



文章栏目: 土壤污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201911024

中图分类号 X53

文献标识码 A

王健伟, 白建峰, 顾卫华, 等. 嗜酸细菌在不同强度微电场下对电子废物拆解场地土壤重金属的脱除效果[J]. 环境工程学报, 2020, 14(5): 1336-1342.

WANG Jianwei, BAI Jianfeng, GU Weihua, et al. Removal effect of heavy metals from the soil of electronic waste dismantling site by acid bacteria under different intensity micro-electric field[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2020, 14(5): 1336-1342.

嗜酸细菌在不同强度微电场下对电子废物拆解场地土壤重金属的脱除效果

王健伟^{1,2,3}, 白建峰^{1,2,3,*}, 顾卫华^{1,2,3}, 苑文仪^{1,2,3}, 赵静^{1,2,3}, 庄绪宁^{1,2,3}, 刘倩^{1,2,3}, 张承龙^{1,2,3}, 王景伟^{1,2,3}

1. 上海第二工业大学电子废弃物研究中心, 上海 201209

2. 上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 201209

3. 上海第二工业大学资源循环科学与工程中心, 上海 201209

第一作者: 王健伟(1995—), 男, 硕士研究生。研究方向: 固体废物资源化。E-mail: 827402956@qq.com

*通信作者: 白建峰(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向: 电子废弃物资源化等。E-mail: jfbai@sspu.edu.cn

摘要 为了高效脱除土壤中的重金属, 在电场作用的条件下, 研究不同强度的微弱直流电流对嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A.f*) 脱除电子废物拆解场地污染土壤中重金属的影响, 设置了 20、60 和 100 mA 3 个梯度的电流强度, 并分别设置接菌外加电场(F)、接菌不加电场的对照(CK1)和不接菌种外加电场的对照(CK2), 总计 9 个处理, 连续施加微电场 5 d, 测定目标重金属的脱除率。结果表明: 在电流强度为 20 mA 的条件下, *A.f* 菌提高了对污染土壤重金属的脱除率。在第 5 天, 对土壤中重金属 Zn、Cu、Ni、Cd、Cr 的脱除效果最佳, 脱除率分别达到 91%、72%、78%、85%、56%; 脱除后, 土壤重金属含量低于《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600-2018)中的要求。加菌加电场的处理与单施加电场或接菌处理的条件相比, 土壤重金属的脱除率提高 18% 以上。研究发现, 嗜酸细菌在 20 mA 左右的微电场作用下可以存活, 施加适当电场可以提高 *A.f* 菌对污染土壤的重金属脱除率, 也为电化学和微生物联合修复土壤的实际应用提供了参考。

关键词 嗜酸细菌; 电场刺激; 电子废物; 重金属污染; 土壤修复

重金属元素不易溶于水, 治理困难, 污染危害大, 从而对人类的健康状况产生了非常不利的影 响^[1]。目前, 对重金属污染土壤的修复技术主要以物理化学法为主, 以电动法、微生物法和联合修复为辅^[2]。电动法是在电场的作用下, 以电透渗或电迁移的方式向电极运输土壤中的重金属离子(如 Pb、Cd、Cr、Zn 等), 再集中收集处理。ALLIOUX 等^[3]开发了一种新的装置, 从液体中脱盐并回收珍贵金属离子, 如铜、锌、镍、银和锌/铜离子混合物, 然后通过简单的电氧化工艺, 使金属沉积后得以回收。有研究^[4]发现, 脱除某些元素(如 Hg)或导电性不良的矿物(如某些硫化物)

收稿日期: 2019-11-06; 录用日期: 2020-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21307080); 上海协同创新中心建设项目(ZF1224); 上海市高原学科-环境科学与工程(资源循环科学与工程); 上海第二工业大学重点学科建设项目(XXKZD1606); 上海第二工业大学研究生项目基金(EGD18YJ0054)

