生态与农村环境学报 2018，34 ( 10) : 871－879

Journal of Ecology and Rural Environment

DOI: 10．11934 /j．issn．1673－4831．2018．10．002

王海兰，徐祥明•微生物燃料电池在土壤修复中的应用与前景J •生态与农村环境学报,018,4(10):871-879.

WANG Hai-lan，XU Xiang-ming． Application and Prospect Analysis of Microbial Fuel Cell in Soil Remediation[J]． Journal of Ecology and Rural Environ- ment,2018,34( 10): 871-879.

微生物燃料电池在土壤修复中的应用与前景

王海兰**，**徐祥明①(赣南师范大学地理与规划学院，江西赣州341000)

摘要: 微生物燃料电池( microbial fuel cells,MFCs) 能够将有机物或无机物的化学能转化为电能,在治理污染的同 时也提供电能,在修复污染环境和生物产电方面有着很好的前景。通过文献调研方法,系统论述了国内外微生物 燃料电池在环境污染治理方面的研究及应用情况,分别从重金属污染、有机污染、非重金属无机污染等方面论述 了微生物燃料电池在土壤修复方面的应用,并且从电极材料、大小、间距、排列方式、外阻和土壤性质等方面阐述 其影响因素,最后探讨了微生物燃料电池的应用前景和不足之处。

关键词: 微生物燃料电池; 土壤修复; 影响因素; 应用前景

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831( 2018) 10-0871-09

Application and Prospect Analysis of Microbial Fuel Cell in Soil Remediation． WANG Hai-lan,XU Xiang-ming **①** ( College of Geography and Planning,Gannan Normal University,Ganzhou 341000,China)

Abstract : Microbial fuel cells ( MFCs ) can convert the chemical energy of organic or inorganic materials into electricity , which can provide electricity while conducting pollution remediation. MFCs has a great prospect in pollution remediation and bio-production of electricity. A systematic review of the researches and the applications of microbial fuel cell in envi­ronmental pollution remediation has been carried out. The review covers the areas of heavy metal pollution ,organic pollu­tion and inorganic pollution of non heavy metals. The influencing factors of microbial fuel cell ,such as electrode material , size ,spacing,arrangement way,soil property had been analyzed. The application prospects and shortcomings of microbial fuel cell had also been stated.

Key words : microbial fuel cell ; soil remediation ; influencing factor ; application prospect

近年来**,**能源短缺和环境污染问题成为世界关 注的焦点**,**我国经济高速发展**,**也正面临着能源紧 缺和环境污染的巨大压力**,**中国能源环境方面的问 题尤其突出**［**1**］**。我国正处于工业化的上升期**,**能源 供需矛盾愈演愈烈。按照目前的能源消费和生产 速度**,**预计至 2020 年我国将面临巨大的能源缺口**,** 至少还需要 109 t 标准煤。而研究发现**,**2050 年我 国若要达到美国2002 年人均装机容量的一半水平**,** 还需要电力装机2. 4X109 kW**,**而我国发挥常规能源 发电的最大能力也仅能提供1.7X109 kW电力，距 美国人均的一半还有30%的缺口**［**2**］**。同时**,**土地污 染问题引起了广泛关注**，** 能源短缺与环境污染问题 已成为我国亟待解决的2 大主要矛盾。

传统的土壤污染修复方法以物理、化学修复方 法为主**，**如换土法、热处理法、电动修复法、淋溶法 等。物理、化学修复法从后期的修复效果和实用性 上看**，**见效快**，**针对性强**，**但能耗大**，**成本高**，**且后期 回收和处理存在较大困难**，**二次污染若处理不当则 会造成更为严峻的土壤污染。学者们一直致力于 在降低修复污染土壤成本的同时又不会产生次生 污染**，**还能产生足够的能源来支撑整个社会和经济 发展方面 的 研 究**，** 微生物燃料电池**(** microbial fuel cells**，**MFCs**)** 给解决能源短缺和环境污染之间的矛 盾带来了曙光。MFCs具有电池效率高、反应条件 温和、生物相容性好、无污染等特点**［**3**］，** 在修复污染 土壤的同时还能产生电能**，**为生产和生活提供能源。

1 微生物燃料电池的修复原理 微生物燃料电池**(** MFCs**)** 是一项以电极表面的 产电细菌为催化剂**，**把储存于化合物中的化学能转

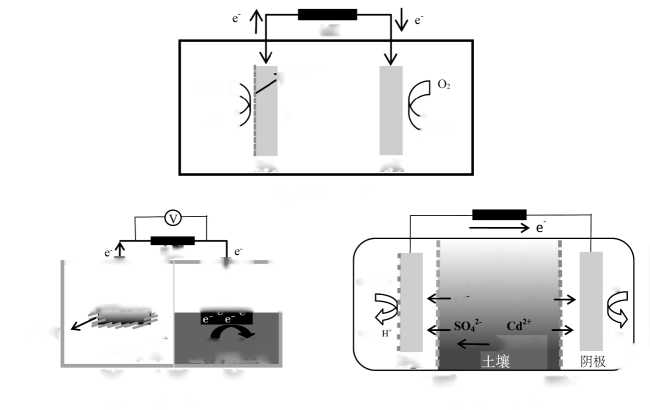
收稿日期: 2017-09-30

基金项目: 国家自然科学基金(41301226); 江西省教育厅科技项目 ( GJJ160948) ; 赣南师范大学研究生创新基金( YCX17A042)

① 通信作者 E-mail: xmingx2007@ 163.com

化为电能的技术**［**4**］**。在阳极微生物的催化作用下 降解有机物**(** 葡萄糖、乙酸、醋酸盐、乳酸盐、丁酸盐 及污染废水**，**如食品废水、生活污水、养猪废水、化 工废水、啤酒废水等**) ，**产生电子和质子**［**5－9**］，**产生的 电子传递到阳极**，**经外电路到达阴极**，**由此产生外 电流**;**产生的质子通过质子交换膜**(** PEM**)** 到达阴 极**，**在阴极与电子、氧化物**(** 铁氰化钾、氧气、空气、 硝酸盐等**［**10－13**］)** 发生还原反应**，**从而完成电池内部 的电荷传递。

依据微生物的营养类型分类，MFCs可分为异 养型MFCs、光能异养型MFCs和沉积物型MFCs。 光能异养型MFCs指MFCs中的光能异养菌利用光 能及碳源为底物**;** 异养型 MFCs 指厌氧菌利用有机 物作为底物产生电能**;**沉积型 MFCs 指微生物利用 沉积物与液相之间的电势差产生电能**［**4**］**。

如图 1 所示**，** MFCs 按外形分类**，** 可分为单室 MFCs、双室MFCs和三室MFCs。一般单室MFCs库 仑效率较低**，** 而双室 MFCs 构造相对简单**，** 接近于化 学燃料电池**，** 需要一张质子膜将阳极室和阴极室分 隔开来**，** 易于改变运行条件**，** 且库仑效率高。 目前 的双室 MFCs 又分为矩形式、双瓶式、平盘式及升流 式等**［**14**］**。

电阻

| H丄**1** | |
| --- | --- |
|  |  |
| 乙酸弓空 | **Cr(VI) Cr(m)**  **Cr(V)**污染土壤 |

电阻

(b)双室M FCs"】

阳极 分隔膜 阴极

厌氧菌

**CH3COO**

co2.

