DOI:10.3724/j.issn.1004-3918.2026.02.006

复合添加剂联合电动修复六价铬污染土壤研究

梁鹏翔[1,2]， 施烈焰[1,2]， 李 洁[1,2]， 李 硕[3]， 郝益民[1,2]

（1. 河南省生态环境技术中心，郑州 450004； 2. 河南省生态环境损害鉴定评估与修复工程技术研究中心，郑州 450004； 3. 郑州大学 生态与环境学院，郑州 450001）

摘 要： 本研究以六价铬污染土壤为研究对象，探讨由酒石酸(TA)和氯化钾(KCl)组成的复合添加剂对电动修复效果的影响及作用机理。研究首先设置不同浓度KCl(0.02～0.06 mol/L)与固定浓度TA(0.1 mol/L)组合，筛选最佳配比，进一步与单一添加剂(TA或KCl)及去离子水对照组进行对比，分析修复过程中土壤理化性质、重金属形态变化及去除效率。结果显示，复合添加剂的加入显著提升了六价铬去除效率，TA与0.04 mol/L KCl组合的试验组(FH-3)六价铬平均去除率达86.45%，比对照组高23.45%，比单一用TA组高4.01%，比单一用KCl组高16.97%；总铬去除率也略有提升，高于对照组的3.50%。在重金属形态上，修复后土壤中铁锰氧化物结合态与残余态铬含量此消彼长，残余态比例在阴极区域升高，增强铬稳定化，降低生物可利用性。电流强度初期迅速上升，复合添加剂组电流峰值高于对照组，表明土壤可溶性离子浓度增加，促进六价铬迁移转化。土壤pH初期下降后回升，复合添加剂组回升较慢，尤其在阳极区域，可能与TA提供的H^+和K^+被土壤吸附有关。土壤电导率在复合添加剂组显著提升，证实离子迁移增强。综合来看，TA与KCl作为复合添加剂能有效促进六价铬在电场作用下的解吸与迁移，提升电动修复效率，改善土壤理化性质，具有良好的应用前景。

关键词： 酒石酸；氯化钾；六价铬；电动修复

中图分类号： X53 **文献标志码：** A **文章编号：**1004-3918(2026)02-0293-10

Study on the Combination of Composite Additives and Electric Remediation of Hexavalent Chromium Contaminated Soil

LIANG Pengxiang[1,2], SHI Lieyan[1,2], LI Jie[1,2], LI Shuo[3], HAO Yimin[1,2]

(1. Henan Ecological Environment Technology Center, Zhengzhou 450004, China; 2. Henan Engineering Technology Research Center for Ecological Environment Damage Assessment and Restoration, Zhengzhou 450004, China; 3. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: This study focused on hexavalent chromium-contaminated soil, investigating the effects and mechanisms of a composite additive composed of tartaric acid (TA) and potassium chloride (KCl) on electrokinetic remediation. The research first established different KCl concentrations (0.02-0.06 mol/L) combined with a fixed TA concentration (0.1 mol/L) to screen the optimal ratio, then compared it with single additives (TA or KCl) and a deionized water control group, analyzing changes in soil physicochemical properties, heavy metal speciation, and removal efficiency. The results showed that the composite additive significantly enhanced hexavalent chromium removal efficiency. The experimental group with TA and 0.04 mol/L KCl (FH-3) achieved an average hexavalent

收稿日期： 2024-12-17 **修回日期：** 2025-09-12 **接受日期：** 2025-10-21

基金项目： 国家重点研发计划资助项目(2019YFC1803605)；河南省基本科研业务费项目(2024-HNSTHJ-JBKY-006)

作者简介： 梁鹏翔(1990-)，男，工程师，硕士，主要研究方向为土壤污染修复

通信作者： 施烈焰(1984-)，男，高级工程师，硕士，主要研究方向为土壤污染防治，E-mail:95625739@qq.com

引用格式： 梁鹏翔，施烈焰，李洁，等. 复合添加剂联合电动修复六价铬污染土壤研究[J]. 河南科学，2026，44(2)：293-302.

Liang P X, Shi L Y, Li J, et al. Study on the combination of composite additives and electric remediation of hexavalent chromium contaminated soil[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 293-302.

chromium removal rate of 86.45%, which was 23.45% higher than the control group, 4.01% higher than the TA-only group, and 16.97% higher than the KCl-only group. The total chromium removal rate also slightly increased, surpassing the control group of 3.50%. In terms of heavy metal speciation, post-remediation soil exhibited a dynamic shift between iron-manganese oxide-bound and residual chromium fractions, with an increased proportion of residual chromium in the cathode region, enhancing chromium stabilization and reducing bioavailability. Current intensity initially rose rapidly, with the composite additive group showing higher peak current than the control group, indicating that soluble ion concentration in the soil increased, promoting hexavalent chromium migration and transformation. Soil pH initially decreased and then rebounded, with slower recovery in the composite additive group, particularly in the anode region, which might be related to the adsorption of H^+ and K^+ from TA by the soil. Soil electrical conductivity significantly improved in the composite additive group, confirming enhanced ion migration. Overall, TA and KCl as a composite additive can effectively promote hexavalent chromium desorption and migration under electric fields, improve electrokinetic remediation efficiency, enhance soil physicochemical properties, thus having promising application potential.

