

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2021.03.007

辅助试剂强化电动修复矿区周边土壤中放射性钍污染

陈敏洁^{1a}, 刘雪峰^{1b}, 李博文^{1b}, 李亚飞^{1b}, 赵丁冉^{1b}, 郑春丽^{1b}

(1. 内蒙古科技大学, a. 生命科学与技术学院,

b. 能源与环境学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为探究矿区周边土壤最佳的电动修复电解液修复参数,实现最优化的试验方案,采用一种新型辅助试剂(柠檬酸和皂素),通过设计7组电动力修复装置,对比研究了0.2 mol/L的柠檬酸和0.2 mol/L柠檬酸与不同浓度皂素的混合溶液作为阴极、阳极电解液,进行电动修复钍污染的土壤,并与去离子水对照,讨论了在辅助试剂下强化电动修复过程,分析了柠檬酸和皂素作为电动修复添加剂的可行性。在电压梯度为1 V/cm,持续通电7 d,随着皂素浓度的增加修复矿区周边土壤中钍的修复效果明显增加,当0.2 mol/L柠檬酸与0.1 mol/L的皂素作为电解液进行修复时效果最佳,钍去除率达到59.94%。

关键词:柠檬酸;皂素;钍污染土壤;电动修复

中图分类号:X53;X591

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2021)03-0036-07

Electric Remediation of Radioactive Thorium Contamination Soil around Mining Area with Auxiliary Reagents

CHEN Min-jie^{1a}, LIU Xue-feng^{1b}, LI Bo-wen^{1b}, LI Ya-fei^{1b},
ZHAO Ding-ran^{1b}, ZHENG Chun-li^{1b}(1a. School of Life Science and Technology, 1b. School of Energy and Environment,
Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: In order to explore the optimal electrolyte repair parameters of electric remediation of soil surrounding mining area and optimize experiment scheme, comparative test with 0.2 mol/L citric acid and 0.2 mol/L citric acid mixed solution with different concentration saponin as cathode and anode electrolyte respectively was conducted to electric repair thorium contaminated soil through design of 7 groups of electric power fixing device and compared with deionized water as control. Reinforcement electric repair process with auxiliary reagent was discussed and analyzed the feasibility with citric acid and saponin as electric repair additives. The results show that effect of thorium restoration in soil around mining area rises significantly with increase of saponin concentration when voltage gradient is 1 V/cm and continuous electrified for 7 days. The best repair effect occurs with removal rate of thorium of 59.94% when 0.2 mol/L citric acid and 0.1 mol/L saponin are used as electrolyte.

Key words: citric acid; saponin; thorium contaminated soil; electric remediation

收稿日期:2020-08-18

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1802904);国家自然科学基金资助项目(41561094,41867061);内蒙古自然科学基金项目(2017MS0401);内蒙古科技成果转化专项项目(2019CG062);内蒙古科技计划项目

作者简介:陈敏洁(1985-),女,讲师,博士生;通信作者:郑春丽(1979-),女,内蒙古兴安人,博士,教授

白云鄂博矿区是我国北方地区稀土资源的主要产区,为多金属共生矿床。在蕴含着大量的重金属元素外,还伴有大量的放射性钍^[1]。随着矿区开采、运输、加工的进行,放射性钍进入人们生活的环境中,在矿区周边动植物和人体组织中均出现了钍元素的富集现象^[2]。钍元素在骨骼中累积会造成结构的变化,进而产生毒性^[3]。因此,寻求一种有效修复稀土污染土壤的技术迫在眉睫。

电动修复技术与其它修复技术相比,具有商业性高、可行性好、投入小、操作简单方便、修复时间短、修复效率高、后续污染少等优点^[4]。电动修复通过在被污染的土壤两侧通电形成电势差,驱动介质中污染物沿电场方向定向迁移,将污染物富集至固定区域后进行集中处理^[5]。此外,不同污染物质的土壤需要选择不同的电解液,不同性质的土壤选择更加行之有效的辅助试剂可以提高修复效率^[6]。

现有的钍污染修复技术有微生物修复技术以及化学淋洗技术。微生物修复技术主要采用硫酸盐还原菌实现放射性元素的固定,修复效率容易受到土壤性质的影响^[7]。化学淋洗技术虽然修复效率高,但淋洗液容易造成二次污染。本文采用电动修复技术修复钍污染的土壤。

1 材料与方法

1.1 试验土壤以及处理方法

试验土壤样品取自包头市白云鄂博矿区。土壤样品在自然状态下进行风干,研磨过 100 目尼龙筛。检测土壤粒径、pH、电导率,结果如下:钍(Th)含量 50 mg/kg、土壤粒径 0.25 mm、pH=7.56、电导率

