



推荐阅读:

[广西城市污水处理厂污泥产生及处置现状分析](#)

[平顶山市煤矿区土壤重金属污染程度评价](#)

[基于灰色关联分析法的宜昌市空气质量影响因素分析](#)

[废旧锂离子电池流向及管理现状调研](#)

[生物法处理气态污染物的研究现状与应用前景](#)

[环境敏感区农村生活污水处理工艺设计案例分析](#)

[氨法脱硫+低温 SCR 脱硝工艺在焦炉烟气净化中的应用](#)

[反渗透双膜工艺处理印染废水研究进展](#)

[重金属污染土壤修复技术研究进展](#)

[基于 SARIMA 模型的二氧化氮时间序列预测研究](#)

[碳基功能材料在土壤修复中的应用](#)

[虾蟹壳对水中刚果红吸附性能的研究](#)

[农村生活垃圾生物质热解和燃烧气相数值模拟](#)

[基于灰色 GM\(1, 1\)模型的成都市大气污染物浓度预测](#)

[江苏省非道路移动源大气污染排放清单研究](#)

[欧盟 15 国污水污泥产生量与处理处置方法对比](#)

[基于 Hydrus-1D 的粉煤灰堆场 Cr\(VI\) 在包气带中迁移规律的研究](#)

[工业废水活性炭深度处理的研究](#)



移动扫码阅读

章梅,张谷春,黄欣怡,等.电动力修复重金属复合污染土壤关键因素研究进展[J].能源环境保护,2019,33(5):1-5+22.

ZHANG Mei,ZHANG Guchun,HUANG Xinyi,et al.A review of key factors on electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil[J].Energy Environmental Protection,2019,33(5):1-5+22.

电动力修复重金属复合污染土壤关键因素研究进展

章梅¹,张谷春²,黄欣怡¹,周来¹,朱雪强¹,冯启言¹

(1.中国矿业大学环境与测绘学院,江苏徐州 221116;

2.江苏地质矿产设计研究院,江苏徐州 221000)

摘要:基于电动力修复重金属复合污染土壤的核心机理和关键问题分析,介绍了现有实验模型的特点,详细分析了电动力修复复合污染土壤中主要影响因素,包括土壤理化性质、pH、修复液种类、污染物类型与形态、修复运行时间、电极材料等,提出了不同影响因素下电动力修复复合污染土壤实施的解决措施。

关键词:电动力;重金属;土壤修复

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1006-8759(2019)05-0001-05

A review of key factors on electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil

ZHANG Mei¹,ZHANG Guchun²,HUANG Xinyi¹,ZHOU Lai¹,ZHU Xueqiang¹,FENG Qiyan¹

(1.School of Environmental Science and Spatial Informatics,China University of Mining and Technology,Xuzhou 221116,China; 2.JiangSu Design Institute of Geology for Mineral Resources,Xuzhou 221000,China)

Abstract:Based on the analysis of the mechanism and key problems of electrokinetic (EK) remediation,the characteristics of current experimental model were introduced.The main influencing factors of EK remediation was analyzed,including soil physical and chemical properties,pH,electrolytes types and pollutants types,operation time,electrode materials and so on.The corresponding solutions were put forward.

Key words: Electrokinetic; Heavy metals; Soil remediation

0 引言

调研表明中国多数场地呈复合污染,包括重金属污染复合、重金属-有机污染复合、有机污染复合等^[1]。目前,针对土壤复合重金属污染,常用修复方法包括客土法、淋洗法、固化/稳定化、植物修复、电动力修复及联合修复法等^[2,3]。其中,电动力修复是一种新兴技术,其原理是在污染土壤两端插入电极,在电场和电解水的作用下,通过电化学和电动力学的复合作用(扩散、电渗析、电迁移和电泳等)驱动污染物富集到电极区,然后进行集中处理或分离的过程^[4,5],适用于低渗透性的污