时,添加适当的化学药品,在约3个月内,通过与植物技术的联用,脱除了60%的Hg。微生物对于土壤改善和污染治理也具有优良的效果,主要通过对污染物的吸附作用、污染物形态的形态转换以及污染物之间的电子转移,达到脱除重金属的目的^[5]。在众多微生物中,嗜酸性氧化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*, *A.f*)是一种具有极强耐受性的好氧菌,长期生活在高浓度重金属环境中的*A.f*菌能形成一定的耐性和抗性^[6],驯化后对重金属具有良好的脱除效果。

把微生物和电化学技术联合起来,已成为当今的研究热点,有利于提高生物的修复效率。GILADI等^[7]发现,微弱的电场作用可以抑制金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*, *S.aureus*)的生长。但也有研究^[8]表明,通过施加10~100 mA直流微弱电流能够刺激大肠杆菌(*Escherichia coli*)的生长和活,这表明施加微弱的直流电可以加速微生物的生长。MAILLACHERUVU等^[9]发现,在0.46 V·cm⁻¹的电场强度下,有利于好氧微生物的培育,有利于增加微生物活性。

本研究针对实际电子废物拆解场地的重金属污染土壤,通过施加不同强度的微弱直流电,研究弱电场条件下嗜酸氧化亚铁硫杆菌对污染土壤中重金属脱除的影响。在保证对土壤扰动小、不易造成二次污染和低成本等优点的前提下,有效解决微生物修复土壤耗时长、效率低的缺陷。研究结果不仅可以提高污染土壤的重金属脱除效率,也为电化学与微生物联合修复土壤的实际应用提供了参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本实验使用的土壤样品按《土壤环境监测技术规范》中的相关要求^[10],在浙江省温岭某电子废弃物拆解场地附近多点混合取样,采集0~20 cm表层土壤混合样品。土样经剔除植物根系、石砾后,过100目筛,密封保存备用。采用HNO₃-HF-HCl消解体系^[11]对制备土样进行微波消解。

完全消解后,测定得到供试土壤的基本特征:pH为8.1,含水率为4.3%,有机质含量为6.7%,Zn、Cu、Ni、Cd、Cr的质量分数分别为(18 000±100.5)、(3 973±36.4)、(368±22.7)、(41±1.3)、(502±31.6) mg·kg⁻¹。

供试菌种从德兴铜矿区土壤样品中筛选并分离得到,后经过实验室多次驯化富集^[12]。

9K培养基配方:硫酸铵((NH₄)₂SO₄) 3 g·L⁻¹、磷酸氢二钾(K₂HPO₄) 0.5 g·L⁻¹、氯化钾(KCl) 0.1 g·L⁻¹、七水硫酸镁(MgSO₄·7H₂O) 0.5 g·L⁻¹、硝酸钙(Ca(NO₃)₂) 0.01 g·L⁻¹、七水硫酸亚铁(FeSO₄·7H₂O) 44 g·L⁻¹。用浓硫酸(H₂SO₄, 40%)稀释过后的溶液调pH至2.0。

实验仪器:高纯度石墨电极(C, 99.9%, 上海碳素厂);精密电子天平(AL204, 瑞士MEMETTLER TOLEDO公司);移液枪(BIOHIT, 赛默飞世尔科技中国有限公司);pH/电位计(STARTER3100, 上海奥豪斯仪器有限公司);恒温振荡培养箱(ZHWY-2112B, 上海智城分析仪器有限公司);微波消解仪(ANTON PAAR);电感耦合等离子体光谱仪(ICAP-7200, 赛默飞世尔科技中国有限公司);紫外可见光分光光度计(TU-1810D, 北京普析通用仪器有限公司)。

1.2 实验方法与分析方法

称取1 g制备土样,加至盛有50 mL 9K培养基的150 mL的特制封闭电解容器中。初始pH为2,再向9K培养基接入体积分数10%的*A.f*菌,将2根直径6 mm石墨电极插入后将容器封闭,保证在通气的条件下尽可能地减少液体的损失,电极间距离为5 cm。将装置放于温度30 ℃、转速100 r·min⁻¹的恒温水浴摇床中,连接直流稳压电源进行培养。设置3个电流强度处理,分别是20、60和100 mA,每个处理外加1个不加电场的空白对照组(CK1)和1个不接菌种的空白对照组(CK2),每个处理重复3次。周期为5 d。