2.7 dS/m。

1.2 电动修复装置

电动力试验装置如图 1 所示,试验槽采用有机玻璃($L \times W \times H = 20 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$)制成,分土壤室与两个电极室($L \times W \times H = 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$),电极室采用打孔的有机玻璃板和滤纸连接在土壤室的两头,将 400 g 土壤样品逐层装入土壤室并压实,试验所用电极均为镀铂电极,两端加直流电源,实时监测电流。通过蠕动泵(KPP-BO8DA)将电解质溶液在电极室循环,使电极间保持恒定的溶液高度,维持试验的连续运行。

设置电压梯度为 1 V/cm 持续通电 7 d,每天连续工作 24 h。电解质由阴、阳极液循环系统供应,包括蠕动泵和储液罐,每天调节一次电解液的浓度。

在电动修复过程中,保证每个电极室有电解液,电解液储存在储存瓶里,通过蠕动泵以一定的速度(10 L/min)引入相应的电极室,电极室里的电解液达到一定高度后又会循环回电解液储存瓶。采用电流记录仪每小时记录一次电流,试验结束后,将土壤均分为 5 个部分,设置 S1、S2、S3、S4、S5(从阳极到阴极)5 个采样点位(图 1 左图)。将处理完的土壤自然风干,过 100 目尼龙筛,分别测定土壤的理化相应指标。

1.3 试验分组设计

试验以 0.2 mol/L 的柠檬酸和 0.2 mol/L 柠檬酸与不同浓度皂素的混合溶液作为阴、阳极电解液,对照试验采用去离子水为电解液。具体试验设计见表 1。

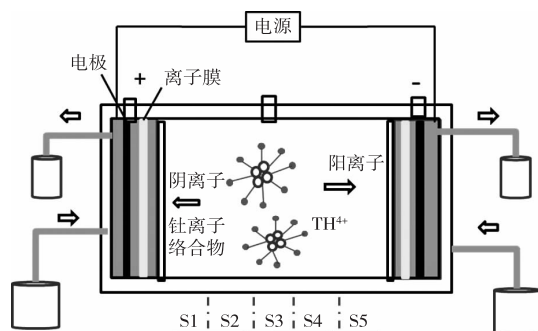


图 1 电动修复装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electric repair device

表1 试验分组设计

Table 1 Experimental group design

组别	阴阳极处理	浓度/(mol·L ⁻¹)	电压/V	时间/d
EK1	去离子水		10	7
EK2	柠檬酸	0.2+0.01	10	7
EK3	柠檬酸+皂素	0.2+0.02	10	7
EK4	柠檬酸+皂素	0.2+0.05	10	7
EK5	柠檬酸+皂素	0.2+0.1	10	7
EK6	柠檬酸+皂素	0.2+0.2	10	7
EK7	柠檬酸+皂素	0.2+0.5	10	7

1.4 分析方法

按照土水比 1:2.5 制备悬液,静置,用 pH 计 (PHS-3)测定上清液 pH,用电导率仪(SC-2300)测定土壤电导率。电流值直接通过电源(IT6322)读取,定期记录。土壤钒元素五态分析采用 Tessier 连续提取法,CAR、EXCH、OMB、FeMnOX、RES 分别表示碳酸盐结合态、可交换态、有机结合态、Fe-Mn 氧化态和残渣态钒元素(单位 mg/kg)。按照处理前后钒的浓度计算钒的去除效率。能耗的计算公式为:

$$E = \frac{1}{V_s} \int V I dt \quad (1)$$

式中, E 为处理单位体积土壤所消耗的电能(kWh/m³); I 为通入的电流(mA); V 是电压(V); t 为修复的时间(d); V_s 为处理土壤的体积(m³)。

2 试验结果与分析

2.1 电动修复过程中电流的变化和能耗的估算

图 2 为电流随修复时间的变化曲线。可以看出,EK1、EK2、EK3 整体电流呈现逐渐下降的趋势,可能是由于该试验的离子迁移是来自阴、阳极电解水产生的 H⁺ 和 OH⁻ 以及土壤中可移动离子;EK4、EK5、EK6、EK7 电流呈现先下降后增加的趋势,可能是由于 EK4、EK5、EK6、EK7 中循环着外电解质柠檬酸和皂素,提供了大量的离子浓度,增加了参与电迁移过程的带电离子量,从而使得电流较大。当采用 0.2 mol/L 柠檬酸和不同浓度皂素为辅助试剂时,电流总体上比只加 0.2 mol/L 柠檬酸为电解液的大。如图 2 所示,EK5 和 EK6 中电流随修复时间的延长由峰值逐渐下降,后续又稳步上升。EK6、EK7 中电流值相较于 EK5 略有下降,这可能是由于皂素浓度过大,出现了黏稠现象,致使土壤空隙变小,阻碍了离子的迁移而使电流减小^[8]。

