

# 铬污染土壤的电动修复研究<sup>①</sup>

徐全<sup>1,2</sup>, 易乐<sup>3</sup>, 麻洋<sup>3</sup>, 冯涛<sup>1</sup>

(1.湖南科技大学, 湖南湘潭 411201; 2.湖南省煤炭科学研究院有限公司, 湖南长沙 410011; 3.湖南工程学院, 湖南湘潭 411104)

**摘要:** 通过调控电动修复阴极 pH 值及添加增强剂, 提升电动修复技术对 Cr 污染土壤的总 Cr 去除率, 并探究了电动修复工程的能耗变化及 Cr 迁移分布规律。结果表明, 乙二胺四乙酸(EDTA)、柠檬酸和盐酸等增强试剂能显著提升电动修复过程的总 Cr 去除率。不调控电动修复阴极 pH 值, 电动修复土壤 7d, 向土壤分别添加 EDTA、柠檬酸时, 总 Cr 去除率分别为 24.47%、23.24%; 不调控阴极 pH 值, 会发生较明显的偏极效应。控制电动修复阴极 pH 值, 电动修复土壤 7d, 向土壤分别添加盐酸、柠檬酸时, 总 Cr 去除率分别为 44.20% (是空白电动修复组的 4.9 倍)、36.80%; 控制阴极 pH 值, 能有效阻止阴极区域 Cr 发生沉淀作用, 提高 Cr 的去除率; 控制阴极 pH 值不会显著增加电动修复过程能耗。该方法大幅提升了电动修复对土壤中总 Cr 的去除率, 对重金属污染土壤的修复具有指导意义。

**关键词:** 土壤修复; 铬污染; 土壤污染; 电动修复; 控制阴极 pH 值; 铬

中图分类号: X53

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.03.027

文章编号: 0253-6099(2024)03-0124-06

## Electrokinetic Remediation of Chromium Contaminated Soil

XU Quan<sup>1,2</sup>, YI Le<sup>3</sup>, MA Yang<sup>3</sup>, FENG Tao<sup>1</sup>

(1. Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China; 2. Hunan Coal Science Research Institute Co Ltd, Changsha 410011, Hunan, China; 3. Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411104, Hunan, China)

**Abstract:** By adjusting the pH value of electrokinetic remediation cathode and adding enhancers, the total removal rate of Cr from the contaminated soil by electrokinetic remediation technology was increased. Then, the change of energy consumption and law of Cr migration and distribution during the electrokinetic remediation project were explored. The results show that EDTA, citric acid and hydrochloric acid can significantly enhance the total Cr removal rate during the electrokinetic remediation process. The total removal rates of Cr were 24.47% and 23.24% respectively after 7 days of electrokinetic remediation without adjusting the pH value of the cathode, by adding EDTA and citric acid into the soil. The pH value of the cathode isn't adjusted, which results in an obvious polarization effect. In contrast, the total removal rates of Cr were 44.20% (4.9 times as much as the blank) and 36.80%, respectively, after 7 days of electrokinetic remediation with the pH value of the cathode controlled, by adding hydrochloric acid and citric acid to the soil, respectively. Controlling the pH value of the cathode can effectively prevent the precipitation of Cr in the cathode region, thus enhancing the removal rate of Cr, but won't significantly increase the energy consumption of the electrokinetic remediation process. This method can greatly increase the total removal rate of Cr in contaminated soil by electrokinetic remediation, which is of significance in guiding the remediation of heavy metal contaminated soil.

**Key words:** soil remediation; chromium contamination; soil pollution; electrokinetic remediation; control the pH of cathode; chromium

有毒金属污染物铬(Cr)主要以六价铬(Cr(VI))和 Cr(VI)通常以  $\text{HCrO}_4^-$ 、 $\text{CrO}_4^{2-}$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  形式存在, 和三价铬离子(Cr(III))形式存在于受污染土壤中。Cr(III)主要以氢氧化物和氧化物形式存在<sup>[1-3]</sup>。Cr(VI)

① 收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 湖南省重点研发计划(2016SK2046); 长沙市雨花区重点科技项目(YHKJ-2022-ZG-12)

作者简介: 徐全(1985—), 男, 湖南长沙人, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为矿山环保、工业废物资源化利用。E-mail: xqcumt@qq.com