在第0、1、2、3和5天采集石墨电极以及培养基的样品。用5% HNO₃消解石墨电极表面的电

沉积并定容于 50 mL 容量瓶内。在培养基样品与电沉积消解后, 样品按 1:20 与 1:100 比例用 5% HNO_3 稀释, 供分析目标重金属含量用。

对采集的土壤样品利用紫外可见分光光度计测定有机质的质量比^[13]; 利用 pH 计、氧化还原电位仪对实验过程中的 pH、Eh 进行测定; 用 ICP-OES 分析稀释后的液态样品中重金属 Zn、Cu、Ni、Cd、Cr 的浓度。

2 结果与讨论

2.1 *A.f* 菌在不同电流强度下 pH 的变化

如图 1(a) 所示, 与 2 组对照相比, 20 mA 实验组菌液的 pH 随时间的变化呈现小幅度上升, 随后下降并趋于稳定。在 0~1 d 上升趋势明显; 在 1~2 d 呈下降趋势; 在 3~5 d 变化不明显, 且 pH 稳定在 2.1。加菌无电场对照组 (CK1) 在 0~1 d 上升, 其 pH 在 1~5 d 维持在 3.5 左右; 加电场无菌对照组 (CK2) 在第 5 天的 pH 保持在 2.6 左右, 变化趋势略同于 CK1 对照组。

由图 1(b) 和图 1(c) 可以看出, 施加 60 mA 与施加 100 mA 电流强度的实验组 pH 在第 1 天后变化不明显, 5 d 后, pH 稳定在 2.3。与 CK2 对照相比, 施加 60 mA 与施加 100 mA 的实验组随时间变化不明显, 变化曲线大致相同。综上所述, 在电场的作用下, 对于电子废物拆解场地的重金属污染土壤来说, 施加 60 mA 与 100 mA 的微弱电流后, 5 d 后的 pH 为 2.3。

当 *A.f* 菌用于生物淋滤系统时, 系统中 pH 的下降是嗜酸微生物大量繁殖的标志^[14]。在厌氧条件下, *A.f* 菌可以氧化元素硫并还原三价铁, 出现了细胞的增殖^[15], 同时产生 H^+ , 降低 pH, 反应见式 (1)。



土壤的缓冲作用会让 pH 在第 1 天有一定程度的上升。当系统施加微弱直流电后, 菌液中仍存在微弱的电化学作用, 阳极得到电子, 导致 H_2 的产生, 从而使 H^+ 浓度略微下降。当菌液中发生电解水反应时, 阳极所产生的 H^+ 形成了一个向阴极移动的酸区; 阴极产生的 OH^- 形成一个向阳极移动的碱区。当酸区的移动速度大于碱区时, 使原本酸性菌液的 pH 呈现下降趋势^[16], 所以 pH 在第 1 天后下降。因此, 在 20 mA 直流稳压电场的作用下, 微电场可为 *A.f* 菌创造更加适宜的生存环境。