柠檬酸与不同浓度的皂素所搭配的耗能如图 3 所示。由图 3 可知,所消耗的电能与整个试验过程中皂素浓度的增加有着密切的关系。整个能耗随着

皂素浓度的升高有所增加。

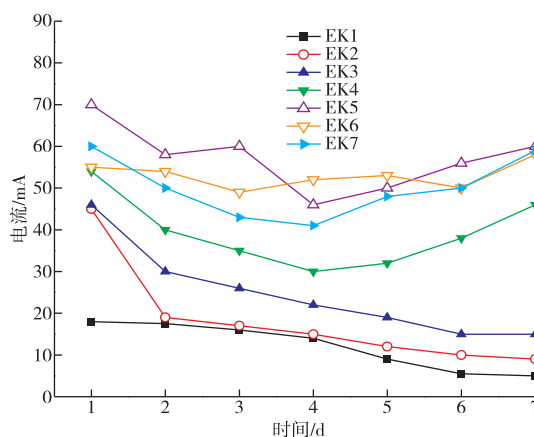


图2 电流随修复时间的变化

Fig. 2 Change of current with repair time

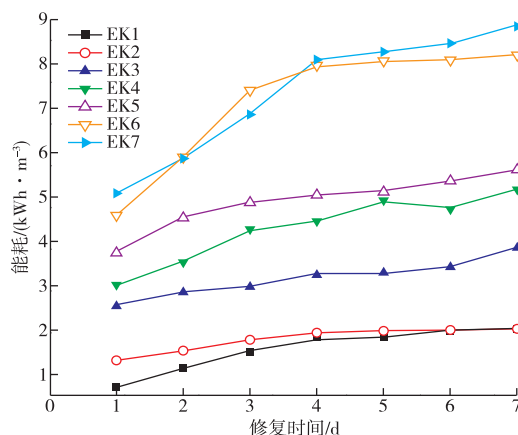


图3 能耗随时间变化的关系图

Fig. 3 Diagram of energy consumption over time

2.2 电动修复过程中土壤 pH 及电导率的变化

酸性带在阳极形成后,逐渐向阴极过渡,会在阴极呈现一个碱性带,土壤的 pH 变化趋势与一般情况下电动修复试验相同。进入土壤中的氢离子与土壤中的碳酸盐反应释放 CO₂ 气体导致靠近阳极端的土壤明显酸化,土壤膨松。如图 4a 所示,EK1 中待修复的土壤 pH 在阳极处表现为酸性,阴极表现为碱性,而在 S4 则是表现为中性。大量研究者论证阳极附近 H⁺ 的迁徙速度大于阴极产生的 OH⁻ 的迁徙速度,因此会在靠近阴极附近发生中和,形成 pH 剧变区,并随反应进行缓慢向阴极移动,直至整个区域被酸化^[9]。EK2 中 pH 维持在 7.5~9.0,说明该浓度柠檬酸已然能中和阴极产生的 OH⁻,在 EK3、EK4、EK5 中 pH 变化趋势与 EK2 相似,且所有区域 pH 均处于 9.0 以下,而在 EK6、EK7 中 pH 在 S4 处明显出现上升趋势,靠近阴极土壤 pH 大致

在 8.5 左右。

未通电时土壤的电导率为 2.7 dS/m,通电结束后不同组别从阳极到阴极电导率情况如图 4b 所示,通电后,两极液由于滴度高的 H^+ 加入导致电导率增加,整体上,土壤中的电导率呈现先上升后下降的趋势,而 EK5 的电导率变化程度十分明显,且阴极处电导率下降最为明显也是最低的,说明在阴极区域附近由于重金属离子发生了较大程度的沉淀,从

而使该浓度条件下电导率处于最低点,而 EK6 与 EK7 皂素浓度较 EK5 有所增加但是电导率的变化程度有所下降,这可能是由于皂素的浓度虽然增大但同时却缩小了待修复土壤的孔隙率,从而使电导率的变化趋势减弱。在相同试验时间的条件下,从不同皂素浓度下电导率的分布曲线图可以看出,随着试验的进行,重金属离子的浓度会越来越低,从而导致整个试验中电导率也会逐渐降低。