通信作者: 冯涛(1957—), 男, 河北泊头人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为工业废水处理技术。E-mail: tfeng@hnust.edu.cn

具有很高的毒性和迁移性,对环境的影响与铬废渣相似。目前已经开发出许多技术用于铬污染土壤的修复,包括吸附、氧化还原、微生物修复、固化稳定和电动修复等方法<sup>[3-11]</sup>。

电动修复法是近年发展起来的一种颇具潜力的土壤原位修复技术,安全、有效且经济高效,特别适用于低渗透性、多相不均匀、大颗粒和小颗粒的土壤介质<sup>[7-14]</sup>。电动修复法在污染土壤两侧施加直流电压形成电场,根据污染物所带电荷性质(阳性或阴性)以及孔隙流体流动方向,污染物向阳极或阴极转移,聚集在电极附近的污染物通过电镀处理或抽取到地面上进行处理,从而清洁污染土壤<sup>[10-18]</sup>。

在电动修复过程中,污染物主要通过电迁移、电渗流和电泳等方式迁出土壤<sup>[10-14]</sup>;土壤中重金属离子主要通过电迁移方式迁出土壤<sup>[12-18]</sup>。由于pH值影响土壤中重金属离子的吸附-解吸和沉淀-溶解,土壤酸化还会增加有毒金属的解吸,因此合理控制土壤pH值是提升电动修复效果的关键之一,尤其是控制阴极电解出的氢氧根浓度<sup>[18-21]</sup>。

湖南以“有色金属之乡”著称于世,但有色金属开采、冶炼与加工过程导致的大量重金属污染亟待整治<sup>[22]</sup>。本文通过研究湖南工业厂区及周边环境铬污染特征,建立铬污染土壤电动修复实验平台,考察阴极pH值及增强剂对电动修复铬污染土壤的影响。

## 1 实验材料与实验方法

### 1.1 实验材料

实验所用污泥样品取自湖南湘乡城西老工业区五矿铁合金有限责任公司(以下简称“湖铁”)东排污口。湖铁自1962年投产以来堆存工业固体废弃物累计95.68万吨,其中铬浸出渣19万吨。铬渣为金属铬及铬盐生产中所产生的固体废物,具有长期潜在性危害。该地区土壤以亚砂土为主,且Cr总量高,污染程度严重,Cr在土壤中主要以Cr(III)和Cr(VI)形式存在<sup>[22]</sup>。

土壤预处理:将所取污泥样品放入塑料容器中,加水搅拌制成均匀混合泥浆,取上层清液放入样品壶中,并取样测定清液样品中Cr、Fe、Mn、Pb及Zn含量。再将上面的静置泥浆清液清理完毕,将剩余下部污泥装入设计好的电动修复实验装置,并用保鲜膜对装置和剩余污泥进行密封,防止水分蒸发,同时取样测定污泥中Cr、Fe、Mn、Pb、Zn含量及含水率,结果见表1。

实验所用EDTA、柠檬酸、KCl、HCl、NaOH、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>、磷酸缓冲溶液、硝酸溶液等均购自阿拉丁试剂(上海)有限公司,均为实验纯试剂。

表1 样品中Cr、Fe、Mn、Pb、Zn含量及含水率

Cr	金属含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )				含水率/%
	Fe	Mn	Pb	Zn	
11 600	104 000	6 500	350	240	72

### 1.2 实验装置及原理

实验装置如图1所示。第一组采用不控制阴极pH值的方法进行电动修复,以有机玻璃为材料制成尺寸为长×宽×高为20 cm×10 cm×10 cm的反应器作为土壤室,土壤室两侧是两个等容量的电极室(长×宽×高为5 cm×10 cm×10 cm),土壤室与电极室通过滤纸进行隔离。第二组采用控制阴极pH值的方法进行电动修复,同样采用有机玻璃制成长×宽×高为20 cm×5 cm×6 cm的反应器作为土壤室,两侧为两个等容量的电极室(长×宽×高为5 cm×5 cm×6 cm),土壤室与电极室之间用0.45 μm聚四氟乙烯微孔滤膜隔离,电极室之间为土壤室,阴极采用蠕动泵循环加入电解液来控制pH值。

