):0024.
- [36] Liu H, Logan B E. Electricity generation using an air-cathode single chamber microbial fuel cell in the presence and absence of a proton exchange membrane [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004,38(14):4040–4046.
- [37] Wang X, Rossi R, Yan Z, et al. Balancing water dissociation and current densities to enable sustainable hydrogen production with bipolar membranes in microbial electrolysis cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,53(24):14761–14768.
- [38] Zahid M, Savla N, Pandit S, et al. Microbial desalination cell: Desalination through conserving energy [J]. *Desalination*, 2022,521:115381.
- [39] Gharbi R, Gomez Vidales A, Omanovic S, et al. Mathematical model of a microbial electrosynthesis cell for the conversion of carbon dioxide into methane and acetate [J]. *Journal of CO<sub>2</sub> Utilization*, 2022, 59:101956.
- [40] Li R, Wang J, Li T, et al. Recent advances in improving the remediation performance of microbial electrochemical systems for contaminated soil and sediments [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2023,53(1):137–160.
- [41] Logan B E, Hamelers B, Rozendal R, et al. Microbial fuel cells: Methodology and technology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006,40(17):5181–5192.
- [42] Li M, Zhou M, Tian X, et al. Microbial fuel cell (MFC) power performance improvement through enhanced microbial electrogenicity [J]. *Biotechnology Advances*, 2018,36(4):1316–1327.
- [43] Ma J, Zhang Q, Chen F, et al. Simultaneous removal of copper and biodegradation of BDE-209 with soil microbial fuel cells [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021,9(4):105593.
- [44] 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*, 2012,199–200:217–225.
- [45] Li X, Zhang X, Chen X, et al. Effect of introduced-electrode on phenanthrene degradation in the soil microbial electrochemical remediation [J]. *International Journal of Energy Research*, 2021,45(3): 4681–4693.
- [46] Rossi R, Baek G, Logan B E. Vapor-fed cathode microbial electrolysis cells with closely spaced electrodes enables greatly improved performance [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022,56(2): 1211–1220.
- [47] Liu H, Grot S, Logan B E. Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005,39(11):4317–4320.
- [48] Lu L, Ren Z J. Microbial electrolysis cells for waste biorefinery: A state of the art review [J]. *Bioresource Technology*, 2016,215:254–264.
- [49] Tang J, Bian Y, Jin S, et al. Cathode material development in the past decade for H<sub>2</sub> production from microbial electrolysis cells [J]. *ACS Environmental Au*, 2022,2(1):20–29.
- [50] Kong F, Ren H, Pavlostathis S G, et al. Overview of value-added products bioelectrosynthesized from waste materials in microbial electrosynthesis systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020,125:109816.
- [51] Rabaei K, Rodríguez J, Blackall L L, et al. Microbial ecology meets electrochemistry: electricity-driven and driving communities [J]. *The ISME Journal*, 2007,1(1):9–18.
- [52] O'Toole G, Kaplan H B, Kolter R. Biofilm formation as microbial development [J]. *Annual Review of Microbiology*, 2000,54(1):49–79.
- [53] Li T, Li R, Zhou Q. The application and progress of

- bioelectrochemical systems (BESs) in soil remediation: A review [J]. *Green Energy & Environment*, 2021,6(1):50–65.
- [54] Velasquez-Orta S B, Werner D, Varia J C, et al. Microbial fuel cells for inexpensive continuous in-situ monitoring of groundwater quality [J]. *Water Research*, 2017,117:9–17.
- [55] Li T, Wang X, Zhou Q, et al. Swift acid rain sensing by synergistic rhizospheric bioelectrochemical responses [J]. *ACS Sensors*, 2018,3(7):1424–1430.
- [56] Zhang X, Li R, Song J, et al. Combined phyto-microbial-electrochemical system enhanced the removal of petroleum hydrocarbons from soil: A profundity remediation strategy [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,420:126592.
- [57] Shanthi Sravan J, Tharak A, Annie Modestra J, et al. Emerging trends in microbial fuel cell diversification—Critical analysis [J]. *Bioresource Technology*, 2021,326:124676.
- [58] Venkata Mohan S, Velvizhi G, Annie Modestra J, et al. Microbial fuel cell: Critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014,40:779–797.