染土壤,能够有效去除土壤中的重金属、有机物等污染物^[6]。电动力修复技术由于具有成本低、适用范围广,且接触有害物质少、可控性强、处理快速且彻底、不破坏原有自然生态环境等优点越来越受到关注。

1 电动力修复污染土壤实验模型

目前,电动力修复土壤技术在我国尚未普遍应用于工程实例^[7,8],多处于小试或中试实验阶段,其中小试实验多采用一维模拟研究装置(单对电极,如图1)^[9-11]。目前小试模型大多采用透明有机材质,土壤室可采用长方体或圆柱体,装置尺

收稿日期:2019-06-12

基金项目:中国煤炭地质总局科技发展专项资金项目(中煤地发科技[2017]487-10);徐州市重点研发计划(社会发展)KC17134;电动力修复铅镉复合污染土壤实验研究(201910290031Z)

第一作者简介:章梅(1993-),女,江苏连云港人,硕士,主要研究方向为土壤与地下水污染与修复。E-mail:zhangmei@cumt.edu.cn

寸没有固定的比例关系,对模型的尺度效应有待进一步研究。技术核心主要由阳极室、污染土壤区和阴极室组成(图1),通过直流电源连接电极板供电,可根据研究需要在土壤室内布置 pH、氧化还原电位等传感器。电动力修复复合污染土壤实验研究的一维装置模型与参数见表1。

此外,部分学者在模拟实验基础上进行了放大或中试实验^[12-14], Villen-Guzman M 等^[14]采用两组不同的装置分别处理 16 g 和 2 000 g 复合重金属污染土壤,结果表明在土壤电阻率相同的情况下,修复重金属污染土壤的能耗与电极间的距

离成正比。从小试—放大—中试实验,受装置尺寸等因素影响,需要逐步完善最佳运行参数和攻克现场应用的关键问题。

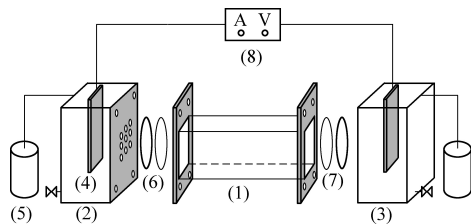


图1 EK 实验装置示意图

(1) 土壤室;(2) 阳极室;(3) 阴极室;(4) 石墨电极;
(5) 电解液储存罐;(6) 橡胶圈;(7) 滤纸;(8) 直流电源

表1 电动力修复污染土壤模拟研究装置参数

编号	模型外形	尺寸(mm)		
		土壤室	阳极室	阴极室
1	长方体 ^[15]	100×30×30	30×30×30	30×30×30
2	长方体 ^[16]	150×38×60	—	—
3	长方体 ^[17]	100×100×115	—	—
4	圆柱 ^[18]	Φ90×360	—	—
5	圆柱 ^[19]	Φ38×200	96×49×94	312×199×199
6	圆柱 ^[20]	Φ40×50	—	—
7	圆柱 ^[14]	Φ80×200	—	—
8	圆柱 ^[21]	Φ100×200	130×130×33	130×130×33

2 电动力修复复合污染土壤的关键因素

电动力修复复合污染土壤的机理十分复杂,修复效果受现场诸多因素的影响,如土壤理化性质、土壤 pH、修复液种类、电极板种类及分布、污染物类型形态、运行时间、电极材料等。

2.1 土壤理化性质

土壤理化性质包括土壤类型、碳酸盐含量、阳离子交换容量、比表面积、pH、电导率、氧化还原电位、Zeta 电势、含水率等,在电动力修复复合污染土壤中均会产生不同程度的影响。

2.1.1 土壤类型

电动力修复中,待修复土壤类型对修复效率有很大的影响。高岭土、黏土、沙土这类具有低渗透性、低氧化还原电位、弱碱性、高可塑性等特点的土壤适合采用电动力修复方法。Ottosen. Lisbeth M 等^[20]用电动力方法修复加标高岭土、加标土壤、场地污染土壤(木材保护场地 A、电缆生产场地 B),探究在完全相同的操作条件下土壤类型对污染物去除效果的影响,实验结果表明,加标高岭土、加标土壤、场地 A、场地 B 中 Cu 的平均去除率