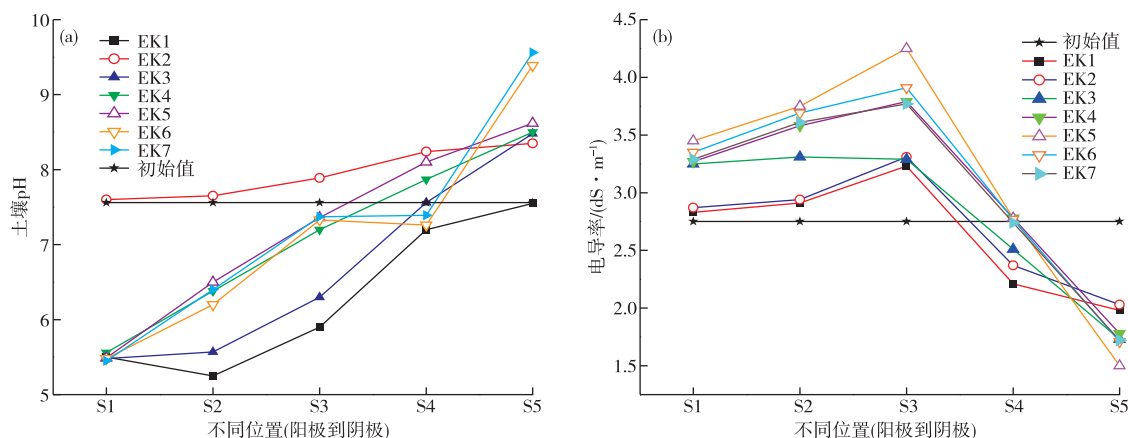


图 4 电动修复处理后土壤不同位置的 pH(a) 和电导率 (b)

Fig. 4 pH values (a) and electrical conductivity (b) of soil at different positions after electric repair treatment

2.3 Th^{4+} 浓度分布图

土壤中初始钍的浓度为 50 mg/kg,从图 5 可以看出,有大量的钍向阴极迁移。对于离子水为工作液时,钍浓度从阳极的 37.5 mg/kg 变化到阴极的 63.7 mg/kg;当不同浓度的皂素与柠檬酸作为电解液进行土壤修复时,土壤中 Th^{4+} 的浓度如图 5 所示,在 EK1、EK2、EK3、EK4、EK5 中,整个 Th^{4+} 的浓度从 S1 到 S5(从阳极到阴极)会逐渐增高,其中 EK5 的变化最为明显,从阳极的 32.3 mg/kg 变化到阴极的 79.7 mg/kg,说明 Th^{4+} 在土壤中电流的作用下进行迁徙时,阳离子会向着土壤中的阴极附近迁徙,与土壤中初始含量相比,修复效果明显,符合土壤中离子进行迁徙的规律。但是随着皂素浓度的增加,EK6、EK7 钍浓度虽然从 S1 到 S5(从阳极到阴极)会逐渐增高,但是整个钍离子浓度的分布并未随着投加电解液浓度的升高而呈现出更大程度的变化,EK6 从阳极的 36.8 mg/kg 变化到阴极的 69.2 mg/kg,EK7 从阳极的 36.2 mg/kg 变化到阴极的 67.3 mg/kg,这与电流的分布情况相类似,可能是随着皂素浓度的增加整个土壤的黏稠性也在逐渐地上升,导致离子的迁移有所下降,从而降低了钍离

子向阴极附近的迁移率。

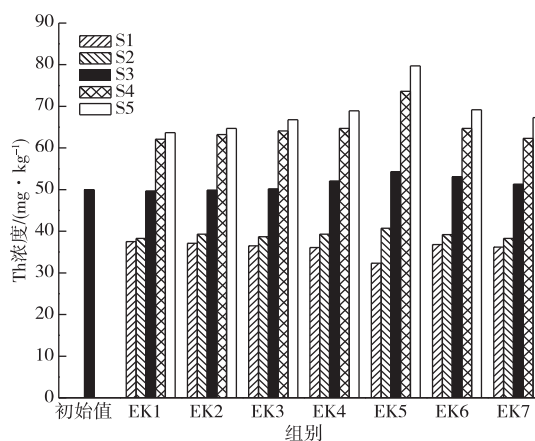


图 5 电动修复后 Th 在不同位置的浓度分布

Fig. 5 Distributions of Th concentration in different positions after electric repair

2.4 电动修复后钍元素形态的变化

采用 Tessier 五步序列提取法对土壤样品中残留钍形态进行分析,结果见图 6。从图 6 可见,EK4 中 EXCH 形态钍馏分主要被去除,S5 的最大去除率可达 84.04%。EK4 的 CAR 形态钍馏分也有明

显的去除, S1 的最大去除率高达 42.17%。其他形态如 FeMnOX、OMB 和 RES 几乎没有被去除。在 EK5 中, CAR 形态的去除率均显著高于 EK4, 最大去除率为 96.64%。EK5 中 EXCH 形态的去除率较低,

为 11.89%。然而, 在 EK5 中没有观察到 OMB 形态和 RES 形态的去除。在 EK6 中, FeMnOX、OMB 和 RES 形态在 EXCH 形态的减少方面没有明显的变化, 而 EXCH 形态很可能转化为 CAR 形态。