阳极

土壤重金属

阳离子 f

Cl Zn2+

阴离子

分隔膜 滤波器

(c)三室MFCsM

02

0H'

*丿*

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 基底匚 |  | 多微生物 |  |  |
| C02 C | 阳极 | 疋 ► | *m* | 》局0 |

(a)单室MFCs问

图 1 单室 、双室和三室微生物燃料电池( MFCs )  
Fig. 1 Single-，double- and three-chamber MFCs

MFCs 在环境修复方面的应用范围越来越大**，** 应用前景也越来越广。 英国植物学家 POTTER**［**18**］** 于 1911 年提出利用微生物作为燃料电池催化剂这 一概念。 MFCs 应用于污水的处理技术已经日趋成 熟，目前研究者试图将MFCs应用于海底的沉积污 泥、生活污水和有机污泥的处理**，** 同时直接获得电 能**［**19－20**］，** 从污水**［**21－25**］**净化到厨余垃圾**［**26**］**处理**，** 再到 污染土壤**［**27－28**］**修复。 MFCs 对污染土壤的修复刚刚 起步**，** 还处于不断研究和探索阶段。

2 修复污染土壤的应用进展

土壤污染按污染类型可分为有机污染、重金属 污染、非重金属无机污染3 种污染类型。 传统的土 壤污染修复方法以物理、化学修复方法为主**，** 如换 土法、热处理法、电动修复法**［**29－30**］**、淋溶法等。 新型 的修复技术则以新型纳米材料和超富集植物、微生 物修复为主。近年来，MFCs也逐渐从污水、垃圾治 理转向污染土壤和沉积物的治理。

2. 1 有机污染土壤 有机污染土壤以石油烃、多环芳烃、苯酚、氮杂 环化合物、农药化肥中的菲和芘、二苯并噻吩等污 染为主**［**31－32**］**。 近年来**，** 相关研究者逐渐认识到

MFCs修复有机污染土壤的效率有限，而其内部产 生的各种细菌对提高治污效率有独特作用**，**阳极表 面产电细菌的种类和数量多少关系着整个体系的 运行状况**，**从而使 MFCs 体系中的细菌成为研究热 点。YU等**°**33发现MFCs的产电细菌富集在阳极表 面**，** 以地杆菌属为主。 MFCs 产电量和多环芳烃去 除率都随着电极间距的减小而增大，在4~10 cm电 极间距范围内**，** 由于电流刺激了产电细菌的生长**，** 产电细菌数量极其丰富。 邓欢等**°**34**］**研究发现 MFCs 能够显著降低甲烷排放。在水稻生长过程中，MFCs 产生的电流量和土壤甲烷排放通量都在分粟期逐 步达到峰值**，** 并且运行 MFCs 显著降低了苗期和分

粟期甲烷累积排放通量**，** 这个现象可能与活跃的产 电菌和产甲烷菌竞争土壤有机底物有关。 研究者 们从发现阳极表面富集产电细菌这一规律开始**，**就 对产电细菌如何影响降解效率进行了更为细致的 探索。 HU 等**［**35**］**对微生物群落厌氧污泥进行驯化富 集**，**在几个月内提高阳极室的产电菌数量**，** 降低其 他厌氧发酵微生物的形成过程。 MFCs 对每种氮杂 环化合物底物的 COD 去除率分别为 90.4%和 88. 5%。 除了对污泥进行驯化富集来增加产电细菌 数量外**，** 直接添加一系列菌剂**，** 通过代谢提高生物 降解也是一个好方法。 ADELAJA 等**［**36**］**使用最佳菌 剂厌氧消化污泥与铜绿假单胞菌**(** MCP **) ，** 菲降解率 为27. 30 - d-1**,**最大功率密度为1.25 mW -

m-2**，** 菲的 COD 去除率为 65. 6%。

除了与其内部的各种细菌密切相关外**，** MFCs 修复有机污染土壤另一个关键技术是提升底物有 机质含量**，**而受石油污染的土壤、底泥、沉积物中富 含大量有机质**，**能够为 MFCs 体系的持续运行提供 动力**，**缓解了体系动力不足的矛盾**，** 因此修复石油 污染环境亦成为研究的一大热点**［**37**］**。 MORRIS 等阴对沉积物MFCs进行了测试，以确定电子从受 污染的沉积物厌氧区转移到上覆有氧水可以促进 和增强有氧的总石油碳氢化合物**(** TPH**)** 的降解。 经过约66 d的实验，开路控制泥沙MFCs和泥沙活 跃 MFCs 总石油烃的降解率分别为 2%和 24%。 因 此，将MFCs技术应用于修复污染沉积物，可以使天 然生物降解能力提高近12倍。WANG等**°**39发现石 油污染物降解率和土壤含水率也有一定关系。 他 将U型土壤MFCs插入石油污染盐碱土壤，并研究 其修复效果**，** 发现当增加土壤含水量时**，** 石油降解 菌活性受到生物电流的刺激**，** 土壤的电阻明显减 小**，**小于 1 cm 深度的土壤中总石油烃降解率增加 120%。 为增加底物中的有机质**，** LI 等**°**40**］**添加葡萄 糖作为系统的一个基质**，**实验表明土壤 MFCs 的电 荷输出提高 262%**，** 总石油烃降解率与未添加葡萄 糖相比提高 200%。

学者们对 MFCs 异位修复有机污染土壤进行研 究的同时**，**也对污染土壤或沉积物的原位修复进行 了探索**，**发现有机污染物的厌氧降解一般比好氧条 件下慢。 针对有机污染物对缺氧土壤的原位修复 作用，构建了插入式土壤MFCs**，**并将其插入淹水土 壤中**，**以提高苯酚的生物降解性**，** 同时产生电能。 闭路操作条件下,MFCs运行10 d后,苯酚去除率为 90.1%**，**但在开路和非 MFCs 条件下降解率分别仅 为 27. 6%和 12.3%。 在闭路条件下**，**苯酚每天的降 解速率常 数为 0.390**，** 约为 非 MFCs 条件下的