分别为 92%、80%、75%、10%。场地 A 与 B 土壤理化性质相差较大,是去除率相差较大的重要因素之一。Ouhadi. V. R 等^[22]研究结果同样表明,电动力修复 Zn 污染的土壤,加标高岭土中重金属去除率远高于场地污染土的去除率。加标土样中污染物分布均匀,含水率高,且平衡时间较短,重金属多以可交换态、碳酸盐结合态和可还原态存在。相反地,场地污染土壤中污染物分布不均匀,含水率由自然条件决定(降水、地理地质等因素),且因为污染时间很长,重金属分布趋于稳定,导致加标土样的去除率远远高于场地污染土。由此可见,待修复土壤的类型对修复效果有很大影响,应加强场地污染土壤研究。

2.1.2 碳酸盐含量

土壤中碳酸盐主要是难溶性的方解石(CaCO_3)和白云石($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$),在盐碱土中则含有少量易溶性碳酸盐(Na_2CO_3 和 NaHCO_3)^[23]。碳酸盐含量是影响土壤缓冲能力的重要因素之一,其含量越高,土壤 pH 值越难降低,土壤中重金属从土壤颗粒中解吸和溶解的过程更缓慢,延长修复时间,增加修复成本。Ouhadi. V. R^[22]等人用

碳酸盐含量分别为 4%、10%、15%、20%、30% 的高岭土研究电动力修复 Zn 污染土壤,结果表明,碳酸盐含量越低,土壤 pH 值降低越明显,其中 4% 碳酸盐含量的高岭土在加酸为 70 (cmol H/kg-soil) 时, pH 从 9 变为 2.5,而其他对照组 pH 仅维持在 6.5 左右。此外,在土壤 pH 值较高的条件下,容易形成 HM-CO_3 , 导致去除率低。因此,在电动力实验过程中,待修复土壤中碳酸盐含量越高,其缓冲能力越强,土壤 pH 越难降低,重金属不易解吸和溶解,达到修复目标值所需时间越久,相应的修复成本越高。

2.2 土壤 pH 值

土壤 pH 值影响交换位点中重金属的解吸、特定吸附以及许多溶解过程,是影响电动力修复重金属污染土壤的最重要因素之一^[14,21]。电动力修复过程中,在阳极电解产生氢离子 (H^+) 形成酸带向阴极移动,土壤 pH 降低;阴极产生氢氧根离子 (OH^-) 形成碱带向阳极移动,土壤 pH 升高^[21,24]。通常,价态越高,水合半径越小,吸附在土壤颗粒表面的金属越难解吸。研究表明土壤中金属离子解吸顺序如下: $\text{Al}^{3+} < \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ < \text{Na}^+ < \text{Li}^+$ ^[25]。然而重金属的解吸速度受土壤类型和 pH 影响,其排序不固定^[26]。

另外,土壤 pH 影响重金属存在形态。根据 Tessier 五步法^[27,28],土壤中的重金属存在形式分为离子交换态、碳酸盐结合态、Fe-Mn 氧化态、可还原态和残留态,其可溶性依次降低。Kim^[29,30] 等研究表明,在电场及电解水作用下,可去除 90% 以上离子交换态、45%~75% 碳酸盐结合态、15%~30% Fe-Mn 氧化态和 8%~20% 可还原态的重金属污染物。

游离重金属离子在电场作用下迁移至阴极区附近遇 OH^- 形成沉淀,污染物难以去除。在阴极室加酸调节^[31,32],或采用离子交换膜^[20]来削弱阴极区产生的 OH^- 的影响,均能提高重金属去除率。因此,在采用电动力修复重金属污染的土壤时,应着重考虑土壤 pH,因其影响重金属的存在形态和从土壤表面的解吸过程。