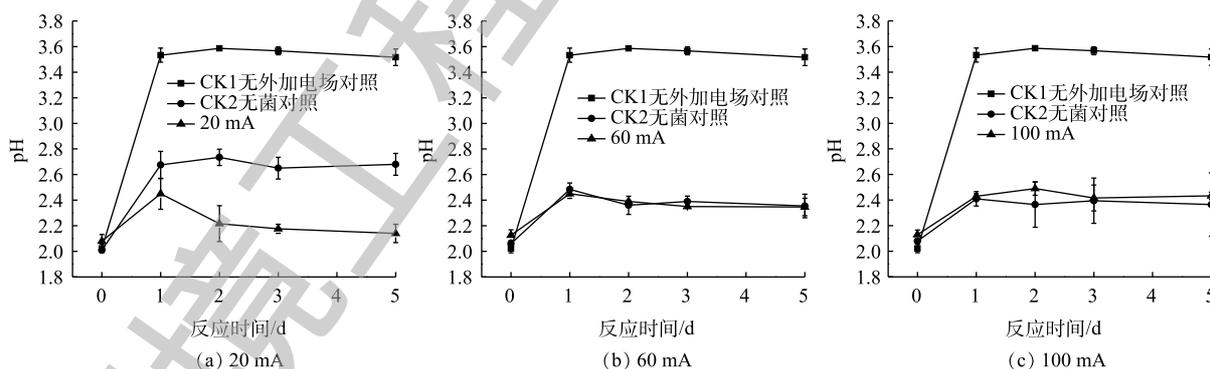


图 1 不同电流强度下菌液 pH 随时间的变化

Fig. 1 Changes in pH of bacteria liquid with time at different current intensities

2.2 *A.f* 菌在不同电流强度下氧化还原电位 (Eh) 的变化

如图 2 所示, 在 9 种处理中, 5 d 后, 施加 20 mA 的微弱电流的实验组氧化还原电位 (Eh) 最高, 呈上升趋势, 与 2 组对照相比, 变化各不相同。由图 2(a) 可以看出, 20 mA 实验组在 1 d 后的 Eh 下降到 245 mV; 在 5 d 后, Eh 达到 280 mV。CK1 对照组的上升趋势不明显, 5 d 后的 Eh 维持在 200 mV; CK2 对照组在 1~3 d 呈现下降趋势, 并在 3~5 d 稳定在 250 mV。

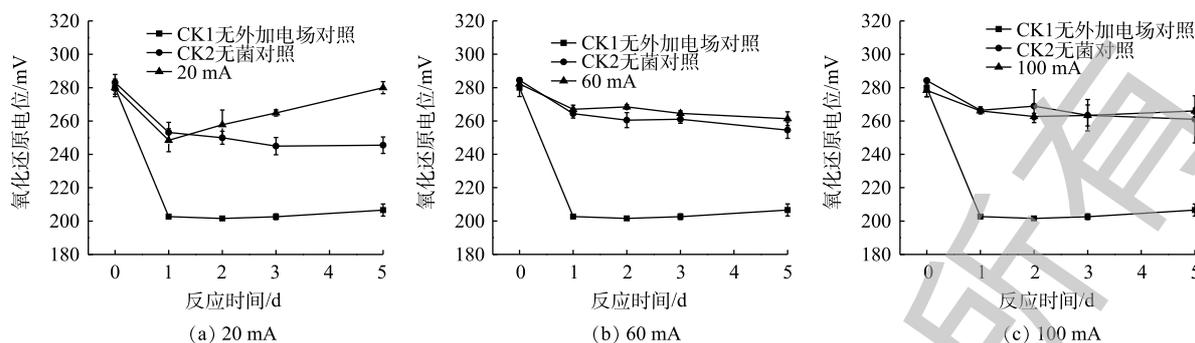


图2 不同电流强度下菌液氧化还原电位随时间的变化

Fig. 2 Changes of redox potential of bacterial solution with time under different current intensities

由图2(b)与图2(c)可知,在60 mA与100 mA电流强度的条件下,实验组与相应的CK2对照组的Eh变化规律大致相同。在电化学反应的作用下,5 d后的Eh达到260~270 mV,高于20 mA电流强度条件下的CK2对照组。综合来看,20 mA实验组的Eh更高,变化更明显。这说明在微电场的作用下,整个体系的氧化还原能力更强。