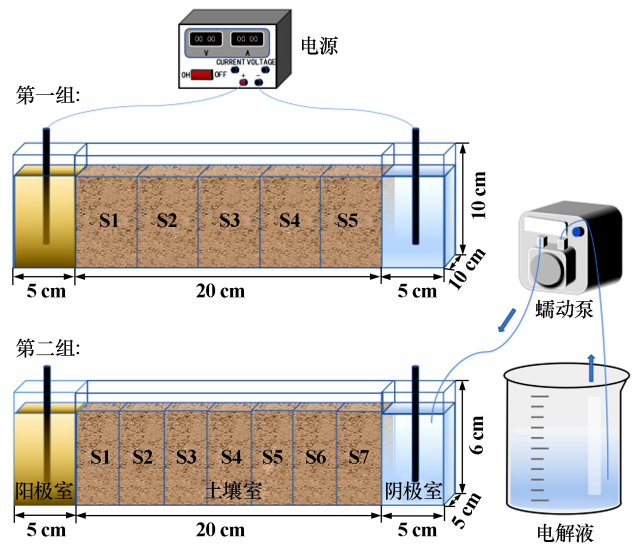


图1 实验装置示意图

反应机理如图2所示。通过在污染土壤两侧施加直流电压形成电场,重金属离子根据所带电荷性质不同,以电迁移的方式向阳极或阴极迁移。

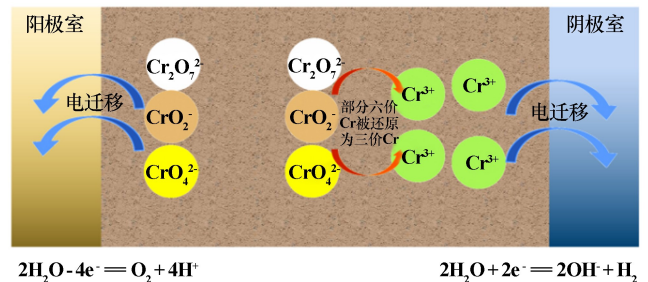


图2 反应机理

### 1.3 实验方法

不控制阴极 pH 值实验(第一组)设计 3 个处理组,  $E_1$  组为空白对照实验,  $E_2$  组为向土壤中添加 EDTA,  $E_3$  组为向土壤中添加柠檬酸, 其中  $E_2$  组和  $E_3$  组在电动修复开始前分别用 EDTA 和柠檬酸饱和预处理 24 h。整个电动修复过程采用不间断电动修复, 初始电压设置为 40.0 V, 电流强度为 0.03 A。在设计的固定时间周期(5 d)取样分析样品中 Cr 含量。电极全部采用石墨电极, 电解液选用 0.1 mol/L 的 KCl。修复完成后, 将装置内的土壤从阴极室到阳极室分成均等的 5 部分, 并分别标记为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 。同时将电动修复的阴阳极电解液收集并测定其中总 Cr 含量(Cr(T)) 和 Cr(VI) 含量。

控制阴极 pH 值实验(第二组)  $E_4$  组和  $E_5$  组阴极电极选用铁板, 阳极电极选用钎铍镀层钛电极, 初始电压设置为 40.0 V, 电流强度为 0.03 A, 修复时间均为 7 d。电动修复试验开始前先将铬污染土壤用前述方法处理并装入土壤槽中压实。在室温下进行试验前, 要使用 0.01 mol/L KCl 电解液对土柱进行 24 h 饱和和处理, 随后按照试验设计分别加入不同组分的阴极电解液(0.5 mol/L 柠檬酸( $E_4$  组)和 0.1 mol/L 盐酸( $E_5$  组))、阳极电解液(均为 0.01 mol/L KCl), 采用蠕动泵循环加入阴极电解液, 通入直流电测定电流和电渗流的变化。试验结束后, 将土柱分成每部分长 2.4 cm 的 7 部分, 依次标记为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  和  $S_7$ , 并测定每部分土壤和收集的阴阳极电解液的 Cr(T)、Cr(VI) 含量、pH 值。

### 1.4 分析方法

参照常规方法<sup>[20-21]</sup>测定土壤的基本理化性质。采用 pH 计(上海雷磁仪器, 型号 pHS-3B)测定土壤 pH 值, 采用 EC 计(上海雷磁仪器, 型号 DDS-11A)测定 EC 值, 土水比为 1:2.5。采用 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 硝化, 硝化液用 Hitachi Z-2000 原子吸收分光光度计(日本, 日立)测定土壤重金属含量。采用美国 EPA Method 3060A 法测定土壤中 Cr(VI) 含量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤 pH 值的变化