23 倍**°**41**］**。

2. 2 重金属污染土壤 随着有色金属的冶炼、矿山的开采以及各种金 属制品的增多**，** 伴随大气沉降、污水灌溉、农药施 用、金属废弃物的堆放**，** 土壤重金属污染面积越来 越大**，**污染越来越严重**，**污染成分也越来越复杂**°**42**］**。 重金属以其在土壤中难降解、毒性强、具有积累效 应等特征受到科学家们的广泛关注**°**43**］**。 土壤重金 属污染物来源广泛**，** 类型也多种多样**，** 主要的重金 属污染物有铜、锌、镍、铬、砷、铁等**°**44-47**］**。 MFCs 最 早是用来治理污水中的铬污染**°**48-49**］，**对污水中铬的 还原作用也各有不同。 WANG 等**°**50**］**在间歇模式下 利用MFCs技术对Cr6+污染废水进行处理，利用合 成的Cr6+废水作为阴极，厌氧微生物作为阳极催化 剂，(铬**)**为100 mg - L-1的废水在150 h内铬被完 全去除**(** 初始 pH 值为 2**) ，**这项实验证实了产电和 铬还原同步进行的可能性。 MFCs 修复含铬污水的 成功经验让学者们萌发了将 MFCs 用于治理铬污染 土壤的想法并证明了其可行性。 HABIBUL 等**°**51**］**研 究了 MFCs 修复不同浓度铬污染土壤的效果**，** 发现 最高去除率可达99%**，**且铬的去除率随污染土壤中 初始铬浓度的增加而增加。 此外**，**除了初始铬浓度 的影响**，**土壤类型和外部电阻都对铬污染的去除效 率有不同程度的影响。 WANG 等**°**16**］**通过实验证明 了土壤类型和外部电阻对电流效率和铬的去除率 均有显著影响**，**减少外部阻力才能提高重金属铬的 去除率。 而红色土壤建立的 MFCs 与潮土相比表现 出较高的去除效率和较强的电流效率**，**这意味着红 色土中可能含有更多的电子受体，能与Cr6+发生还 原反应。 含铬污水的治理和铬污染土壤的修复有 很多相似之处**，**可以借鉴含铬污水的治理经验改进 MFCs对铬污染土壤的修复，从而保证MFCs修复铬 污染土壤的持续有效性。

此外**，**铜污染废水和土壤中铜的回收利用亦受 到很多学者的关注。 不同学者构建的 MFCs 体系也 存在差异。 印霞棐等**°**52**］**设置了电极材料和阳极底 物分别为石墨和有机废水**，**厌氧菌种为厌氧活性污 泥，阴极液为含铜废水，从而构建了双室MFCs反应 器。 MFCs 对含铜废水的平均降解率可达80%左 右**，**特别是连续 MFCs 对铜离子的降解率最高可达 99%以上。 梁敏等**°**53**］**则以剩余污泥为阳极底物**，**硫 酸铜溶液为阴极溶液构建了双室MFCs**，**对铜污染进 行治理**，**剩余污泥中铜离子去除率达97. 8%。 实验 证明其阴极最终的还原产物与阴极还原能力的强 弱密切相关**，** 阴极还原力较弱时**，** 大部分铜离子被 还原为氧化铜**，**小部分铜离子以 Cu4**（** OH**）** 6SO4 形式 析出。 而阴极还原力较强时**，** 大部分铜离子被还原 为 单 质 铜 **，** 极小部分铜离子被还原为氧化铜。 WANG等珂通过实验得到的最大电压为539 mV**，** 最大力量密度为65. 77 MW - m-2，证明铜的迁移、 发电和土壤 pH 值以及电极值的变化密切相关。

除了铬和铜污染土壤外**，**铁、铅、锌和镉污染土 壤也受到学者们的广泛关注。 CHEN 等**°**17**]**将三室 MFCs 的系统设计应用于受锌和镉污染的水稻土修 复,经过78 d的运行，去除锌12 mg和镉0. 7 mg,这 表明电流产生的 MFCs 能显著去除土壤中的重金 属。HABIBUL等同发现微生物在土壤中通过氧化 有机物产生电能**，**土壤中镉和铅浓度在修复后由阳 极向阴极逐渐增加。 经过约143 和 108 d 的运行**，** 镉和铅在阳极的去除率分别为 31%和 44.1%。 土 壤性质（如pH值和土壤电导率**）**也重新分布，从阳 极到阴极出现顺序排列。 MFCs 产生的电能与微生 物氧化有机物有关**，** 而其氧化还原速率影响着降解 效率。HEIJNE等阴对此做了深入探究。他们将双 极膜与铁还原相结合**，** 石墨作为阴极电极建立了 MFCs系统，最大功率密度为0.86 W - m-2**，**回收率 为 80%~95%**，**库仑效率和能量为 29%**，**并通过实验 证明铁可以通过质子交换从双极膜中可逆去除**，**阴 极的氧还原速率是MFCs性能的限制因素。

2. 3 非重金属无机污染土壤

非重金属无机污染以各种酸、碱、盐类、硫化物 和卤化物等污染为主**，**主要是由大气沉降和污水灌 溉等途径进入土壤。 硫化物不仅会侵蚀建筑物和 雕塑**，**破坏文物古迹**，** 还会影响人体健康和农作物 生长**，**也会形成酸雨**，**以降水形式进入土壤**，**危害人 体健康和农作物的安全**，**土壤中硫化物更是不能自 行降解**，** 危害十分严重且持续时间较长。 ZHAO 等**°**56**]**对土壤中硫的降解进行研究**，**用复合阳极**（** 活 性炭布+碳纤维纱**）**设置了 MFCs**，**从22 T废水中除 去1.16g亚硫酸盐和0. 97 g硫代硫酸盐，去除率分 别为 91%和 86%。 在处理含硫废水的基础上**，**张海 芹等**°**57-58**]**从泥水比、外接电阻、投加有机质含量以 及曝气量等几个方面的工艺参数对沉积物 MFCs 进 行优化，得到最优工艺条件为1 ：1泥水比＞500 **Q**外 接电阻、0.3 g - L-1无水乙酸钠投加量和0.25 L - min-1的曝气量。实验证明，在水稻田中构建MFCs 可以降低水稻土中水和土壤各层中的硫浓度**，**对水 稻的生长有明显促进作用。 通过把土壤中硫离子 氧化成单质硫或更高价态硫**，**可以降低土壤中硫浓 度**，**减弱硫离子对水稻生长的毒害**，** 在产生电能同 时还能促进水稻生长。 VIJAY 等**°**59**]**建立了一种由 牛粪和水果废料组成阳极、由牛粪和土壤组成阴极 的高效反硝化 MFCs**，** 其硝酸盐去除量高达**（** 7.1± 0. 9**）** kg • m-3。

如表1所示，比较MFCs修复有机污染、重金属 污染及非重金属无机污染土壤的降解率及影响因 素可知,MFCs对有机污染土壤的修复率较高，平均 降解率达84.3%**，**对有机污染土壤所涉及的影响因 素研究也较多**，** 研究的广度和深度也大。 而 MFCs 对重金属污染土壤的修复率最低**，** 平均降解率为 42. 2%**，**仅为有机污染降解率的一半。 MFCs 修复污 染土壤的降解率受土壤类型、性质以及 MFCs 设置 等因素的影响**，** MFCs 对土壤中有机污染降解率更 高**，**比较适合用于有机污染土壤的修复**，** 而对于重 金属污染土壤的降解效果略差。