- [59] Cai X, Yuan Y, Yu L, et al. Biochar enhances bioelectrochemical remediation of pentachlorophenol-contaminated soils via long-distance electron transfer [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 391:122213.
- [60] Li X, Wang X, Weng L, et al. Microbial fuel cells for organic-contaminated soil remedial applications: A Review [J]. *Energy Technology*, 2017,5(8):1156–1164.
- [61] Megharaj M, Ramakrishnan B, Venkateswarlu K, et al. Bioremediation approaches for organic pollutants: A critical perspective [J]. *Environment International*, 2011,37(8):1362–1375.
- [62] Yao Z, Li J, Xie H, et al. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012,16:722–729.
- [63] Yu B, Tian J, Feng L. Remediation of PAH polluted soils using a soil microbial fuel cell: Influence of electrode interval and role of microbial community [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017,336:110–118.
- [64] 周启星.污染土壤修复的技术再造与展望 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2002,(8):36–40.  
Zhou Q. Technological reforger and prospect of contaminated soil remediation [J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2002,(8):36–40.
- [65] Ye S, Zeng G, Wu H, et al. Co-occurrence and interactions of pollutants, and their impacts on soil remediation—A review [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2017, 47(16):1528–1553.
- [66] Casula E, Kim B, Chesson H, et al. Modelling the influence of soil properties on performance and bioremediation ability of a pile of soil microbial fuel cells [J]. *Electrochimica Acta*, 2021,368:137568.
- [67] Abbas S Z, Rafatullah M. Recent advances in soil microbial fuel cells for soil contaminants remediation [J]. *Chemosphere*, 2021,272:129691.
- [68] Wang X, Cai Z, Zhou Q, et al. Bioelectrochemical stimulation of petroleum hydrocarbon degradation in saline soil using U-tube microbial fuel cells [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2012, 109(2):426–433.
- [69] Zhang T, Gannon S M, Nevin K P, et al. Stimulating the anaerobic degradation of aromatic hydrocarbons in contaminated sediments by providing an electrode as the electron acceptor [J]. *Environmental Microbiology*, 2010,12(4):1011–1020.
- [70] Lu L, Yazdi H, Jin S, et al. Enhanced bioremediation of hydrocarbon-contaminated soil using pilot-scale bioelectrochemical systems [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014,274:8–15.
- [71] Li X, Wang X, Ren Z J, et al. Sand amendment enhances bioelectrochemical remediation of petroleum hydrocarbon contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2015,141:62–70.
- [72] Borello D, Gagliardi G, Aimola G, et al. Use of microbial fuel cells for soil remediation: A preliminary study on DDE [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021,46(16):10131–10142.
- [73] Wang H, Li L, Cao X, et al. Enhanced degradation of atrazine by soil microbial fuel cells and analysis of bacterial community structure [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017,228(8):308.
- [74] Li X, Li Y, Zhao X, et al. Restructured fungal community diversity and biological interactions promote metolachlor biodegradation in soil microbial fuel cells [J]. *Chemosphere*, 2019,221:735–749.
- [75] Li X, Li Y, Zhang X, et al. The metolachlor degradation kinetics and bacterial community evolution in the soil bioelectrochemical remediation [J]. *Chemosphere*, 2020,248:125915.
- [76] Zhao X, Li X, Li Y, et al. Metagenomic analysis reveals functional genes in soil microbial electrochemical removal of tetracycline [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,408:124880.
- [77] Zhao X, Li X, Li Y, et al. Shifting interactions among bacteria, fungi and archaea enhance removal of antibiotics and antibiotic resistance genes in the soil bioelectrochemical remediation [J]. *Biotechnology for Biofuels*, 2019,12(1):160.
- [78] Huang D, Zhou S, Chen Q, et al. Enhanced anaerobic degradation of organic pollutants in a soil microbial fuel cell [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011,172(2):647–653.
- [79] Cao X, Song H, Yu C, et al. Simultaneous degradation of toxic refractory organic pesticide and bioelectricity generation using a soil microbial fuel cell [J]. *Bioresource Technology*, 2015,189:87–93.