电动修复过程中, 阳极产生氢离子会造成靠近阳极土壤 pH 值降低, 阴极产生氢氧根离子会造成靠近阴极土壤 pH 值升高。图 3 记录了电动修复处理前后土壤各截面的 pH 值。

$E_2$  组和  $E_3$  组土壤因经 EDTA 或柠檬酸饱和处理

过, 各部分 pH 值均低于空白组  $E_1$ 。土壤中加入的各种络合剂和有机酸可以中和电解产生的氢氧根离子或与重金属产生络合作用增强其溶解度, 从而避免重金属在阴极附近形成沉淀, 一定程度上抑制了土壤 pH 值的大幅上升, 但从阳极到阴极土壤的 pH 值仍总体处于上升趋势, 逐渐趋于弱碱性。

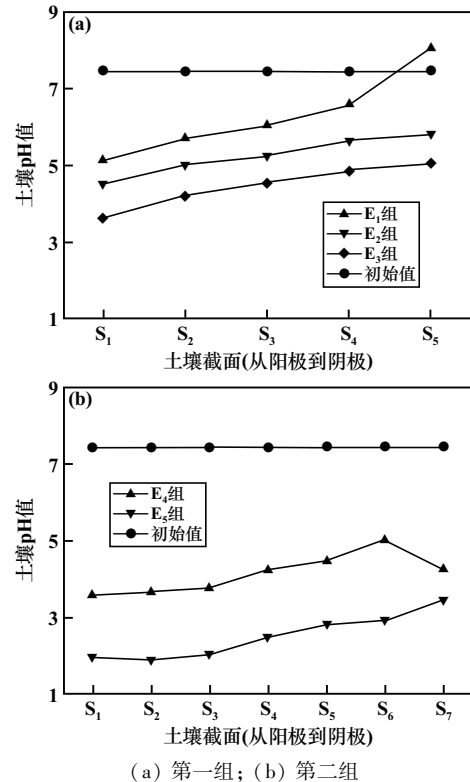


图 3 电动修复前后土壤各截面的 pH 值

$E_4$  组和  $E_5$  组分别通过在阴极电解液中循环添加柠檬酸或盐酸, 成功控制了阴极处土壤的 pH 值, 土壤各部分 pH 值均小于初始值 7.44, 且  $E_4$  组中土壤各截面土壤 pH 值均高于  $E_5$  组, 这是因为  $E_4$  组阴极所使用的电解液为柠檬酸(弱酸), 而  $E_5$  组中所使用的是盐酸(强酸), 盐酸中和碱的能力明显强于柠檬酸,  $E_5$  组中土壤各截面 pH 值均较低。

### 2.2 电流和能耗的变化

电动修复过程中有部分能量会被浪费在土壤盐分迁移、热效应和阴阳极电解液的电解反应中, 考察电动修复的能量损耗及其能量利用效率也是电动修复技术是否可行和能否大面积推广的重要因素之一。两组实验在电动修复过程中的电流和能耗变化见图 4。由图 4 可见, 两组实验的电流和能耗变化趋势大致相似, 说明控制阴极 pH 值不会增加能耗。

在恒压电动修复中, 电流值与溶液中存在的可溶性离子的数量成正比, 图 4 表明 Cr 污染土壤在电动修

复过程中电流值的变化趋势为先上升后降低,随着时间延长,电流值不断下降并趋于平衡。结合图3分析可知,这是由于在电动修复初始阶段,一些可溶性离子在电场作用下发生迁移,且迁移的离子数量在酸性条件下增多,电流值上升;随着电动修复进行到中后期,土壤中pH值升高会导致部分离子发生沉淀,可溶性离子数量减少,电流值降低。其中,E<sub>3</sub>组电流强度较大,因为柠檬酸是三元酸,pH值较低,致使柠檬酸处理的土壤中离子大量进入土壤溶液中,从而使其电流强度较大;E<sub>5</sub>组因控制阴极pH值始终在较低范围,离子更易进入土壤溶液中,所以电流强度最高。