表 1 MFCs 修复各类污染土壤的应用比较

Table 1 Application of MFCs in remediation of contamina­ted soils

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 污染类型 | 污染物 | 降解率/% | 影响因素 |
| 有机污染 | 石油烃化合物 | 72. 9 | 阳极水平排列°60]  葡萄糖的添加°61] 丙酮清洗阳极并水封°62] U 型 MFCs°39] 电极间距°4，34]  菌剂°36] |
|  | 苯酚 | 90. 1 | 插入式 MFCs°41] |
|  | 氮杂环化合物 | 90. 0 | 底物浓度°35] |
| 重金属污染 | 铬 | 75. 3 | 土壤类型°16]  外部电阻°16]  初始浓度°51] |
|  | 镉 | 24. 5 | 土壤性质°51] |
|  | 铅 | 44 | 土壤性质°51] |
|  | 锌 | 25 | 柠檬酸的添加°53] |
| 非重金属  无机污染 | 硫 | 52. 3 | 泥水比°57-58]  外接电阻°57-58] 无水碳酸钠的添加°57-58] |
|  | 硝酸盐氮 | 87. 6 | pH 值°59] |
| 3 影响 MFCs 修复效果的因素 | | | |

相对于污水治理而言MFCs修复污染土壤更为 复杂**，**影响因素也更多**，** 而且还包含着许多无法人 为改变的客观因素**（** 如土壤内部阻力约为水阻力的 10倍**）**。制约MFCs修复效果的因素主要有操作条 件**（** 两极材料、电极尺寸、排列方式、两极间距、添加 剂及外部阻力等**）**和土壤性质（土壤类型、NH4+含 量、含水量、pH值、含砂量、黏性、颗粒大小及土壤微 生物活性等**)**等。

3. 1 操作条件

MFCs 系统设置的不同对污染土壤修复效率的 影响较大**，**尤其表现在两极材料的选择和制作以及 两极的摆放和间距上。 关于 MFCs 操作条件的设 置**，**许多学者给出了不同的尝试。 阴极材料的使用 从贵金属铂到 PbO**2**、 四甲氧基苯基钴卟啉**(** CoT- MPP**)** 、碳基材料再到经优化的石墨烯**，**其功率密度 不断提高**，**污染物去除率也不断提升。

MFCs 的阴极催化剂初始是以贵金属铂为 主**°**63**］，**但由于其价格昂贵**，** 不适用于大面积或大数 量的使用。MORRIS等阴在双室MFCs中比较了二 氧化铅**(** PbO2**)** 与铂**(** Pt**)** 的催化能力**，**发现与 Pt 涂 层阴极相比**，** PbO2 涂层阴极电池功率密度提高 4 倍**，**平均每生产单位功率的花费降低50%**，** 但是阴 极的铅渗漏是一个潜在危害**，** 限制了 PbO2 作为催 化剂在阴极中的应用**，**可通过改进涂层技术和黏合 材料来打破这个限制**，** 提髙催化剂的稳定性。 CHENG等**°**64利用CoTMPP代替珍贵的Pt催化剂**，** 将阴极功率密度提高0. 6 mA • cm-2**，**但是在低电流 密度下，功率密度降低(<40 mV**)***。*目前，阴极和阳 极都主要由碳基材料组成**，** 如碳纤维布、碳毡、石墨 棒和颗粒活性炭。 YU 等**°**33 建立了一个 MFCs 体 系，将半径为84 mm、厚度为3 mm的圆形活性炭纤 维毡片作为两极。 黄力华**°**65 在铸膜液中加入经优 化的石墨烯并刮涂在不锈钢网和聚酯无纺布上**，**通 过相转化法制备得到导电G-FM膜阴极，将其应用 于MFC-MBR耦合式反应器中，G-FM兼作微滤膜 和阴极。采用G-FMc"ed反应器处理模拟生活污水**，** COD、NH3-N 和 TN 去除率分别达**(** 96. 6±3. 9**)**%、 **(**95.8±5.7**)**%和**(** 94.7±5.2**)**%**，** 并同步输出 221 mV 的电压 。

除了两极材料本身对 MFCs 性能的影响外**，** 外 源影响也不容小觑。 添加外源葡萄糖以及预先用 丙酮清洗并水封阳极都使土壤 MFCs 的阳极性能得 到进一步提升。 LI 等**°**61 添加葡萄糖作为系统的一 个基质**，**总石油烃降解率与未添加相比提高 200%。 研究表明**，**外源性碳源提高生物电**，** 辅助降解石油 烃**，**为从土壤贫瘠的地区或极端环境去除污染物提 供了一种有效的方法。 预先将阳极用丙酮进行清 洗并水封土壤,MFCs的欧姆内阻下降52%**，**电导率 升高 1 倍**;** 在启动后的 120 h 内**，** 最大电压和累计 产出电量分别达189 mV和36 C**,**与对照相比分别 增加20和 29 倍**°**62 。 阳极尺寸的大小影响着系统 中各类电阻的大小**，**且关系着阳极微生物附着面积 的大小**，**与阳极氧化反应的进行有着密不可分的联 系。 产电微生物数量的多少和电极附着接触几率 的大小都随着阳极面积的增大而增加**，**从而可使产 电量得到提高。 但电极尺寸增大也意味着电极阻 力增大**，**又阻碍了电量的产生。 阴极面积的增大可 以增大电极与氧的接触面积**，** 增加电子受体浓度**，** 但尺寸对氧电位的影响是有限的**°**29 。 IM 等**°**66 在 电极尺寸测试中产生的最大电压和功率密度分别 为291 mV和0. 34 mW • m -3。当阳极和阴极面积 都为64 cm2、两极间距为4 cm时，最大电压下降 19%~29%**,**当阳极和阴极面积都减小到16 cm2时**，** 电压仅降低3%~12%。最大电压随着阳极尺寸的 减小而减小**，**当阴极尺寸减小 29%~47%时**，**功率密 度降低49%~68%。 这些结果表明阳极面积变化比 阴极面积变化对电压的影响更为显著。

MFCs体系中，阳极的横向或纵向排列也会影 响其运行效率和降解能力。 ZHANG 等**°**60 对 MFCs 阳极的排列方式进行了研究**，**实验设置水平和纵向 2 种排列方式**，** 发现总石油烃**(** TPH**)** 含量高达 12. 5%的土壤经过 135 d 的实验之后**，** 在闭合控制 下阳极水平排列总石油烃**(** TPH**)** 去除率高达 50. 6%**，**远远高于纵向排列**(** 8. 3%**)，**在断开控制下 阳极水平排列去除率达 95. 3%**，**也远高于纵向排列 **(**6.4%**)**。 分析表明**，** 阳极水平排列中的烷烃和多 环芳烃的降解率均高于纵向排列**，**水平排列电子输 运阻力也比纵向排列低。 阳极水平排列增强了碳 氢化合物的生物降解和生成的电荷**，** MFCs 阳极的 水平排列发展空间很大。