2.3 修复液

在电动力修复重金属污染土壤实验中,用去离子水/自来水作修复液,去除率较低。因此,需要采用适宜的修复液提高修复效率。国内外学者的实验中采用氯化钙^[16,24]、氯化钾^[15]、碘化钾、硝酸钾^[21]、醋酸铵^[33,34]、柠檬酸^[9,16,33]、硝酸^[33,35]、盐酸 (HCl)^[19]、醋酸^[36]、乳酸^[37]、氢氧化钠^[19,35]、

乙二胺四乙酸^[38]等作为修复液,其中酸溶液用来调节阴极室 pH,碱溶液用来调节阳极室 pH,盐溶液用来提升导电能力,加快重金属离子电迁移速度,络合剂用来解析土壤颗粒表面的重金属。另外,单一修复液已不能满足修复要求,正逐步研究组合修复液。赵书宁等^[9]的实验中采用 0.01 mol/L Na_2CO_3 为阳极液,0.1 mol/L $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 - \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为阴极液,实验结束后, Cd、Cu、Pb 去除率分别为 99.43%、79.93%、39.36%。特别地,当复合重金属中含有 Cr、Hg、As 时,随着土壤 pH 值的变化会发生氧化还原反应,重金属价态改变,且阴极酸性控制对其修复效果甚微,常采用阳极碱性控制法^[39]或选用络合剂来提高重金属去除率。因此,在掌握土壤理化性质及污染物之后选取合适的修复液至关重要。

2.4 电压梯度和电流

电动力实验中,电极两端所施加的电压大小影响电流大小,电流大小与电解产生的 H^+ 、 OH^- 的量成正比,影响污染物的解吸和溶解速度。若电压梯度过低,则电流低,电迁移和电渗速度缓慢,重金属离子移动速度降低;若电压梯度过高,则电流高,会增加能耗(电能耗与电流的平方成正比^[40])。通常采用的电压梯度范围为 0.5~2.5 V/cm,电流为 1~10 A/m²^[41]。在一维电动力修复模型中(图 1),电流与电压关系如公式(1)所示^[42]:

$$I = \frac{E - [1.23 + 0.059(pH_{\text{阴}} - pH_{\text{阳}})]}{\sum_{i=1}^N \frac{\Delta x \tau}{A \omega} \frac{1}{\sum_{k=1}^{N_k} \lambda_k C_{ik}}} \quad (1)$$

式中: E 是电极两端的电压; N_i 是土壤室被平均分成份数; Δx 是每个分区的土壤厚度; τ 是土壤的曲折度; A 是横截面积; ω 是土壤孔隙度; N_k 是土壤孔隙水中存在的离子种类数; λ_k 是 k 离子的摩尔电导率 ($\text{cm}^2/(\Omega\text{mol})$); C_{ik} 是 k 离子在第 i 个分区中的浓度。

该公式是建立在电迁移是电动力修复重金属污染土壤的唯一驱动机理的假设条件下,然而当土壤存在两种或两种以上重金属污染物时,尤其呈正二价的重金属存在时,会影响电渗析速度和流向方向,如公式(2)所示^[5]:

$$V_e = -\varepsilon \zeta E / \eta \quad (2)$$

式中: V_e 是电渗析速度; ε 是土壤孔隙水的介电常数; ζ 是土壤 Zeta 电位; η 是土壤孔隙水的粘度。

通常, Zeta 电位为负值时,电渗析方向从阳极

流向阴极,但是,当土壤孔隙水中的游离阳离子浓度(尤其是二价重金属阳离子)逐渐增加时,Zeta 电位趋于正值,此时电渗析方向从阴极流向阳极,导致重金属污染物去除率降低。