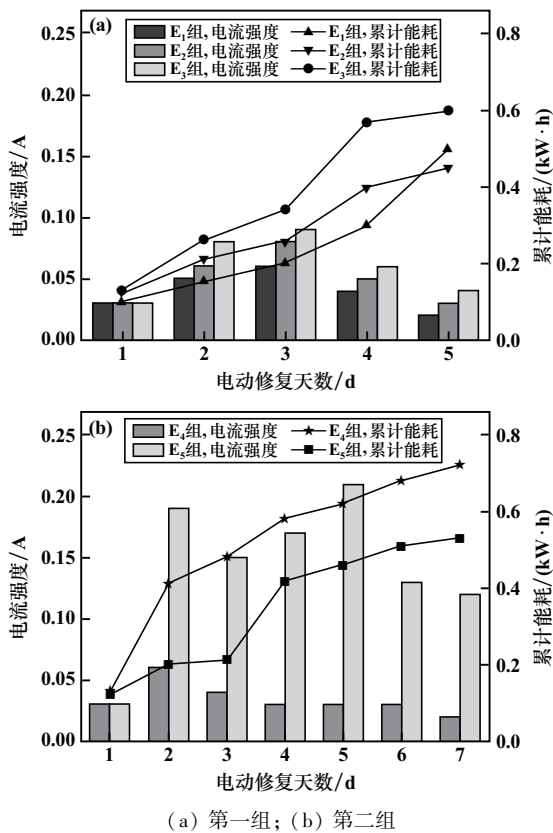


图4 电动修复过程中电流与累计能耗变化情况

修复初期累计耗能随时间推移递增,后期递增趋势渐趋平缓。这显然与修复电流密切相关,修复期间较高的电流使累计能耗增加,而在电流相对稳定的时期,累计能耗倾向于减少。

### 2.3 Cr在不同试剂处理下的迁移分布规律

Cr(III)在电场作用下向阴极迁移,而Cr(VI)在土壤中常以阴离子形式存在,也可通过电迁移向阳极移动。土壤各截面Cr(T)浓度及Cr(VI)浓度见图5。E<sub>2</sub>组和E<sub>3</sub>组处理中,靠近阴极部分的土壤总Cr浓度较高,其他部分变化不明显。而在靠近阴极部分Cr(VI)浓度降低,可能是在阴极酸性条件下Cr(VI)被还原为

Cr(III),Cr(III)向阳极的迁移却并不明显。E<sub>2</sub>、E<sub>3</sub>组中Cr的迁移规律相似,总Cr和Cr(VI)均有从阴极迁移到阳极的趋势。