两极间距的大小与 MFCs 内部电阻的大小密切 相关,MFCs的内部电阻会随电极间距的增大而增 大**，**输出功率也随之降低。 YU 等**°**33 将各种封闭型 反应器电极间距设为 4、6、8 和 10 cm**，** 输出的电压 分别为 294、249、241 和 230 mV。 当电极间距在 4 到10 cm之间时，越靠近电极位置的土壤，多环芳烃 的去除效率就越高。 研究发现随着电极间距的减 小**，**发电量和多环芳烃的去除量都增加。 虽然改变 电极间距会影响系统内阻**，**阳极产生的质子传递到 阴极发生还原反应**，** 质子传递的阻力将随着距离的 增加而增加**，**但是电极距离过小又无法保证阴阳两 极各自独立的运行环境。 田静**°**4 也设置了不同的 电极间距**，**研究其产生的电压大小和污染物去除率 之间的关系**，**并得出了类似结论。 当电极间距分别 为 4、6、8 和 10 cm**，** MFCs 电压值分别为**(** 285±5**)**、 **(**249±5**)**、**(**241±5**)** 和**(** 230±5**)** mV。 实验证明土壤 厚度的增加加大了传递质子的阻力**，**电池的电压和 功率密度也变小**，** 对污染物的去除率也随之减小。 而随着电极间距的逐渐变小**，** MFCs 的产电性能及 污染物降解率均得到逐步提高。

MFCs 外部阻力的大小可调节电流密度的大 小**，**且影响其对污染物的去除效率。 ZHANG 等**°**67**]** 研究了外部电阻对系统性能的影响，在0~200 **Q**范 围内电流密度随外部电阻的增加而减少。 在给定 的反应时间(16 h**)**内，脱色率和矿化效率在0~5 **Q** 之间无显著差异**，**且2 种阻力的去除率均在99%以 上**，**但当外部阻力大于 50 u 时**，** 其差异逐渐增大。 WANG等**°6**发现外部电阻显著影响电流大小，影响 阴极效率和铬的去除效率**，**降低外部电阻可提升污 染物去除效率。 不同土壤类型之间的修复效率不 同**，** 但可以通过降低外部阻力来改善。

3. 2 土壤性质

作为MFCs的导电介质，不同土壤类型导电率 也存在差异**，** 加之土壤本身内部阻力大**，** 导电率比 以水为介质低10倍。 MFCs 修复污染土壤需要一定 的动力**，**驯化和培养合适的底物**，**培养产电细菌**，**使 其拥有较为持续的电力供应。 同时**，**土壤类型的差 异影响着土壤性质**，**影响土壤中产电细菌的种类和 数量**，**从而直接影响 MFCs 的性能。 WANG 等**°**28**]**研 究发现**，** 高性能的 MFCs 由高浓度 DOC 和高浓度 NH4+的水田土壤以及阳极高产电细菌(**8**-变形菌 纲**)** 组成**，** 而低性能的 MFCs 则由低 DOC 和低浓度 NH4+的土壤以及低产电细菌群落(*0*-变形菌纲**)**组 成。YUAN等阴的研究结果表明，单室MFCs与水 稻土共同作用**，**使阳极上的硝基螺旋藻和厌氧绳菌 纲显著富集**，**并产生了显著的富集效果。

4 应用与前景分析

目前国内有关MFCs在土壤修复治理中的应用 案例较少。 通过对 MFCs 治理修复污染土壤的应用 与前景的分析**，**可为相关研究工作提供借鉴。 在我 国**，**矿产资源的开发利用对社会和国民经济的发展 至关重要。 我国金属矿产贫矿多富矿少**，**小型矿多 大型矿少**，**伴生矿多单一矿种少**，** 这一现状增加了 矿产开采的难度**，**从而加大了“三废”的排放量**，** 是 我国环境污染比较严重的产业之一**°**69-70 。 在矿产 的开发和加工过程中**，** 由于技术设备落后、监管不 力等原因造成“三废”的任意排放**，**尤其是尾矿的堆 积**，** 在堆放区周围形成较大面积重金属污染土壤**，** 生态问题令人堪忧。 尾矿中大量的重金属和其他 有毒有害物质会通过大气环流、水循环等途径扩散 至周边的村庄、河流、农田等**，**导致农田严重减产或 失收**，**影响居民的生产和生活。 同时**，** 重金属还会 通过食物链在生物体内蓄积**，** 危害人体健康**°**71-72 。 实验证明MFCs在治理重金属污染和有机污染土壤 方面均有很好的应用前景**，**在产生电能的同时还能 治理污染物**，** 具有能耗低、来源广、绿色环保等特 点**°**13 。 MFCs 技术的应用可给重金属污染土壤和有 机污染土壤的治理带来新的技术选择。

MFCs的研究大部分从其体系的运行影响因素 入手，多着眼于如何改善MFCs性能，提高其对土壤 的修复和产电能力。但MFCs修复污染土壤产生的 电流小**，**土壤导电率低**，**电流所能涉及的范围也小**，** 仅靠近两极地区修复效果强**°**34 。 MFCs 修复污染土 壤大部分以实验室异位修复为主**，**在全球超大面积 污染土壤面前显得杯水车薪。 如何将 MFCs 应用于 大面积污染土壤的修复**，** 增大其有效的修复面积**，** 值得学者们进行深入研究。 所以**，** 将 MFCs 与大面 积污染土壤原位修复的实践相结合**，**还需要众多研 究者的不懈努力和探索。

参考文献:

[1]刘助仁.新能源:缓解能源短缺和环境污染的新希望J •科技 与经济，2008，21( 1) : 35- 37．°LIU Zhu-ren．New Energy: New Hope for Alleviating Energy Shortage and Environmental P ollution [J ．Science ＆ Technology and Economy，2008，21 ( 1 ) : 35- 37．

2 张超，东武•关于我国2050年水电能源发展战略的思考J] •北

京理工大学学报( 社会科学版)，2002，4( 增刊 1): 63-66． [ZHANG Chao ，CHEN Wu． Reflections on China' s Hydropower

Energy Development Strategy in 2050 [J ． Journal of Beijing Institute of Technology ( Social Science Edition) ，2002，4( Suppl． 1) :63-66．

[3 李云龙，张宝刚，程铭．微生物燃料电池技术治理重金属污染的

研究进展J •环境科学与技术,2015,38(增刊1) :254- 258. LI

Yun-long，ZHANG Bao-gang，CHENG Ming，et al． Research Progress on Microbial Fuel Cell for Heavy Metal Removals[J . Environmental Science ＆ Technology，2015，38 ( Suppl. 1) : 254-258.