电能耗与所施加电压、电流的大小密切相关,而能耗逐渐成为电动力修复推广应用的一大难题^[43]。常用的能耗(耗电量)计算模型为^[44]:

$$E = \frac{1}{V_e} \int UI dt \quad (3)$$

式中: E 是处理单位体积污染物所消耗电量, KWh/m^3 ; V_e 是处理土壤体积, m^3 ; U 是施加的电压, V ; I 是施加的电流, A ; t 是电动修复时间, d 。

该模型计算电动力修复过程中所消耗的总电能,包括去除目标污染物和非目标污染物(如土壤

中的常量元素钙、铁、锰等)、电解水、产生的热量等^[45]。脉冲电压,间歇供电均能达到与连续电压去除效果且能有效防止电极腐蚀^[45]。仲洋洋^[48]采用 24 h 开/12 h 关、32 h 开/32 h 关的供电模式处理 Pb 污染土壤,去除率分别为 45.3 %、35.98 %,均高于持续通电 96 h 的去除率,耗电量分别为 33.53 和 46.55 $\text{kW} \cdot \text{h/g}$,均显著低于持续通电的耗电量。但是,受多种因素影响,不同的实验中得到最佳间歇供电模式不尽相同,仍需进一步实验探究。

2.5 其他

如表 2 所示,从小试—放大—中试试验—工程运用中,除了克服上述关键问题之外,还需要考虑电极间距及布设方式、废液中重金属的处理与回收利用等诸多问题。

表 2 国内外电动力修复复合污染土壤研究现状

重金属	土壤类型	强化措施 /修复液	电极	电流密度/(mA/cm) 电压/(V/cm)	修复 时间(h)	去除率% (最高)	研究 阶段	参考 文献
Pb	壤土	—/0.1M 柠檬酸 植物修复/	石墨	—/1	5	45	L	[18]
Pb	农业用地 [⊙]	0.01M EDTA+0.01M Na_2CO_3	—	—/1	29	63	F	[49]
Pb	砂土 [⊙]	土壤润湿/1mM 醋酸	钛/氧化钨	0.031/—	1	80	L	[33]
Cd	黑土	—/0.2 柠檬酸+0.05M CaCl_2	石墨	—/1	29	98.5	L	[16]
Cd	棕壤	0.1M 醋酸	石墨	—/1	9	92.44	L	[21]
Cd	化工厂 [⊙]	EDTA	石墨	—/1-2	4.17	66.7	P	[50]
Cu	高岭土	离子交换膜 /NaNO ₃ +HNO ₃	石墨	—	28	95	L	[20]
Cu	木材保护场地土壤 [⊙]	离子交换膜 /NaNO ₃ +HNO ₃	石墨	—	28	90	L	[20]
Cu	电缆场地土壤 [⊙]	离子交换膜 /NaNO ₃ +HNO ₃	石墨	—	28	16	L	[20]
Cr	高岭土	PRB/0.01MKCl	石墨	—/2	1	80	L	[15]

(注:⊙表示场地污染土,L表示小试阶段,P表示中试阶段,F表示场地应用阶段,PRB表示渗透性反应墙)

3 结论

(1) 电动修复过程中,装置模型及尺寸、污染物类型、土壤理化性质、pH 范围、修复液种类、电压梯度和电流、电极材料、修复时间等因素均会影响去除效果,其中低土壤 pH 值、适宜的修复液及合理的修复时间能显著提高重金属去除率。

(2) 小试实验条件及结果较为理想,重金属去除率可达 90 % 以上,而现场场地条件复杂,不可控因素较多,应加强场地复合污染土壤的修复研究,逐步转向中试及场地应用。