- [80] Wang H, Cao X, Li L, et al. Augmenting atrazine and hexachlorobenzene degradation under different soil redox conditions in a bioelectrochemistry system and an analysis of the relevant microorganisms [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147:735–741.
- [81] Zhao L, Deng J, Hou H, et al. Investigation of PAH and oil degradation along with electricity generation in soil using an enhanced plant-microbial fuel cell [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,221: 678–683.
- [82] Domínguez-Garay A, Boltes K, Esteve-Núñez A. Cleaning-up atrazine-polluted soil by using microbial electroremediating cells [J]. *Chemosphere*, 2016,161:365–371.
- [83] Rodrigo Quejigo J, Domínguez-Garay A, Dörfler U, et al. Anodic shifting of the microbial community profile to enhance oxidative metabolism in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018,116:131–138.
- [84] Habibul N, Hu Y, Sheng G. Microbial fuel cell driving electrokinetic remediation of toxic metal contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016,318:9–14.

- [85] Cheng Y, Wang L, Faustorilla V, et al. Integrated electrochemical treatment systems for facilitating the bioremediation of oil spill contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2017,175:294–299.
- [86] Zhang J, Cao X, Wang H, et al. Simultaneous enhancement of heavy metal removal and electricity generation in soil microbial fuel cell [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020,192:110314.
- [87] Zhang X, Li R, Wang J, et al. Construction of conductive network using magnetite to enhance microflora interaction and petroleum hydrocarbons removal in plant–rhizosphere microbial electrochemical system [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022,433:133600.
- [88] Wang H, Xing L, Zhang H, et al. Key factors to enhance soil remediation by bioelectrochemical systems (BESs): A review [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021,419:129600.
- [89] Mao D, Lu L, Revil A, et al. Geophysical monitoring of hydrocarbon-contaminated soils remediated with a bioelectrochemical system [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016,50(15):8205–8213.
- [90] Budihardjo M A, Syafrudin, Effendi A J, et al. Waste valorization using solid-phase microbial fuel cells (SMFCs): Recent trends and status [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021,277:111417.
- [91] Rousk J, Bååth E, Brookes P C, et al. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil [J]. *The ISME Journal*, 2010,4(10):1340–1351.
- [92] Wang C, Liao F, Liu K. Electrical analysis of compost solid phase microbial fuel cell [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013,38(25):11124–11130.
- [93] Samouëlian A, Cousin I, Tabbagh A, et al. Electrical resistivity survey in soil science: a review [J]. *Soil and Tillage Research*, 2005,83(2):173–193.
- [94] Li X, Li Y, Zhang X, et al. Long-term effect of biochar amendment on the biodegradation of petroleum hydrocarbons in soil microbial fuel cells [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,651:796–806.
- [95] Zhao Q, Yu H, Zhang W, et al. Microbial fuel cell with high content solid wastes as substrates: a review [J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2017,11(2):13.
- [96] Flimban S, Ismail I, Kim T, et al. Overview of recent advancements in the microbial fuel cell from fundamentals to applications: Design, major elements, and scalability [J]. *2019,12(17):3390*.
- [97] Rezaei F, Richard T L, Brennan R A, et al. Substrate-enhanced microbial fuel cells for improved remote power generation from sediment-based systems [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007,41(11):4053–4058.
- [98] Yuan Y, Zhou S, Zhuang L. A new approach to in situ sediment remediation based on air–cathode microbial fuel cells [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010,10(7):1427–1433.
- [99] Park D H, Zeikus J G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2003,81(3):348–355.
- [100] Yu B, Feng L, He Y, et al. Effects of anode materials on the performance and anode microbial community of soil microbial fuel cell [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,401:123394.
- [101] 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.
- [102] Zhang Y, Wang X, Li X, et al. Horizontal arrangement of anodes of microbial fuel cells enhances remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015,22(3):2335–2341.
- [103] He Z, Shao H, Angenent L T. Increased power production from a sediment microbial fuel cell with a rotating cathode [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2007,22(12):3252–3255.
- [104] Cai T, Meng L, Chen G, et al. Application of advanced anodes in microbial fuel cells for power generation: A review [J]. *Chemosphere*, 2020,248:125985.