对*A.f*菌施加20 mA的微电场,Eh明显升高。在生物电化学反应中,氧还原反应是生物呼吸等生命过程中最重要的反应,也是能源转换系统的重要反应^[17]。从图2(a)中可以看出,20 mA实验组的Eh明显上升,这是微生物和电化共同作用的结果,外加适宜强度的直流电不仅可以促进细菌生长,加速菌体生长代谢的过程,还能增加细胞膜的通透性^[18]。在生物淋滤系统中,Eh也是反映菌种生物活性的标志之一^[14],同时体现了体系中金属离子氧化还原能力的强弱,Eh的上升有利于污染土壤中重金属的脱除。综上所述,对*A.f*菌施加20 mA的微电场,不仅增强了*A.f*菌的活性,也利于在石墨电极上还原金属离子。

2.3 不同电流强度对重金属脱除率的影响

由图3可知,当电流强度为60 mA和100 mA时,在相应电流强度下,CK2对照组相比于F实验组对土壤中Zn、Cu、Ni、Cd和Cr脱除率的提升不明显。这说明在电流强度为60 mA与100 mA的条件下,整个体系的反应以电场作用为主导,且这样的电流强度对*A.f*菌淋洗土壤中的重金属存在消极的影响。这是由于实验所选用的嗜酸细菌(*A.f*),对于直流微弱电流的耐受性达到了极限,从而抑制了嗜酸细菌的氧化还原反应。在电流强度为100 mA时,对Zn、Cu、Cd、Cr的脱除率提升不明显。这说明当体系内的电场作用成为主导时,微弱直流电的小幅度提升不能提高重金属的脱除效率。根据电化作用的机理,当体系的电流强度越大时,重金属离子迁移的速率越快。以上情况说明,施加不同强度的微弱直流电,对污染土壤中的重金属确实存在影响,但是具体的影响还有待实验探究。而在20 mA条件下,F实验组明显提高了污染土壤中重金属的脱除率。土壤中Zn、Cu、Ni、Cd和Cr的脱除率较CK2对照组分别提高74%~91%、58%~72%、62%~78%、57%~85%和46%~56%。在20 mA的微电场条件下,相较CK1对照组,*A.f*菌对目标重金属的脱除率提高得更多,其中脱除Cu的提升效果最为明显,由10%提高至72%。可见,在电场的作用下,*A.f*菌对于污染土壤中重金属的脱除效果具有十分积极的影响。在20 mA的电场作用下,*A.f*菌可以提高脱除土壤中重金属的效果。

由图3(a)可以看出,Zn的脱除率达到最高。对于重金属Zn来说,20 mA条件下的F实验组与CK2对照组相比,对Zn的脱除率高出16%,这是由于对*A.f*菌施加微电场的引起的。相比于20 mA条件下的CK1对照组对Zn的脱除率提升不高的原因是,在实验前,土壤中的Zn离子大部分是以离子态的形式存在的^[19]。在培养基初始pH为2的条件下,浸出液中已有大量离子态的Zn,这些Zn离子再通过电场作用迁移至装置的阴极。