(3) 针对复杂的场地污染土壤,选择适宜的电解液对污染物的去除至关重要,增加电压梯度(电

流)、延长修复时间等均能提高重金属去除率,但会增加能耗,需统筹兼顾。

参考文献

- [1] 陈能场,郑煜基,何晓峰,等.全国土壤污染状况调查公报探析[J].农业环境科学学报,2017(9):1689-1692.
- [2] 张涛,陈明功,刘宗亮.土壤电动修复技术及其研究进展[J].现代农业科技,2016(22):164-165.
- [3] YEUNG A T, GU Y. A review on techniques to enhance electrochemical remediation of contaminated soils[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 195: 11-29.
- [4] 林增森,杨欣欣,桑鹏鹏,等.电动力学修复污染土壤的改进技术[J].大学物理实验,2014(4):10-15.
- [5] ACAR Y B, ALSHAWABKEH A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27

- (13):238-247.
- [6] HAMED J, ACAR Y B, GALE R J. "Pb(II) Removal From Kaolinite by Electrokinetics" [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1991, 117 (2): 241-271.
- [7] 刘刚. 土壤重金属污染电力修复技术研究进展: "第四届重金属污染防治及风险评价研讨会"暨重金属污染防治专业委员会2014年学术年会[C]. 中国江苏盐城, 2014.
- [8] 马科峰, 王海芳, 卢静, 等. 电力强化植物修复土壤重金属的研究进展[J]. *应用化工*, 2019, 48(3): 709-712.
- [9] 赵书宁, 樊丽, 侯隽, 等. 复合重金属污染高岭土的电动修复[J]. *化工环保*, 2017(4): 481-486.
- [10] 袁立竹. 强化电动修复重金属复合污染土壤研究[D]. 中国科学院大学, 2017.
- [11] WILSON D J, RODRIGUEZ-MAROTO J M, GOMEZ-LAHOZ C. Electrokinetic Remediation, I. Modeling of Simple Systems [J]. *Separation Science and Technology*, 1995 (No.15): 2937-2961.
- [12] ACAR Y B, ALSHAWABKEH A N. Electrokinetic Remediation. I: Pilot-Scale Tests with Lead-Spiked Kaolinite [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1996 (No. 3): 173-185.
- [13] R L, J A, P C, et al. Electroremediation of a natural soil polluted with phenanthrene in a pilot plant. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014: 142-150.
- [14] VILLEN-GUZMAN M, PAZ-GARCIA J M, RODRIGUEZ-MAROTO J M, et al. Scaling-up the acid-enhanced electrokinetic remediation of a real contaminated soil [J]. *Electrochimica Acta*, 2015, 181: 139-145.
- [15] ZHANG J, XU Y, LI W, et al. Enhanced remediation of Cr(VI)-contaminated soil by incorporating a calcined-hydralcite-based permeable reactive barrier with electrokinetics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 239-240: 128-134.
- [16] YUAN L, XU X, LI H, et al. The influence of macroelements on energy consumption during periodic power electrokinetic remediation of heavy metals contaminated black soil [J]. *Electrochimica Acta*, 2017, 235: 604-612.
- [17] CHUNG H I, LEE M. A new method for remedial treatment of contaminated clayey soils by electrokinetics coupled with permeable reactive barriers [J]. *Electrochimica Acta*, 2007, 52 (10): 3427-3431.
- [18] ZULFIQAR W, IQBAL M A, BUTT M K. Pb²⁺ ions mobility perturbation by iron particles during electrokinetic remediation of contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2017, 169: 257-261.
- [19] LI D, TAN X, WU X, et al. Effects of electrolyte characteristics on soil conductivity and current in electrokinetic remediation of lead-contaminated soil [J]. *Separation and Purification Technology*, 2014, 135: 14-21.
- [20] OTTOSEN L M, LEPKOVA K, KUBAL M. Comparison of electro-dialytic removal of Cu from spiked kaolinite, spiked soil and industrially polluted soil [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(1): 113-120.