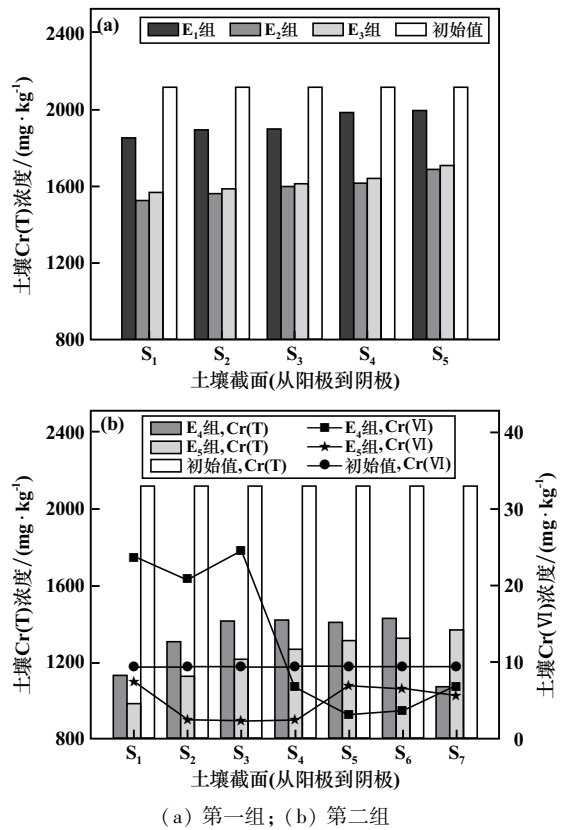


图5 土壤各截面Cr(T)浓度及Cr(VI)浓度

控制阴极pH值时,E<sub>4</sub>组电动修复过程中土壤各截面中Cr(T)浓度降低幅度较小;E<sub>5</sub>组土壤中各截面Cr(T)浓度除S<sub>1</sub>外变化不大。但土壤中各截面Cr(VI)含量差异显著,E<sub>4</sub>组截面S<sub>1</sub>~S<sub>3</sub>中Cr(VI)浓度明显高于S<sub>4</sub>~S<sub>7</sub>各截面,靠近阳极附近区域土壤中Cr(VI)浓度显著高于阴极附近的,说明土壤中Cr(VI)主要向阳极迁移。有研究表明,Cr(VI)在土壤中主要以Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>和CrO<sub>4</sub><sup>2-</sup>形式存在,因此其主要往阳极迁移。E<sub>5</sub>组各截面靠阳极区域中Cr(VI)浓度几乎无差异,均在2.4 mg/kg左右,而靠近阴极区域部分Cr(VI)浓度6.01 mg/kg左右,阴极区Cr(VI)浓度高于阳极区,这与E<sub>4</sub>组相反,说明在阳极电解液相同时,阴极电解液的选择对于Cr(VI)的迁移具有重要影响。E<sub>4</sub>组阳极区附近Cr(VI)浓度还高于初始值,这是由于阴极区Cr(VI)向阳极区转移,同时可能存在土壤中Cr(III)转变为Cr(VI)的情况,由于柠檬酸电离能力较弱,其电动修复电流明显低于E<sub>5</sub>组,因此电动修复7d后E<sub>4</sub>组还未达到其反应和修复终点。结果表明,柠檬酸对土壤中Cr(VI)的去除率高于盐酸。

## 2.4 Mn 在不同试剂处理下的迁移分布规律(第二组)

电动修复完成后,土壤中 Mn 从阳极到阴极的浓度分布如图 6 所示。 $E_4$  组在电动修复过程中存在比较明显的偏极效应, $S_6$  区域 Mn 含量很高, $S_5$  和  $S_7$  区域 Mn 含量次之,且在土壤表层有明显的白色和黑色沉淀物,说明从阳极区转移过来的锰离子有部分在该区域与氢氧根反应生成沉淀物。修复后 Mn 的平均浓度为 620 mg/kg,相比于初始值 824 mg/kg 仅降低了 24.8%。 $E_5$  组在电动修复过程中则避免了明显的偏极效应,Mn 含量从  $S_1$  区域到  $S_7$  区域逐渐增高,而且相对于初始值有了很大幅度降低,修复后土壤的平均 Mn 浓度为 192 mg/kg,相比于初始值 824 mg/kg 降低了 76.7%。

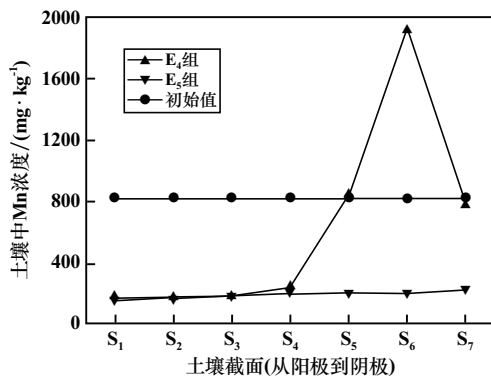


图 6 第二组电动修复后 Mn 浓度分布

## 2.5 不同试剂处理对总 Cr 去除率的影响

电动修复后各实验组的总 Cr 去除率如图 7 所示。由图 7 可知,EDTA 对总 Cr 的去除效果优于柠檬酸,EDTA 和柠檬酸加入后总 Cr 去除率相对于  $E_1$  组提高了 1.72 倍和 1.59 倍。 $E_5$  组盐酸对土壤中总 Cr 的去除率为 44.2%,相当于  $E_1$  组的 4.9 倍;采用盐酸作增强剂总 Cr 去除率效果明显优于柠檬酸。因为土壤中 Cr 主要以  $Cr(III)$  形式存在,盐酸能有效阻止土壤中  $Cr(III)$  在碱性环境下生成  $Cr(OH)_3$  沉淀;盐酸为强酸,其电流强度明显高于柠檬酸,修复更快。