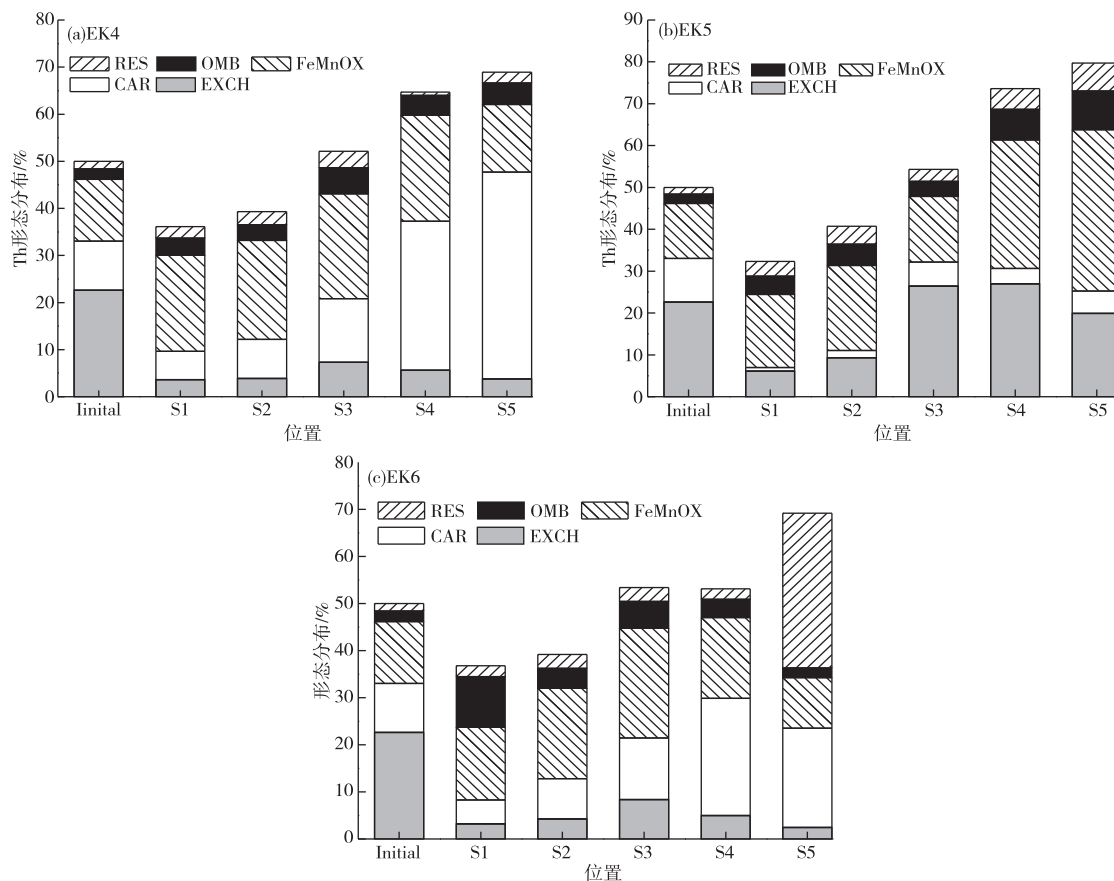


图6 Th元素形态分布图

Fig. 6 Th element morphological distributions

2.5 试验中 Th^{4+} 去除效率

从 Th^{4+} 去除效率的分布图(图7)来看, 随着皂素浓度的升高钍去除效果会得到逐步的提升, 但是当皂素浓度超过一定范围时, 钍去除效率就会降低。对于 EK5 来说, 此皂素浓度附近可能为最佳的去除浓度, 钍去除率达到了 59.94%, 且在该次试验中为最佳的浓度, 而 EK6 与 EK7, 当皂素浓度超过了 EK5 的上限时, 钍去除效率就会降低。以往对于钍污染的研究大多只针对水溶液, 针对土壤中钍污染的修复, 普通的化学修复效率基本保持在 60%~70%, 本研究 60% 的电动修复效率既保证了去除率, 同时相较于其他化学试剂法对土壤的本底环境的破坏小。此次采样土壤为原矿区土壤, 电动修复既保证了一定的去除效率, 同时也降低了常规化学试剂所带来的污染, 实现钍的