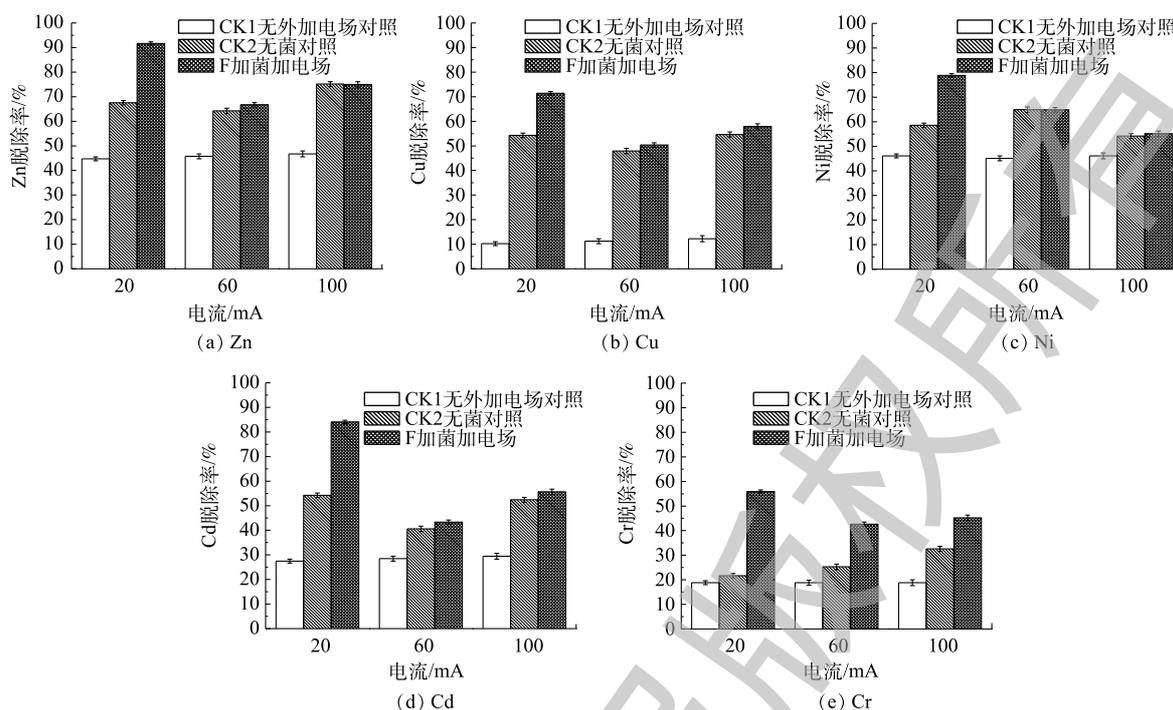


图3 不同电流强度对重金属脱除率

Fig. 3 Removal rate of heavy metal at different current intensities

由图3(b)可知,施加20 mA的电场使*A.f*菌对Cu的脱除率高出CK2对照组14%。这是因为在电场作用下,微生物淋滤的 Fe^{2+} 出现了定向迁移,导致微生物在实验后期的养分不足,从而使Cu的硫化物结合态被*A.f*菌氧化进入的溶液速度减缓^[20]。电流强度与反应时间也会对Cu离子的脱除效果产生影响,在不抑制*A.f*菌生长活动的前提下,增加反应时间,该体系对Cu脱除效果的提升仍然会十分明显^[21]。

图3(c)表明,相较于20 mA条件下的F实验组和其他电流条件下的CK2对照组,Ni离子的脱除率可高出15%。这是由于在电场的作用下, Ni^{2+} 容易与 OH^- 形成沉淀 $\text{Ni}(\text{OH})_2$,pH对Ni离子的影响非常大^[22]。在本体系中,酸性环境非常利于Ni离子迁移到阴极上,所以电场的的作用会较为明显,从而导致在20 mA条件下F实验组的脱除率提升并不明显。但是,较低的pH会对阳极产生不利影响,从而破坏体系的稳定性。

对于重金属Cd来说(图3(d)),经过驯化的*A.f*菌对Cd具有一定的耐受性,20 mA的电流条件下F实验组对Cd的脱除率高出CK2对照组28%。因为Cd离子在电场作用下的活动性有限,处于电场内不同位置的Cd离子,其运动速率与该位置到阳极的距离成反比^[23]。而F实验组在*A.f*菌的作用下,使更多的Cd成为离子态,让Cd离子向阴极运动,从而被脱除。

由图3(e)可以看出,20 mA条件下的F实验组对重金属Cr的脱除率仅高出其他电流条件下的F实验组10%。这是由于Cr在土壤中会以 Cr^{3+} 、 Cr^{6+} 的形式存在,而大部分 Cr^{3+} 会形成 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 沉淀。这些沉淀在电场作用下难以迁移,而土壤中 Cr^{6+} 会以含氧阴离子的形式存在,在电场的作用下向阳极区域迁移^[24]。*A.f*菌通过自身的代谢作用,将土壤中硫化物结合态的Cr浸出。由于土壤中硫化物结合态的Cr含量有限,导致*A.f*菌对Cr的浸出量较少,使Cr的脱除率低于其他重金属。研究表明,在20 mA的微电场作用下,*A.f*菌可以更高效地脱除电子废弃物拆解场地土壤中重金属。在第5天时,20 mA条件下对土壤中重金属Zn、Cu、Ni、Cd、Cr的脱除效果最佳,脱除率分别达到91%、72%、78%、85%、56%。