- [21] ZHANG P, JIN C, SUN Z, et al. Assessment of Acid Enhancement Schemes for Electrokinetic Remediation of Cd/Pb Contaminated Soil [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227 (6): 217-227.
- [22] OUHADI V R, YONG R N, SHARIATMADARI N, et al. Impact of carbonate on the efficiency of heavy metal removal from kaolinite soil by the electrokinetic soil remediation method [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 173(1-3): 87-94.
- [23] 王莲莲, 杨学云, 杨文静. 土壤碳酸盐几种测定方法的比较 [J]. *西北农业学报*, 2013(5): 144-150.
- [24] TANG X, LI Q, WANG Z, et al. In situ electrokinetic isolation of cadmium from paddy soil through pore water drainage: Effects of voltage gradient and soil moisture [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 337: 210-219.
- [25] BRADY N C. *The Nature and Properties of Soils* [M]. Prentice Hall, 2016.
- [26] CHRISTOPHI C A, AXE L. Competition of Cd, Cu, and Pb adsorption on goethite [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2000, 126 (1): 66-74.
- [27] 成佐, 黄华. 土壤中重金属形态的分析研究进展 [J]. *广东化工*, 2017(8): 147-148+156.
- [28] 范控喜. 土壤重金属污染与控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [29] SO K, KW K. Monitoring of electrokinetic removal of heavy metals in tailing-soils using sequential extraction analysis. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2001 (No.3): 195-211.
- [30] KIM S O, KIM K W, BEN D S. Evaluation of Electrokinetic Removal of Heavy Metals from Tailing Soils [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2002, 128 (8): 705-715.
- [31] REDDY K R K U, CHINTHAMREDDY S. Enhanced Electrokinetic Remediation of Heavy Metals in Glacial Till Soils Using Different Electrolyte Solutions [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2004 (No.4): 442-455.
- [32] WANG J, ZHANG D, STABNIKOVA O C N E, et al. Evaluation of electrokinetic removal of heavy metals from sewage sludge. [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2005 (No. 1-3): 139-146.
- [33] MURILLO-RIVERA B, GONZÁLEZ I, OROPEZA-GUZMAN M T, et al. Evaluation of lead removal from sandy soils using different electrolytes in electrokinetic experiments; prospective for remediation of a real site contaminated with mining wastes [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2010, 40(6): 1145-1152.
- [34] CHEN J J Y C, YANG S, WU C, et al. Effect of ammonia as a complexing agent on electrokinetic remediation of copper-contaminated soil [J]. *Separation and Purification Technology*, 2011 (No.2): 157-163.
- [35] OUHADI V R, YONG R N, SEDIGHI M. Influence of heavy metal contaminants at variable pH regimes on rheological behaviour of bentonite [J]. *Applied Clay Science*, 2006, 32 (3-4): 217-231.
- [36] LM R, BD D, JS T, et al. Behavior of zinc, nickel, copper and cadmium during the electrokinetic remediation of sediment from the Great Backa Canal (Serbia) [J]. *Journal of Environmental*