高效、清洁去除。

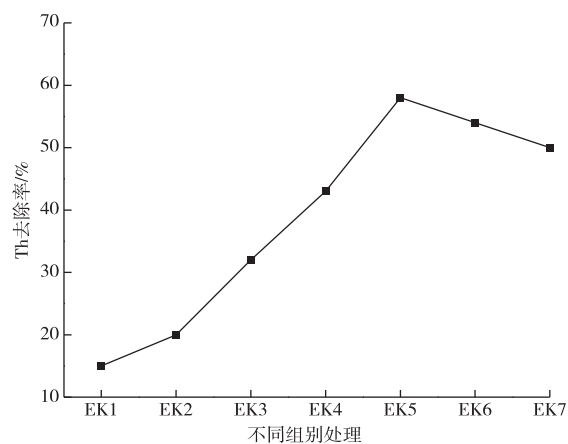


图7 不同处理下钍元素去除效率

Fig. 7 Removal efficiency of thorium element under different treatments

3 讨论

3.1 电动修复过程中电流与能耗的变化

研究证明电流与溶液中存在的溶解离子浓度成正比^[9]。相比于去离子水作为工作液时,电极槽中溶解离子浓度增加,电流增加,电流的大小反映了参与到电迁移过程中带电离子的数量^[10]。以EK1为对照试验,电流初始值较低且逐渐降低至5 mA。在EK2、EK3、EK4中,修复过程中电流由初始最大值逐渐下降,这是由于随着通电时间的增加,迁移电解水弱化导致电流逐渐减小,并且由于阳极产生的 H^+ 影响,来自阳极的 H^+ 与来自阴极的 Ac^- 在土壤中相遇生成不带电的HAc,导致土壤总体电导下降^[11]。而对于EK5、EK6、EK7来说,前2.5 d电流会逐渐下降,但随着时间的延长也会逐渐上升,此种电流变化情况与其他研究者得出的结果相似^[12]。这是由于小分子有机酸与重金属形成的络合物可以增强重金属离子的迁移能力^[13],因此增加了土壤溶液中可移动离子的数量,表现为电流增大。随着皂素浓度增加到一定范围时,浓度再增加时,电流减小,这可能是因为土壤室中能够对电流做出贡献的可移动离子的量减少。另外,柠檬酸和皂素可作为土壤与金属之间的桥梁,增强钍元素与土壤颗粒表面的亲和力,使得钍在土壤表面的吸附量增加^[14]。

电流越大,电动化学反应程度越强烈^[15]。试验表明,无论电解质是什么,累积能耗都随电流强度增加而增加,同时随电解质浓度的增大,能耗也随之增加。与单一添加柠檬酸相比,柠檬酸和皂素混合后浓度的变化对能耗的影响更加显著,这是由于引入了更多的酸性 H^+ 和络合官能团及螯合基团 $-COOH$ 、 $-OH$ 、 $-C=O$,这些非目标离子在电场的移动消耗了大量能量^[16]。由此可见,有部分能量会被消耗在非目标离子的迁移以及水电解等反应上,因此考察能量利用率对于电动修复技术的实践应用具有重要意义。

3.2 电动修复过程中电导率与pH的变化

土壤中的电导率将会影响整个试验的修复效果,当土壤的电导率较低时,意味着土壤中可迁移的离子数量在一定程度上较少,电动处理时,土壤的电导率始终低于初始值,这是由于电动修复时随着试验的进行,土壤中的离子会从阳极向阴极进行迁徙,电导率也会逐渐下降,而在阴极附近,离子会发生中和以及与重金属进行结合,总体来说,从阳极到阴极电导率都是逐渐上升而后又逐渐下降的趋势。

低pH有利于金属从土壤脱落下来以及金属氢氧化物的溶解,增加金属离子的迁移数量^[17]。试验中pH会随着离阴极距离的减小而逐渐增大,这与其他研究者的结论一致^[12]。通电以后,在电场力的作用下,阳极产生 H^+ ,阴极产生 OH^- ,导致阳极区出现 H^+ 的积聚,阴极区出现 OH^- 的积聚,使阳极区土壤的pH低于阴极区。虽然pH低有利于金属的迁移,但也需考虑防止过度酸化致使土壤结构性质发生改变;其次,土壤与离子间的吸附作用受pH的影响,在酸性条件($pH < 4$)下, H^+ 浓度较高,吸附能力较强,会跟 Th^{4+} 发生竞争吸附,随电场迁移。在相同条件下,离子在酸性带的迁移速度大于在碱性带^[18]。一般在酸性条件下,电动修复的控制步骤是吸附—解吸过程,而在中性和碱性条件下,沉淀过程越来越占据主导作用,土壤pH越高,对 Th^{4+} 的吸附差异越小,所以当pH增大到一定范围时,钍去除效率的变化并不是很明显。