- [105] Zhou M, Chi M, Luo J, et al. An overview of electrode materials in microbial fuel cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2011,196(10):4427–4435.
- [106] Chen S, Patil S, Brown R, et al. Strategies for optimizing the power output of microbial fuel cells: Transitioning from fundamental studies to practical implementation [J]. *Applied Energy*, 2019,233–234:15–28.
- [107] Santoro C, Arbizzani C, Erable B, et al. Microbial fuel cells: From fundamentals to applications. A review [J]. *Journal of Power Sources*, 2017,356:225–244.
- [108] Rinaldi A, Mecheri B, Garavaglia V, et al. Engineering materials and biology to boost performance of microbial fuel cells: a critical review [J]. *Energy & Environmental Science*, 2008,1(4):417–429.
- [109] Guo K, Prévost A, Patil S, et al. Engineering electrodes for microbial electrocatalysis [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2015, 33:149–156.
- [110] Sun G, Thygesen A, Ale M T, et al. The significance of the initiation process parameters and reactor design for maximizing the efficiency of microbial fuel cells [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2014,98(6):2415–2427.
- [111] Qiu S, Guo Z, Naz F, et al. An overview in the development of cathode materials for the improvement in power generation of microbial fuel cells [J]. *Bioelectrochemistry*, 2021,141:107834.
- [112] Dumas C, Mollica A, Féron D, et al. Marine microbial fuel cell: Use of stainless steel electrodes as anode and cathode materials [J]. *Electrochimica Acta*, 2007,53(2):468–473.
- [113] Li X, Wang X, Zhang Y, et al. Salinity and conductivity amendment of soil enhanced the bioelectrochemical degradation of petroleum hydrocarbons [J]. *Scientific Reports*, 2016,6(1):32861.
- [114] Domínguez-Garay A, Berná A, Ortiz-Bernad I, et al. Silica colloid formation enhances performance of sediment microbial fuel cells in a low conductivity soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013,47(4):2117–2122.
- [115] Xu X, Zhao Q L, Wu M S. Improved biodegradation of total organic carbon and polychlorinated biphenyls for electricity generation by sediment microbial fuel cell and surfactant addition [J]. *RSC Advances*, 2015,5(77):62534–62538.
- [116] Li X, Wang X, Zhao Q, et al. Carbon fiber enhanced bioelectricity generation in soil microbial fuel cells [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2016,85:135–141.
- [117] Liu W-J, Jiang H, Yu H-Q. Development of biochar-based functional materials: Toward a sustainable platform carbon material [J]. *Chemical Reviews*, 2015,115(22):12251–12285.
- [118] Zhu X, Chen B, Zhu L, et al. Effects and mechanisms of biochar-

- microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2017,227:98–115.
- [119] Chen S, Tang J, Fu L, et al. Biochar improves sediment microbial fuel cell performance in low conductivity freshwater sediment [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2016,16(9):2326–2334.
- [120] Li X, Zhao Q, Wang X, et al. Surfactants selectively reallocated the bacterial distribution in soil bioelectrochemical remediation of petroleum hydrocarbons [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018,344:23–32.
- [121] Li X, Wang X, Wan L, et al. Enhanced biodegradation of aged petroleum hydrocarbons in soils by glucose addition in microbial fuel cells [J]. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2016, 91(1):267–275.
- [122] Wang H, Cui Y, Lu L, et al. Moisture retention extended enhanced bioelectrochemical remediation of unsaturated soil [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,724:138169.
- [123] Wang H, Lu L, Mao D, et al. Dominance of electroactive microbiomes in bioelectrochemical remediation of hydrocarbon-contaminated soils with different textures [J]. *Chemosphere*, 2019,235:776–784.
- [124] Zhuang L, Zhou S, Wang Y, et al. Membrane-less cloth cathode assembly (CCA) for scalable microbial fuel cells [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2009,24(12):3652–3656.
- [125] Lu L, Huggins T, Jin S, et al. Microbial metabolism and community structure in response to bioelectrochemically enhanced remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014,48(7):4021–4029.
- [126] He Z, Wagner N, Minteer S D, et al. An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: Assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006,40(17):5212–5217.
- [127] Yasri N G, Nakhla G. The performance of 3-D graphite doped anodes in microbial electrolysis cells [J]. *Journal of Power Sources*, 2017,342:579–588.