[4 田静.土壤微生物燃料电池修复复合污染土壤的实验研究

D •北京：北京化工大学,2016. [TIAN Jing.The Study of Reme­diation of Co-Contaminated Soil With Soil Microbial Fuel Cells [D .Beijing: Beijing University of Chemical Engineering，2016.

[5 GRATTIERI M，SUVIRA M，HASAN K，et al. Halotolerant Ex-

tremophile Bacteria From the Great Salt Lake for Recycling Pollu­tants in Microbial Fuel Cells[J . Journal of Power Sources，2017， 356: 310-318.

[6 YUAN Y，ZHOU S G，ZHUANG L.A New Approach to In-situ Sed­

iment Remediation Based on Air-Cathode Microbial Fuel Cells[J . Journal ofSoilsSediments，2010，10(7):1427-1433.

[7 CHATURVEDI V，VERMA P.Microbial Fuel Cell:A Green Ap­

proach for the Utilization of Waste for the Generation of Bioelectric­

ity°J ．Bioresources and Bioprocessing，2016，3: 38．

8

9

10

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

EVELYN，LI Y，MARSHAL A，et al． Gaseous Pollutant Treatment and Electricity Generation in Microbial Fuel Cells ( MFCs ) Utilising Redox Mediators°J ． Reviews in Environmental Science Bio/Technology，2014，13( 1) :35-51．

WEN Q，WU Y，CAO D，et al． Electricity Generation and Modeling of Microbial Fuel Cell From Continuous Beer Brewery Wastewater °J ．Bioresource Technology，2009，100( 18) : 4171-4175．

KIM B H，CHANG I S，GADD G M． Challenges in Microbial Fuel Cell Development and Operation°J ． Applied Microbiology Bio- technology，2007，76: 485．

SUN J，HU Y Y，BI Z ，et al ． Simultaneous Decolorization of Azo Dye and Bioelectricity Generation Using a Microfiltration Membrane Air-Cathode Single-Chamber Microbial Fuel Cell°J ． Bioresource Technology，2009，100( 13) : 3185-3192．

SUKKASEM C，XU S T，PARK S，et al． Effect of Nitrate on the Performance of Single Chamber Air Cathode Microbial Fuel Cells °J ．Water Research，2008，42( 19) : 4743-4750．

杨国栋•污染土壤微生物修复技术主要研究内容和方法J ■农 业环境保护，2001，20( 4) : 286- 288．°YANG Guo-dong．New Contents and Methodologies on Microbial Remedy Technology for Contaminated Soil In-situ °J ． Agro-Environmental Protection ， 2001，20(4):286-288．

冯雅丽，周良，祝学远，等． Geobacter Metallireducens 异化还原 铁氧化物三种方式J •北京科技大学学报,006,8(6):524- 529．°FENG Ya-li，ZHOU Liang，ZHU Xue-yuan，et al．Three Paths to Reduce Ferric Oxides Taken by Geobacter Metallireducens°J ． Journal of Beijing University of Science and Technology，2006，28 ( 6) : 524-529．

范方舟，翟洪艳，季民．微生物燃料电池在治污产能方面的研 究进展 J ■现代化工,015,5(12): 19-23. [FAN Fang-hou, ZHAI Hong-yan，JI Min． Progress in Microbial Fuel cell for Decon­tamination and Power Generation°J . Modern Chemical Industry， 2015，35(12):19-23.

WANG C，DENG H，ZHAO F. The Remediation of Chromium

(M) -Contaminated Soils Using Microbial Fuel Cells J - Journal Soil and Sediment Contamination，2016，25(1) : 1-12.

CHEN Z，ZHU B K，JIA W F，et al. Can Electrokinetic Removal of Metals From Contaminated Paddy Soils be Powered by Microbial Fuel Cells? °J . Environmental Technology ＆ Innovation，2015， 3: 63-67.

POTTER M C.Electrical Effects Accompanying the Decomoposition of Organic Compounds°J . Proceedings of the Royal Society of London，1911，84(571):260-276.

YUAN Yong，CHEN Qing，ZHOU Shun-gui，et al. Improved Electricity Production From Sewage Sludge Under Alkaline Conditions in an Insert-Type Air-Cathode Microbial Fuel Cell°J . Journal of Chemical Technology Biotechnology，2012，87 ( 1) : 80-86. 王同悦.人工湿地型微生物燃料电池处理污水及生物产电性 能试验研究D •西安：长安大学,2016. [WANG Tong-yue.Effi- ciency of Wastewater Treatment and Electricity Generration in a Microbial Fuel Cell Coupled Constructed Wetland System[D . Xi' an: Chang'an University，2016.

1. CHENG K，HU J P ，HOU H J，et al. Aerobic Granular Sludge Inoc­ulated Microbial Fuel Cells for Enhanced Epoxy Reactive Diluent Wastewater Treatment [J . Bioresource Technology，2017，229: 126-133.
2. VELASQUEZ-ORTA S B，WERNER D，VARIA J C，et al. Microbial Fuel Cells for Inexpensive Continuous In-situ Monitoring of Groundwater Quality[J . Contents Lists Available at Science Di- rect[J . Water Research，2017，117: 9-17.
3. DING W J，CHENG S A，YU L L，et al.Effective Swine Wastewater Treatment by Combining Microbial Fuel Cells With Flocculation

[J .Chemosphere，2017，182: 567-573.

1. JABEEN G，FAROOQ R. Microbial Fuel Cells and Their Applica­tions for Cost Effective Water Pollution Remediation [ J . Proceedings of the National Academy of Sciences，India Section B: Biological Sciences，2017，87 (3) : 625-635.
2. GAO N S J，LESNIK K L，BERMEK H，et al.Microbial Fuel Cells: From Fundamentals to Wastewater Treatment Applications[J . An­aerobic Biotechnology，2015，8: 163-189.
3. CHEN Y G，LUO J Y，YAN Y Y，et al. Enhanced Production of Short-Chain Fatty Acid by Co-Fermentation of Waste Activated Sludge and Kitchen Waste Under Alkaline Conditions and Its Ap­plication to Microbial Fuel Cells[J .Applied Energy，2013，102: 1197-1204.
4. DUNAJ S J，VALLINO J J，INES M E，et al.Relationships Between Soil Organic Matter，Nutrients，Bacterial Community Structure，and the Performance of Microbial Fuel Cells[J . Environmental Science ＆ Technology，2012，46 (3) : 1914-1922.
5. WANG N，CHEN Z，LI H B，et al. Bacterial Community Composition at Anodes of Microbial Fuel Cells for Paddy Soils: The Effects of Soil Properties [J .Journal of Soils and Sediments，2015， 15(4) : 926-936.