3.3 电动修复过程中钍的迁移和转化

皂素浓度的增大对 Th^{4+} 的迁移影响较大, Th^{4+} 含量从阳极到阴极,呈现逐渐增高的趋势。这是由于柠檬酸和皂素中含有一 $COOH$ 和一 OH 等官能团,能够与土壤中的 Th^{4+} 形成络合物,增强了 Th^{4+} 迁移能力,土壤中的小分子有机酸可与土壤中的重金属竞争吸附位点,从而使 Th^{4+} 在土壤表面的吸附量减少。通常该部分 Th^{4+} 与土壤之间以静电吸附方式结合,易解吸溶解在土壤溶液中。整个过程中电流变化小,运载离子的能力也会相应减弱,所以也会出现EK6、EK7试验组虽然皂素浓度有所增加但是离子的迁移效果却有所下降的现象。表现为,随着皂素浓度增加但是在阴极处检测到的 Th^{4+} 的含量却有所下降,这可能是由于添加浓度为0.2、0.5 mol/L电解液的情况下,高浓度离子的添加打破了原有的离子和浓度的平衡,从而影响到了电流的情况,进而影响到了浓度的分布,并且随着浓度的增加,土壤中的孔隙此时被大浓度的有机物所堵塞,从而影响到了离子在土壤的迁移。

4 结论及建议

1)柠檬酸以及当一定浓度的柠檬酸与不同浓度的皂素进行搭配对修复矿区周边钍污染土壤有一定效果,试验中 Th^{4+} 去除效率基本可以达到15%~60%。

2)当0.2 mol/L的柠檬酸与0.1 mol/L的皂素作为电解液时,这时电动修复效果是最佳的,一定程度上,能耗虽然有所增加,但是钍去除率最大,能达

到60%左右。

3)电动修复过程中,钍在土壤中迁移非常复杂,应当深入研究钍在电动修复过程中的迁移转化规律。进一步研究提高去除效率的措施,为应用电动修复高效、安全、低能耗地去除土壤中的钍污染物提供保障。

参考文献

- [1] 孟艳宁,范红海,陈金勇,等.白云鄂博稀土矿床中稀土伴生钍资源的分布特征研究[J].地质论评,2016,62(B11):397-398.
MENG Y N, FAN H H, CHEN J Y, et al. Study on the distribution characteristics of thorium resources associated with rare earth in the Baiyun Obo rare earth deposit [J]. Geological Review, 2016, 62 (B11): 397-398.
- [2] THOMAS P J, CARPENTER D, BOUTIN C, et al. Rare earth elements (REEs): Effects on germination and growth of selected crop and native plant species[J]. Chemosphere, 2013, 96: 57-66. DOI: 10. 1016/j. chemosphere. 2013. 07. 020.
- [3] 陈祖义,朱旭东.稀土元素的骨蓄积性、毒性及其对人群健康的潜在危害[J].生态与农村环境学报,2008,24(1):88-91.
CHEN Z Y, ZHU X D. Bone accumulation and toxicity of rare earth elements and their potential harm to human health [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(1): 88-91.
- [4] 陈玉娟,温琰茂,柴世伟.珠江三角洲农业土壤重金属含量特征研究[J].环境科学研究,2005,18(3):75-77.
CHEN Y J, WEN Y M, CHAI S W. The heavy metal content character of agricultural soil in the Pearl River Delta[J]. Research of Environmental Sciences, 2005, 18(3): 75-77.
- [5] 王蓉,初正崑,宋宁宁,等.电动技术去除剩余污泥中重金属[J].农业资源与环境学报,2019,36(6):798-805.
WANG R, CHU Z K, SONG N N, et al. Removal of heavy metals from residual sludge by electric technology[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019, 36(6): 798-805.
- [6] 王慧,马建伟,范向宇,等.重金属污染土壤的电动原位修复技术研究[J].生态环境学报,2007,16(1):223-227.
WANG H, MA J W, FAN X Y, et al. Electrodynamics in-situ remediation of heavy metal contaminated soil[J]. Journal of Ecological Environment, 2007, 16 (1): 223-227.
- [7] GROUDEV S N, GEORGIEV P S, SPASOVA I I, et al. Bioremediation of a soil contaminated with radioactive elements[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 311-318.
- [8] 黄俊,喻泽斌,徐天佐,等.鼠李糖脂协助下的土壤中镉电动修复[J].环境工程学报,2012,6(10):3801-3808.
HUANG J, YU Z B, XU T Z, et al. Electrokinetic remediation of cadmium in soil with the assistance of Rhammorsugar[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(10): 3801-3808.
- [9] ACAR Y B, ALSHAWABKEH A N. Principles of electrokinetic remediation[J]. Environmental Science & Technology, 1993, 27(13): 2638-2647.
- [10] OTTOSEN L M, CRISTENSEN I V, PEDERSEN A J, et al. Electrodialytic Remediation of Heavy Metal Polluted Soil[M]//LICHTFOUSE E, SCHWARZBAUER J, ROBERT D. Environmental Chemistry. Berlin Heidelberg: Springer, 2005: 223-233.
- [11] 谭雪莹.电极工作液离子特性对铅污染土壤电动修复过程的影响[D].重庆:重庆大学,2014.
TAN X Y. Effect of ionic characteristics of electrode working fluid on electrokinetic remediation of lead-contaminated soil[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [12] 袁立竹.强化电动修复重金属复合污染土壤研究[D].北京:中国科学院大学,2017.
YUAN L Z. Study on strengthening electric remediation of heavy metal contaminated soil[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [13] CHRISTOPHER A, VACLAV T, LUBOS B, et al. Different low-molecular-mass organic acids specifically control leaching of arsenic and lead from contaminated soil[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2016, 187: 18-30.
- [14] 韩剑宏,张达,张连科,等.皂素和柠檬酸复合淋洗土壤中的钍[J].化工环保,2018,38(6):675-680.
HAN J H, ZHANG D, ZHANG L K, et al. Thorium in the combined leaching soil of saponin and citric acid[J]. Environmental Protection of Chemical Industry, 2008, 38(6): 675-680.
- [15] 胡宏韬,程金平.土壤铜镉污染的电动力学修复试验[J].生态环境学报,2009,18(2):511-514.
HU H T, CHENG J P. Electrokinetic remediation experiment of soil copper and cadmium pollution[J]. Journal of Ecological Environment, 2009, 18 (2): 511-514.
- [16] 周书葵,肖江,刘迎久,等.电动修复过程中电解质浓度对U(VI)迁移和能耗的影响[J].中国环境科学,2019,39(12):5228-5239.