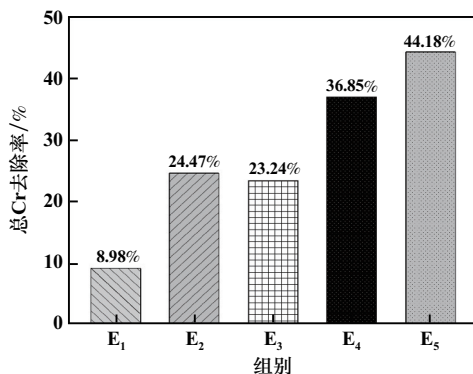


图 7 电动修复后土壤中总 Cr 去除率

## 2.6 电解液中总 Cr 量的变化

电动修复后电解液中总 Cr 量见图 8。电动修复时,在电场作用下土壤中的 Cr 会进入阴阳极电解液。由图 8 可见,相比于对照组  $E_1$ ,  $E_2$  和  $E_3$  组阴阳极电解液中总 Cr 量增高了,且随着 EDTA 或柠檬酸的加入,明显增强了 Cr 向阴阳极电解液的迁移。通过对比阴阳极中土壤总 Cr 量变化可知,EDTA 对 Cr 的整合作用高于柠檬酸。

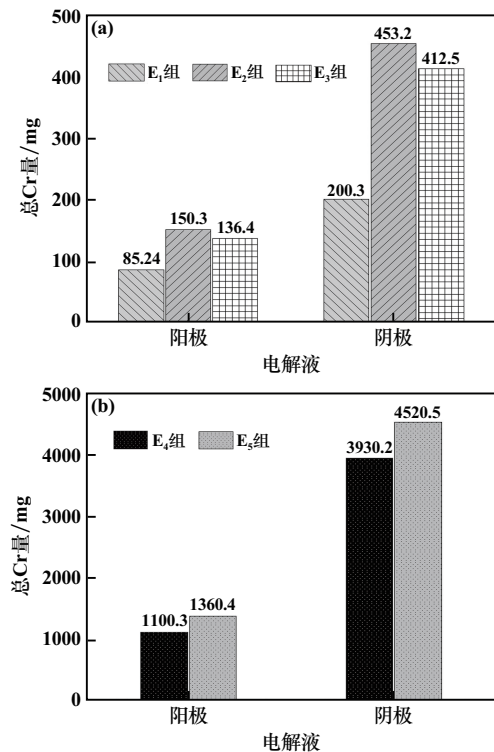


图 8 电动修复后电解液中总 Cr 量

阴极电解液不断稀释使得阳极电解液总铬浓度高于阴极电解液,但阴极电解液的总铬量明显大于阳极电解液。柠檬酸或盐酸的加入明显增强了 Cr 向阴极电解液的迁移,能有效阻止阴极区域 Cr 发生沉淀作用,提高总 Cr 去除率。 $E_5$  组的总 Cr 去除率明显高于  $E_4$  组。

## 3 结 论

通过控制阴极 pH 值的方法对铬污染土壤进行电动修复,得出以下结论:

1) EDTA、柠檬酸和盐酸增强剂能显著促进土壤中总 Cr 的去除,添加 EDTA 对总 Cr 去除率(24.47%)略高于柠檬酸(23.24%),但随着电动修复时间增长,不采取 pH 值控制措施会发生比较明显的偏极效应。

2) 控制阴极 pH 值能有效阻止阴极区域 Cr 发生沉淀作用,提高 Cr 去除率,且控制阴极 pH 值不会显

著增加能耗。添加盐酸作增强剂时总 Cr 去除率达到 44.2%, 高于柠檬酸作增强剂时的 36.8%, 说明盐酸对土壤中铬的迁移作用和去除效率强于柠檬酸。

3) 在初始电压为 40.0 V、电流强度 0.3 A、电解液采用 0.01 mol/L KCl、阴极电解液循环添加 0.1 mol/L HCl 控制阴极 pH 值避免偏极效应的条件下, 不间断电动修复 7 d 后, 土壤中 Mn 含量降低了 76.7%; 相较于空白电动修复 E<sub>1</sub> 组, E<sub>5</sub> 组总 Cr 去除率提升了 3.9 倍。该法大幅提升了总 Cr 去除率, 对重金属污染土壤的修复具有指导意义。

### 参考文献:

[1] XIAO J Z, QI L, HAO P, et al. Remediation of heavy metal-contaminated soils with soil washing: a review[J]. Sustainability, 2022, 14(2): 13058.

[2] Gavrilescu M. Enhancing phytoremediation of soils polluted with heavy metals[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2022, 74: 21-31.