- [128] Dewan A, Beyenal H, Lewandowski Z. Scaling up microbial fuel cells [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(20):7643–7648.
- [129] Liang Y, Zhai H, Liu B, et al. Carbon nanomaterial-modified graphite felt as an anode enhanced the power production and polycyclic aromatic hydrocarbon removal in sediment microbial fuel cells [J]. *Science of The Total Environment*, 2020,713:136483.
- [130] Yu B, Li Y, Feng L. Enhancing the performance of soil microbial fuel cells by using a bentonite-Fe and Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> modified anode [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,377:70–77.
- [131] Sonawane J M, Gupta A, Ghosh P C. Multi-electrode microbial fuel cell (MEMFC): A close analysis towards large scale system architecture [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013,38(12):5106–5114.
- [132] Li X, Wang X, Zhang Y, et al. Extended petroleum hydrocarbon bioremediation in saline soil using Pt-free multianodes microbial fuel cells [J]. *RSC Advances*, 2014,4(104):59803–59808.
- [133] Liu B, Zhai H, Liang Y, et al. Increased power production and removal efficiency of polycyclic aromatic hydrocarbons by plant pumps in sediment microbial electrochemical systems: A preliminary study [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,380:120896.
- [134] Liang Y, Ji M, Zhai H, et al. Removal of benzo[a]pyrene from soil in a novel permeable electroactive well system: Optimal integration of filtration, adsorption and bioelectrochemical degradation [J]. *Separation and Purification Technology*, 2020,252:117458.
- [135] Hunt L J, Duca D, Dan T, et al. Petroleum hydrocarbon (PHC) uptake in plants: A literature review [J]. *Environmental Pollution*, 2019,245:472–484.
- [136] Trivedi P, Leach J E, Tringe S G, et al. Plant-microbiome interactions: from community assembly to plant health [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2020,18(11):607–621.
- [137] Hoang S A, Lamb D, Seshadri B, et al. Rhizoremediation as a green technology for the remediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021,401:123282.
- [138] Zuzolo D, Guarino C, Tartaglia M, et al. Plant-soil-microbiota combination for the removal of total petroleum hydrocarbons (TPH): An in-field experiment [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021,11:621581.
- [139] Fang C, 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.
- [140] Guan C, Tseng Y, Tsang D C W, et al. Wetland plant microbial fuel cells for remediation of hexavalent chromium contaminated soils and electricity production [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019,365:137–145.
- [141] Schamphelaire L D, Bossche L V d, Dang H S, et al. Microbial fuel cells generating electricity from rhizodeposits of rice plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(8):3053–3058.
- [142] Li M, Liu Y, Dong L, et al. Recent advances on photocatalytic fuel cell for environmental applications—The marriage of photocatalysis and fuel cells [J]. *Science of The Total Environment*, 2019,668:966–978.
- [143] Zhang Y, Noori J S, Angelidaki I. Simultaneous organic carbon, nutrients removal and energy production in a photomicrobial fuel cell (PFC) [J]. *Energy & Environmental Science*, 2011,4(10):4340–4346.
- [144] Huang L, Liu G, Dong G, et al. Reaction mechanism of zero-valent iron coupling with microbe to degrade tetracycline in permeable reactive barrier (PRB) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017,316:525–533.
- [145] Saponaro S, Negri M, Sezenna E, et al. Groundwater remediation by an in situ biobarrier: A bench scale feasibility test for methyl tert-butyl ether and other gasoline compounds [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,167(1):545–552.
- [146] Wu Q, Jiao S, Ma M, et al. Microbial fuel cell system: a promising technology for pollutant removal and environmental remediation [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27(7):6749–6764.
- [147] Chiranjeevi P, Patil S A. Strategies for improving the electroactivity and specific metabolic functionality of microorganisms for various microbial electrochemical technologies [J]. *Biotechnology Advances*, 2020,39:107468.

**作者简介:** 李瑞祥(1999-),男,安徽亳州人,南开大学环境科学与工程学院,博士研究生,研究方向为低碳生物修复技术研发与应用.发表论文 5 篇.Ruixiang L1998@163.com.