3 结论

1) 在不同强度的微弱直流电场作用下, *A.f*菌脱除电子废物拆解场地污染土壤中重金属的研究结果表明: 在 20 mA 直流稳压电场的作用下, 可以为 *A.f*菌创造更加适宜的生存环境, 可以提高整个体系的氧化还原能力。

2) 在 20 mA 直流稳压电场的作用下, *A.f*菌对 Cu 脱除率的提升效果最为明显。当电流强度为 60 mA 以上时, 对 *A.f*菌淋洗土壤中的重金属存在消极的影响。

3) 当 20 mA 直流稳压电场作用于 *A.f*菌时, 可以高效脱除电子废物拆解场地的土壤重金属 Zn、Cu、Ni、Cd、Cr, 5 d 后, 其去除率分别达到 91%、72%、78%、85%、56%。与仅施加电场或接菌的条件相比, 脱除率提高 18% 以上, 脱除后的土壤重金属含量低于建设用地土壤质量标准 (GB 36600-2018)。因此, 将 *A.f*菌置于 20 mA 的微电场条件下, 可以高效脱除电子废弃物拆解场地土壤中高浓度重金属, 使土壤质量达到国家标准。

参考文献

- [1] DAMRONGSIRI S, VASSANADUMRONGDEE S, TANWATTANA P. Heavy metal contamination characteristic of soil in WEEE (waste electrical and electronic equipment) dismantling community: A case study of Bangkok, Thailand[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(17): 17026-17034.
- [2] YAO Z T, LI J H, XIE H H, et al. Review on remediation technologies of soil contaminated by heavy metals[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 16: 722-729.
- [3] ALLIOUX F M, KAPRUWAN P, MILNE N, et al. Electro-capture of heavy metal ions with carbon cloth integrated microfluidic devices[J]. *Separation and Purification Technology*, 2018, 194: 26-32.
- [4] ROSESTOLATO D, BAGATIN R, FERRO S, et al. Electrokinetic remediation of soils polluted by heavy metals (mercury in particular)[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015, 264: 16-23.
- [5] ZHU X M, CHEN B L, ZHU L Z, et al. Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227: 98-115.
- [6] 刘爱民. 耐镉细菌筛选与吸附镉机理研究及其在镉污染土壤修复中的应用[D]. 南京: 南京农业大学, 2005.
- [7] GILADI M, PORAT Y, BLATT A, et al. Microbial growth inhibition by alternating electric fields[J]. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, 2008, 52(10): 3517-3522.
- [8] 宋波. 电场刺激技术在微生物工程中的应用[J]. *生物技术进展*, 2012, 2(5): 345-348.
- [9] MAILLACHERU V K Y, CHINCHOUD P R. Electrokinetic transport of aerobic microorganisms under low-strength electric fields[J]. *Journal of Environmental Science and Health*, 2011, 46(6): 589-595.
- [10] 国家环境保护总局. 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166-2004[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [11] 郑秀琴, 詹晓珠, 洪曾纯. 王水体系消解-原子荧光法同时测定土壤中砷和汞的研究[J]. *农业资源与环境学报*, 2006, 23(6): 70-72.
- [12] 王景伟, 代双艳, 顾卫华, 等. 多级驯化嗜酸菌淋滤电子废弃物拆解地土壤重金属的效果[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 283-289.
- [13] 中华人民共和国国家技术监督局. 土壤有机质测定法: NY/T 85-1988[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [14] 周鸣. 生物淋滤技术去除矿区土壤中的铜、锌、铅研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [15] 周洪波, 邱冠周, 邬长斌, 等. 嗜酸微生物生态学与矿物生物浸出技术[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(6): 784-788.