[3] BIAN X, CUI J, TANG B, et al. Chelant-induced phytoextraction of heavy metals from contaminated soils: a review[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018, 27(6): 2417-2424.

[4] 张金矿, 黄业豪, 孙景敏, 等. 重金属污染土壤浮选修复方法概述[J]. 矿冶工程, 2021, 41(1): 67-71.

[5] 肖文魁. 土壤重金属污染现状及修复技术的应用[J]. 现代农业科技, 2021(18): 182-184.

[6] 张之浩, 李威. 活性炭联合植物修复对水中铬的去除效果研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 113-116.

[7] 程木峰, 孙博. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践研究[J]. 资源节约与环保, 2023(3): 49-52.

[8] 鲍广灵, 刘富平. 土壤重金属污染修复技术及应用分析[J]. 山西化工, 2023, 43(3): 221-222.

[9] 董雪. 电动联合修复技术在重金属污染土壤中的研究进展[J]. 新疆地质, 2023, 41(1): 98-102.

[10] 郭军康, 赵隽隽, 李怡凡, 等. 矿区土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(2): 249-260.

[11] 张益硕, 周仲魁, 杨顺景, 等. 重金属污染土壤修复原理与技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(10): 124-134.

[12] 安定明. 矿山尾砂土壤重金属污染及形态分析[J]. 矿冶工程, 2020, 40(4): 110-113.

[13] 马振萍, 谢海东, 张浩, 等. 土壤重金属污染电动修复技术研究综述[J]. 青海环境, 2022, 32(3): 116-121.

[14] 赵鹏, 肖保华. 电动修复技术去除土壤重金属污染研究进展[J]. 地球与环境, 2022, 50(5): 776-786.

[15] Probst R F, Hicks R E. Removal of contaminants from soils by electric fields[J]. Science, 1993, 260(5107): 498-503.

[16] Saeedi M, Gharehtapeh M A. Effect of alternative electrolytes on enhanced electrokinetic remediation of hexavalent chromium in clayey soil[J]. International Journal of Environmental Research, 2013, 7(1): 39-50.

[17] 周东美, 仓龙, 邓昌芬. 络合剂和酸度控制对土壤铬电动过程的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(1): 10-14.

[18] 王业耀, 孟凡生. 铬(VI)污染高岭土电动修复实验研究[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 855-859.

[19] ZHU S, ZHANG J, DONG T. Removal of fluorine from contaminated field soil by anolyte enhanced electrokinetic remediation[J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 59(2): 379-384.

[20] WANG Y C, HAN Z J, LI A, et al. Enhanced electrokinetic remediation of heavy metals contaminated soil by biodegradable complexing agents[J]. Environmental Pollution, 2021, 283: 117111.

[21] XU L, LUO M, LI W, et al. Reduction of hexavalent chromium by Pannonibacter phragmitetus LSSE-09 stimulated with external electron donors under alkaline conditions[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185: 1169-1176.

[22] 湘乡市环保局. 湘乡市城区地下水六价铬污染现状调查分析与控制[R]. 1993.

引用本文: 徐全, 易乐, 麻洋, 等. 铬污染土壤的电动修复研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 124-129.

(上接第 123 页)

[14] Larssen T A, Senk D, Tangstad M. Reduction of Manganese Ores in CO-CO<sub>2</sub> Atmospheres[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2021, 52(1): 363-381.

[15] 张汉泉, 杨帆, 许鑫, 等. 高铁氧化锰矿还原过程中铁锰氧化物同步还原动力学研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(1): 84-88.

[16] CHEN J, HE F, GAO L, et al. Rapid preparation of manganese monoxide by microwave-enhanced selective carbothermal reduction[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 845303.

[17] LIU Y J, HE F P, MA D L, et al. Novel process of reduction roasting manganese ore with sulfur waste and extraction of mn by acid

leaching[J]. Metals, 2022, 12(3): 384.

[18] 王钊. 煤基还原焙烧法处理高品位氧化锰矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(2): 80-83.

[19] LI X B, WANG H Y, ZHOU Q S, et al. Efficient separation of alumina and silica in reduction-roasted kaolin by alkali leaching[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(2): 416-423.

引用本文: 肖胜鹏, 田宇航, 李飞, 等. 高硅氧化锰矿还原焙烧-酸浸工艺研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(3): 120-123.