酶的活性,而且增强了微生物群落的多样性和丰富度,促进优势降解菌株 *Bacillus* (相对丰度由 14.87 % 增加到 17.76 %)、*Pseudomonas* (相对丰度由 6.35 % 增加到 16.50 %)、*Rhizobium* (相对丰度由 5.29 % 增加到 10.76 %) 以及 *Sphingomonas* (相对丰度由 3.37 % 增加到 3.39 %) 的生长。

参考文献

- [1] 金相灿. 有机化合物污染化学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1990.
- [2] 张杰, 李小明, 杨麒, 等. 采用 AOA 模式在 SBR 中实现同步脱氮除磷 [J]. 给水排水, 2007, 23 (17): 19-21.
- [3] 王艳芬, 王海磊, 刘国生, 等. 序批式反应器生物强化处理苯酚废水的研究 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (5): 42-46.
- [4] 徐伟辉, 严叶卫. 含酚废水处理工艺综述 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2005, 28 (1): 54-56.
- [5] Zhang J, Zhang Y, Quan X, et al. An anaerobic reactor packed

with a pair of Fe-graphite plate electrodes for bioaugmentation of azo dye wastewater treatment [J]. Biochemical Engineering Journal, 2012, 63: 31-37.

- [6] 季翔宇, 徐进, 刘佳鑫, 等. 电强化磁固定化菌株 *Cupriavidus* sp. JS 耦合体系治理含苯酚废水 [J]. 环境污染与防治, 2018, 40 (3): 247-251.
- [7] 原国家环境保护局. 水和废水监测分析方法 [M]. 第 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 211-213.
- [8] Wang H, Chen Z, Miao J, et al. A novel approach for mitigation of membrane fouling: Concomitant use of flocculant and magnetic powder [J]. Bioresource Technology, 2016, 209: 318-325.
- [9] Wang Y, Qin J, Zhou S, et al. Identification of the function of extracellular polymeric substances (EPS) in denitrifying phosphorus removal sludge in the presence of copper ion [J]. Water Research, 2015, 73: 252-264.
- [10] Jiang B, Du C, Shi S, et al. Enhanced treatment performance of coking wastewater and reduced membrane fouling using a novel EMBR [J]. Bioresource Technology, 2017, 229: 39-45.

(上接第 5 页)

Science and Health. Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering, 2010 (No.9): 1134.

- [37] ZHOU D, CANG L, ALSHAWABKEH A N, et al. Pilot-scale electrokinetic treatment of a Cu contaminated red soil [J]. Chemosphere, 2006, 63 (6): 964-971.
- [38] GIANNIS A, GIDARAKOS E. Washing enhanced electrokinetic remediation for removal cadmium from real contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2005, 123 (1-3): 165-175.
- [39] LÓPEZ VIZCAÍNO R, YUSTRES A, ASENSIO L, et al. Enhanced electrokinetic remediation of polluted soils by anolyte pH conditioning [J]. Chemosphere, 2018, 199: 477-485.
- [40] KIM D, JO S, YOO J, et al. Ex situ pilot scale electrokinetic restoration of saline soil using pulsed current. [J]. Separation and Purification Technology, 2013: 282-288.
- [41] ALSHAWABKEH A N, YEUNG A T. Practical Aspects of In-Situ Electrokinetic Extraction [J]. Journal of Environmental Engineering, 1999 (1): 27-35.
- [42] REDDY K R, CAMESELLE C. Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils Sediments and Groundwater [M]. 2009.
- [43] VIRKUTYT J, SILLANPAA M, LATOSTENMAA P. Electrokinetic soil remediation-critical overview [J]. Sci Total Environ, 2002, 289 (1-3): 97-121.

- [44] SUN T R, OTTOSEN L M, JENSEN P E, et al. Effect of pulse current on acidification and removal of Cu, Cd, and As during suspended electro-dialytic soil remediation [J]. Electrochimica Acta, 2013: 187-193.
- [45] VILLEN-GUZMAN M, GARCIA-RUBIO A, PAZ-GARCIA J M, et al. The use of ethylenediaminetetraacetic acid as enhancing agent for the remediation of a lead polluted soil. [J]. Electrochimica Acta, 2015: 82-89.
- [46] ZHOU M, ZHU S, LIU F, et al. Pulse-enhanced electrokinetic remediation of fluorine-contaminated soil [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2014 (11): 2008-2013.
- [47] JEONA E, RYUA S, BAEKAB K. Application of solar-cells in the electrokinetic remediation of As-contaminated soil. [J]. Electrochimica Acta, 2015: 160-166.
- [48] 仲洋洋. 电力修复 Pb 污染土壤的实验研究 [D]. 中国矿业大学, 2015.
- [49] JIH-HSING C, CHENG-DI D, SHAN-YI S. The lead contaminated land treated by the circulation-enhanced electrokinetics and phytoremediation in field scale. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2018: 894-898.
- [50] LIU G L G, LI X L X, WANG J W J, et al. Medium-scale ex suit electrokinetic remediation of Cd and Zn polluted soil enhanced by EDTA, tartaric acid, citric acid and acetic acid, 2017 [C]. 1348-1356.