- [16] 李欣. 电动修复技术机理及去除污泥和尾砂中重金属的研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2008.
- [17] SONG C J, ZHANG J J. Electrocatalytic oxygen reduction reaction[M]//ZHANG J. PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications. Springer, 2008.
- [18] 周生学. 直流电刺激对细菌生长动态过程的作用研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [19] 杜锁军, 戴艳, 谢东俊, 等. 土壤Zn污染及其治理措施评述[J]. 污染防治技术, 2009, 22(3): 87-90.
- [20] 彭桂群. 生物沥滤-电动修复技术去除城市污泥重金属[C]//《环境工程》编辑部. 《环境工程》2019年全国学术年会论文集(下册). 北京, 2019: 330-334.
- [21] 刘慧, 仓龙, 郝秀珍, 等. 铜污染场地土壤的原位电动强化修复[J]. 环境工程学报, 2016, 10(7): 3877-3883.
- [22] 熊钊, 邵友元, 易筱筠, 等. 电场作用下镍污染土壤的修复过程及机理研究[C]//中国环境科学学会, 2014年中国环境科学学会学术年会论文集. 成都, 2014: 355-362.
- [23] 郑桑桑, 申哲民, 陈学军, 等. 电动修复Cd污染土壤的DBLM模型[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2): 443-448.
- [24] 孟凡生, 王业耀. 铬(VI)污染土壤电动修复影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4): 983-987.
- (本文编辑: 金曙光, 郑晓梅, 张利田)

Removal effect of heavy metals from the soil of electronic waste dismantling site by acid bacteria under different intensity micro-electric field

WANG Jianwei^{1,2,3}, BAI Jianfeng^{1,2,3,*}, GU Weihua^{1,2,3}, YUAN Wenyi^{1,2,3}, ZHAO Jing^{1,2,3}, ZHUANG Xuning^{1,2,3}, LIU Qian^{1,2,3}, ZHANG Chenglong^{1,2,3}, WANG Jingwei^{1,2,3}

1. Waste Electrical and Electronic Equipment Research Centre of Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China

2. Shanghai Collaborative Innovation Centre for Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling, Shanghai 201209, China

3. Research Center of Resource Recycling Science and Engineering, Shanghai Polytechnic University, Shanghai 201209, China

*Corresponding author, E-mail: jfbai@sspu.edu.cn

Abstract In order to efficiently remove heavy metals from soil, the effects of weak DC current with different strengths on heavy metals removal from the polluted soil of electronic waste dismantling site by *ferrothiobacillus ferrooxidans*(*A.f*) were studied. The experiments were conducted as three groups such as the extra-electric field of *A.f* and electric field joint treatment (F), the contrast of *A.f* alone treatment (CK1) and the contrast of electric field alone treatment (CK2), the current intensities with three gradients of 20, 60 and 100 mA were applied under a continuous 5 d micro-electric field, and then nine treatments in total were performed to test the removal rate of target heavy metals. The results showed that the removal rate of heavy metals from contaminated soil by *A.f* was elevated under the current intensity of 20 mA. On the fifth day, the optimal removal effects of Zn, Cu, Ni, Cd and Cr in soil occurred for *A.f*, and their removal rates reached 91%, 72%, 78%, 85%, 56%, respectively. The contents of heavy metals in treated soil were below the requirements of the Soil Environmental Quality Soil Pollution Risk Control Standard for Construction Land (a trial) (GB 36600-2018). Compared with single-forced electric field or *A.f* treatment, the removal rate of soil heavy metals under *A.f* plus electric field treatment increased by over 18%. The study found that acidophilic bacteria can survive under a micro electric field of about 20 mA. Applying an appropriate electric field can increase the removal rate of heavy metals from polluted soil by *A.f* bacteria, it also provide a reference for the practical application of electrochemical and microbial joint soil remediation.

Keywords acid bacteria; electric field stimulation; e-waste; heavy metal pollution; soil remediation