(下转第50页)

- anthropogenic activities and pollution assessment of Fuyang County, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 154(1/2/3/4): 439-449.
- [25] 余嘉衍, 李冰玉, 周一敏, 等. 湖南省某矿遗址周围农业土壤重金属污染及风险评价[J]. *环境化学*, 2020, 39(4): 1024-1030.
- YU J Y, LI B YU, ZHOU Y M, et al. Pollution and risk assessment of heavy metal in agricultural soil around an abandon mine site in Hunan province[J]. *Environmental Chemistry*, 2020, 39(4): 1024-1030.
- [26] 宋恒飞, 吴克宁, 刘需珈. 土壤重金属污染评价方法研究进展[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(15): 11-14.
- SONG H F, WU K N, LIU P J. Research progress in evaluation methods of soil heavy metal pollution[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017(15): 11-14.
- [27] FAIRBROTHER A, WENSTEL R, SAPPINGTON K, et al. Framework for metals risk assessment[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2007, 68(2): 145-227.
- [28] 张成丽, 张伟平, 程红丹, 等. 禹州市煤矿区周边土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(4): 805-812.
- ZHANG C L, ZHANG W P, CHENG H D, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment of farmland soil around coal mines in Yuzhou city[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(4): 805-812.

(上接第 30 页)

- [4] 常前发, 王运敏. 冶金矿山节能减排的技术现状与对策措施[J]. *矿产保护与利用*, 2013, 37(5): 13-18.
- CHANG Q F, WANG Y M. Status of energy conservation and emissions reduction technology in metallurgical mines and the countermeasures [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2013, 37(5): 13-18.
- [5] 贾杰林, 卢然, 王兆苏, 等. “十三五”时期我国重金属污染防治思路与任务[J]. *环境保护科学*, 2018, 44(2): 1-5.
- JIA J L, LU R, WANG Z S, et al. Study of the ideas and tasks of prevention and control of heavy metal pollution during the 13th Five-year Plan period[J]. *Environmental Protection Science*, 2018, 44(2): 1-5.
- [6] 刘进, 张宗华. 选矿工程技术的现状与发展[J]. *云南冶金*, 2004, 33(1): 14-17, 57.
- LIU J, ZHANG Z H. Current status and development of ore dressing engineering[J]. *Yunnan Metallurgy*, 2004, 33(1): 14-17, 57.

(上接第 42 页)

- ZHOU S K, XIAO J, LIU Y J, et al. In the process of the electric repair electrolyte concentration of U(VI) migration and the impact of energy consumption[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(12): 5228-5239.
- [17] ZHOU D M, DENG C F, CANG L, et al. Electrokinetic remediation of a Cu-Zn contaminated red soil by controlling the voltage and conditioning catholyte pH[J]. *Chemosphere*, 2005, 61(4): 519-527.
- [18] SUN Z C, WU B, GUO P H, et al. Enhanced electrokinetic remediation and simulation of cadmium-contaminated soil by superimposed electric field[J]. *Chemosphere*, 2019, 233: 17-24. DOI:10.1016/j.chemosphere.2019.05.233.