29吴丹亚，仓龙，周东美，等.EDDS应用于Cu/Zn污染土壤电动 处理的基础研究J -农业环境科学学报「2007,26 (2) :436- 442.[WU Dan-ya，CANG long，ZHOU Dong-mei，et al. Basic Study on EDDS-Enhanced Electrokinetic Remediation of Cu /Zn Contam­inated Soil[J . Journal of Agro Environment Science，2007，26 (2) : 436-442.

1. 陈海峰，周东美，仓龙.垂直电场对重金属络合物在土壤中迁 移过程的影响J •中国环境科学，2006,26 (增刊1)：78-82.

[CHEN Hai-feng，ZHOU Dong-mei， CANG long. Influence of Ver­tical Electric Field on the Migration of Heavy Metal Complexes In­soil Column[J . China Environmental Sciences， 2006， 26 ( Suppl. 1) : 78-82.

1. AHN Y， JUNG H， TATAVARTY R， et al. Monitoring of Petroleum Hydrocarbon Degradative Potential of Indigenous Microorganisms in Ozonated Soil[J .Biodegradation， 2005， 16 (1) : 45-56.
2. CAO X， YU C Y， WANG H， et al. Simultaneous Degradation of Re­fractory Organic Pesticide and Bioelectricity Generation in a Soil Microbial Fuel Cell With Different Conditions[J . Environmental Technology，2017，38(8):1043-1050.
3. 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.

34

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

邓欢，蔡旅程，姜允斌，等.运行微生物燃料电池减排稻田土壤 甲烷的研究 J]-环境科学，2016,37 (1) : 359- 365. [DENG Huan, CAI Lu-cheng, JIANG Yun-bin, et al. Application of Microbial Fuel Cells in Reducing Methane Emission From Rice Paddy[J .Environmental Science， 2016， 37( 1) : 359-365.

HU W J， NIU C C， WANG Y， et al. Nitrogenous Heterocyclic Com­pounds Degradation in the Microbial Fuel Cells[J . Process Safety and Environmental Protection， 2011，89( 2) : 133-140.

ADELAJA O， KESHAVARZ T， KYAZZE G.Enhanced Biodegrada­tion of Phenanthrene Using Different Inoculum Types in a Microbial Fuel Cell[J . Engineering in Life Sciences， 2014， 14 ( 2) : 218-228.

LU L， YAZDI H， JIN S， et al. Fallgren， Zhiyong Jason Ren. Enhanced Bioremediation of Hydrocarbon-Contaminated Soil Using Pilot-Scale Bio-Electrochemical Systems[J . Journal of Hazardous Materials， 2014， 274: 8- 15.

MORRIS J M， JIN S. Enhanced Biodegradation of Hydrocarbon- Contaminated Sediments Using Microbial Fuel Cells[J . Journal of HazardousMaterials，2012，(213/214):474-477.

WANG X， CAI Z， ZHOU Q X， 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.

LI X J， WANG X， WENG L P， et al. Microbial Fuel Cell for Organic Contaminated Soil Remedial Application: A Review[J . Energy Technology， 2017， 5( 8) : 1156-1164.

HUANG D Y， ZHOU S G， CHEN Q， et al. Enhanced Anaerobic Degradation of Organic Pollutants in a Soil Microbial Fuel Cell[J . Chemical Engineering Journal， 2011， 172( 2/3) : 647-653.

串丽敏，赵同科，郑怀国，等.土壤重金属污染修复技术研究进 展J •环境科学与技术,014,7(增刊2):213-222.

樊霆， 叶文玲， 东海燕， 等.农田土壤重金属污染状况及修复技术 研究 J -生态环境学报,013,2(10)： 1727-1736. [FAN Ting, YE Wen-ling， CHEN Hai-yan， et al. Review on Contamination and Remediation Technology of Heavy Metal in Agricultural Soil[J . Ec­ological Environment，2013，22( 10) : 1727-1736.

杨红艳•土壤重金属污染的生物修复技术J]-辽宁师专学报 (自然科学版),2005,7 (4) : 13-14,7. [YANG Hong-yan.Bio- logical Repair Technology for Heavy Metal Pollution in Soils[J . Journal of Liaoning Teachers College ( Natural Science Edition) ， 2005，7(4):13-14，37.

HEIJNE A T， HAMELERS H V，WILDE D V.A Bipolar Membrane Combined With Ferric Iron Reduction as an Efficient Cathode Sys­tem in Microbial Fuel Cells[J . Environmental Science ＆ Technol- ogy，2006，40(17) : 5200-5205.

HABIBUL N， HU Y， SHENG G P. Microbial Fuel Cell Driving Electrokinetic Remediation of Toxic Metal Contaminated Soils[J . Journal of Hazardous Materials， 2016， 318: 9-14.

RHOADS A， BEYENAL H， LEWANDOWSKI Z. Microbial Fuel Cell Using Anaerobic Respiration as an Anodic Reaction and Bi­omineralized Manganese as a Cathodic Reactant[J . Environmental Science ＆ Technology， 2005， 39(12) : 4666-4671.

1. 赵立新，孔凡英，王宣，等.微生物燃料电池处理含铬废水并同 步产电 J •现代化工,009,9(11) :37-39,1. [ZHAO Li-dn, KONG Fan-ying, WANG Xuan, et al. Cr ( M ) -Containing Wastewater Treatment Coupled With Electricity Generation Using Microbial Fuel Cell[J . Modern Chemical Industry， 2009， 29 (11):37-39，41.
2. XAFENIAS N， ZHANG Y， BANKS C J. Evaluating Hexavalent Chromium Reduction and Electricity Production in Microbial Fuel Cells With Alkaline Cathodes[J . International Journal of Environ­mental Science and Technology， 2015， 12(8) : 2435-2446.
3. WANG G， HUANG L P，ZHANG Y F.Cathodic Reduction of Hexa­valent Chromium[Cr( M) Coupled With Electricity Generation in Microbial Fuel Cells[J . Biotechnology Letters， 2008， 30 ( 11 ) : 1959- 1966.
4. HABIBUL N， HU Y， WANG Y K， et al.Bioelectrochemical Chromi- um(M) Removal in Plant-Microbial Fuel Cells[J .Environmental Science and Technology， 2016， 50(7) ， 3882-3889.
5. 印霞棐，刘维平，姜璐.利用微生物燃料电池回收含铜废水中 的铜 J •环境工程，2014,2 (9) : 152-157. [YIN Xia-fei, LIU Wei-ping， JIANG Lu. Recovery of Copper From Copper-Contained Wastewater by Using a Microbial Fuel Cell[J . Environmental En- gineering， 2014， 32 (9) : 152- 157.
6. 梁敏，陶虎春，李绍峰，等.剩余污泥为底物的微生物燃料电池处 理含铜废水 J •环境科学,011,2(1)： 179-185. [LIANG Min, TAO Hu-chun， LI Shao-feng， et al. Treatment of Cu2+ -Containing Wastewater by Microbial Fuel Cell With Excess Sludge as Anodic Substrate[J .Environmental Science，2011，32(1):179-185.
7. WANG H， SONG H L， YU R， et al. New Process for Copper Migra­tion by Bioelectricity Generation in Soil Microbial Fuel Cells[J . Environmental Science Pollution Research， 2016， 23 ( 13 ) : 13147-13154.
8. HEIJNE A T， HAMELERS H V， BUISMAN C J. Microbial Fuel Cell Operation With Continuous Biological Ferrous Iron Oxidation of the Catholyte[J . Environmental Science ＆ Technology， 2007， 41(11) : 4130-4134.
9. ZHAO F， RAHUNEN N， VARCOE J R， et al.Factors Affecting the Performance of Microbial Fuel Cells for Sulfur Pollutants Removal

[J .Biosensors and Bioelectronics.， 2009， 24(7) : 1931-1936.

1. 张海芹.微生物燃料电池降低底泥中硫离子浓度的试验研究

[D . 上海: 华东理 工大 学 ， 2014.[ZHANG Hai-qin. Experimental Sulfide Concentration in Sediment Using Plant-Sediment Microbial Fuel Cells[D . Shanghai: East China University of Science and Technology， 2014.

1. 张海芹，殷瑶，吴江， 等.微生物燃料电池对去除稻田硫离子的 影响J]-农业环境科学学报，2013, 32 (7) : 1355 - 1360.

[ZHANG Hai-qin， YIN Yao， WU Jiang， et al. Removal of Sulfide in the Rice Field Using Microbial Fuel Cells[J . Journal of Agro-En- vironment Science， 2013， 32(7) : 1355-1360.

1. VIJAY A， VAISHNAVA M， CHHABRA M.Microbial Fuel Cell As­sisted Nitrate Nitrogen Removal Using Cow Manure and Soil[J . Environmental Science Pollution Research， 2016， 23 ( 8 ) : 7744-7756.
2. ZHANG Y Y， WANG X， LI X J， et al. Horizontal Arrangement ofAnodes of Microbial Fuel Cells Enhances Remediation of Petroleum Hydrocarbon-Contaminated Soil[J . Environmental Sci­ence and Pollution Research，2015， 22(3) : 2335-2341.
3. LI X J， WANG X， WAN L L， et al. Enhanced Biodegradation of Aged Petroleum Hydrocarbons in Soils by Glucose Addition in Mi­crobial Fuel Cells[J . Journal of Chemical Technology and Bio- technology，2016，91(1):267-275.
4. 李晓晶，赵倩， 张月勇.微生物燃料电池修复石油污染盐碱土 壤 J •环境工程学报,017,1(2): 1185-1191. [LI Xiao-ing, ZHAO Qian， ZHANG Yue-yong. Microbial Fuel Cell Remediation for Saline-Alkaline Soil Contaminated by Petroleum Hydrocarbons

[J .Chinese Journal of Environmental Engineering，2017， 11(2) : 1185-1191.

1. WOLIN＇SKA A， STEPNIEWSKA Z， BIELECKA A， et al.Bioelec- tricity Production From Soil Using Microbial Fuel Cells [ J . Applied Biochemistry and Biotechnology， 2014， 173 ( 8 ) : 2287-2296.
2. CHENG S， LIU H， LOGAN B E. Power Densities Using Different Cathode Catelysts ( Pt and CoTMPP ) and Polymer Binders (Nafion and PTFE) in Single Chamber Microbial Fuel Cells[J . Environmental Science ＆ Technology， 2006， 40(1) : 364-369.

65]黄力华•石墨烯修饰电极强化微生物燃料电池性能研究D - 无锡: 江南大学 ， 2017.[HUANG Li-hua. Study on the Performance of Microbial Fuel Cell Strengthened by Graphene Modified Electrode[D .Wuxi: Jiangnan University， 2017.

1. IM S W， LEE H J， CHUNG J W， et al. The Effect of Electrode

Spacing and Size on the Performance of Soil Microbial Fuel Cells ( SMFC) [ J . Journal of Korean Society of Environmental

Engineers，2014，36(11):758-763.

1. ZHANG Y F， WANG Y， ANGELIDAKI I. Alternate Switching Be­tween Microbial Fuel Cell and Microbial Electrolysis Cell Operation as a New Method to Control H**2** O**2** Level in Bioelectro­Fenton System[J .Journal of Power Sources， 2015， 291: 108-116.

[68 YUAN H Y， LIU P P， WANG N， et al.The Influence of Soil Prop­erties and Geographical Distance on the Bacterial Community Com­positions of Paddy Soils Enriched on SMFC Anodes[J . Journal of Soils and Sediments，2018，18(2):517-525.

[69 吴萍萍，李录久，王家嘉，等.秸秆生物炭对矿区污染土壤重金 属形态转化的影响J]-生态与农村环境学报,2017,33 (5): 453-459.[WU Ping-ping， LI Lu-jiu， WANG Jia-jia， et al.Effect of Application of Straw-Derived Biochar on the Forms of Heavy Metals in Mining Contaminated Soil[J .Journal of Ecology and Rural En- vironment，2017，33(5):453-459.

[70 黄小娟，江长胜，郝庆菊.重庆溶溪锰矿区土壤重金属污染评价 及植物吸收特征J]-生态学报，2014, 34 (15) :4201 -4211.

[ HUANG Xiao-juan， JIANG Chang-sheng， HAO Qing-ju. Assessment of Heavy Metal Pollutions in Soils and Bioaccumulation of Heavy Metals by Plants in Rongxi Manganese Mineland of Chongqing[J .Acta Ecologica Sinica，2014，34(15) : 4201-4211.

[71 杨金燕，杨锴，田丽燕，等.我国矿山生态环境现状及治理措施

J .环境科学与技术,012,5(增刊 2) : 182-188. YANG Jin- yan， YANG Kai， TIAN Li-yan， et al.Environmental Impacts ofMin- ing Activities in China and the Corresponding Management and Re­mediation Strategies: An Overview[J . Environmental Science and Technology，2012，35 (Suppl. 2):182-188.

72张力，王树•浅谈金属矿山土壤重金属污染及其修复J]-有色 金属(矿山部分),2007, 59 (4) : 38-40. [ZHANG Li, WANG Shu. Brief Review on Heavy Metal Pollution Soils and Remedy of Contaminated Soils in Metallic Mines[J .Nonferrous Metals ( Min­ing Section) ，2007，59(4) : 38-40.

作者简介: 王海兰( 1994—) ，女，江西吉安人，硕士生，从事 土壤污染治理与土壤修复研究。E-mail： 416659639 @ qq.com

( 责任编辑 : 陈 昕 )