Key words: tartaric acid; potassium chloride; hexavalent chromium; electric remediation

0 引言

土壤是经济社会可持续发展的物质基础，土壤环境质量关系人民群众身体健康。土壤中的重金属通过各种途径进入人体，当重金属含量超出人体可接受剂量时，会严重损害人体健康[1]。其中六价铬是一类具有致癌作用的重金属污染物，因其毒性大、迁移性强等特点引起了社会各界的广泛关注[2]。重金属铬在自然界中主要以三价和六价两种形式稳定存在，其中三价铬通常为阳离子，如Cr^{3+}、$Cr(OH)^{2+}$、$Cr_2(OH)_4^{2+}$和$Cr(OH)_2^+$等[3]，三价铬离子基团的毒性及致癌性较低，迁移性和生物可利用性较弱；六价铬通常以阴离子形式存在，如CrO_4^{2-}、$HCrO_4^-$和$Cr_2O_7^{2-}$等[4]，对于六价铬离子基团，它们不仅具有较高的致癌性、毒性，并且生物可利用性高，土壤胶粒对其吸附作用还低于三价铬，导致六价铬更易脱附从而污染土壤和地下水，对环境安全和人类健康都有着不可逆转的危害[5]。

电动修复作为当前原位修复污染土壤的有效方式之一[6]，通过电迁移、电渗流和电泳等方式将离子迁移至电场两端土壤，具有安全、高效且符合经济效益的优点[7]。但目前采用的电动修复方法中，仍存在污染物去除率低、修复时间长、能耗大、成本高、操作复杂等缺点[8]。低分子有机酸作为环境友好型化学试剂，在前期化学淋洗、电解液的选择以及土壤重金属活化中具有良好的效果，在土壤重金属修复过程中被广泛利用[7]，这类物质在调控土壤pH的同时，避免有机物的二次污染还能促进土壤中植物的生长[9]，是良好的外加剂选择。丁玲[10]利用小分子有机酸（酒石酸、草酸）加入土壤中，使得镉的去除率大大提高，尤其是弱酸提取态的镉；李超等[11]研究发现添加低浓度酒石酸可促进Cr（Ⅵ）的解析，使Cr（Ⅵ）与总Cr去除能力增强，添加酒石酸后可促进重金属的解吸，减少重金属氢氧化物沉淀的生成，显著提高电动修复重金属去除效率。KCl作为常见的农用化肥，在农田土壤钾肥的使用中应用广泛，同时KCl作为高效的化学淋洗剂，是一种强离子交换盐[12]。马强等[13]研究发现当KCl的用量从土壤质量的0.2%增加到1%时，可以从酸性土壤中去除Cd，Cd的去除率从38.6%增加到84.1%。KCl淋洗联合EK提高了表土（0~20 cm）土壤重金属的去除效率，特别是1%KCl+EK处理，Cd的去除效率为94.8%，同时也有研究表明用柠檬酸+KCl改性的洗涤液可以达到较好的重金属去除效果[2]。

本研究通过模拟污染土壤试验探索复合添加剂（TA+KCl）联合电动修复对修复土壤中六价铬的影响。分析修复过程中土壤理化性质和重金属的形态变化，为进一步研究和开展六价铬污染土壤现场修复试验提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验土壤

原始土壤采自河南某县农田土壤，采样深度为0~20 cm，采回后土壤经风干捣碎，去除草根和杂质，之后将重铬酸钾溶液与原始土壤混合，配制成13.1 mg/kg的六价铬污染土壤.模拟土壤基本理化性质如表1所示。

表1　模拟污染土壤基本理化性质

Tab.1　Basic physical and chemical properties of simulated polluted soil

有机质质量分数/(g·kg^{-1})	阳离子交换量/cmol(+)/kg	六价铬质量分数/(mg·kg^{-1})	总铬质量分数/(mg·kg^{-1})	水溶性碳酸根/(cmol(1/2CO_3^{2-})·kg^{-1})	含水率/%	pH	电导率/(μS·cm^{-1})
21.1	13.7	13.1	103	—	7.7	9.51	39.4

1.2　试验装置

电动修复装置如图1所示。装置由土壤室、两端尺寸相同的电解槽及电解液循环瓶构成,土壤室及电解室采用阴阳离子膜隔开。石墨板为阴阳极的电极材料,直流电源进行供电,蠕动泵用于电解液单向循环。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。

1.3　试验方法

1.3.1　复合添加剂(TA+不同浓度KCl)对电动修复的影响

选择0.1 mol/L TA与不同浓度(0.02~0.06 mol/L)KCl,配制成一定浓度溶液作为修复试剂,得出一定条件下最佳的KCl添加浓度。

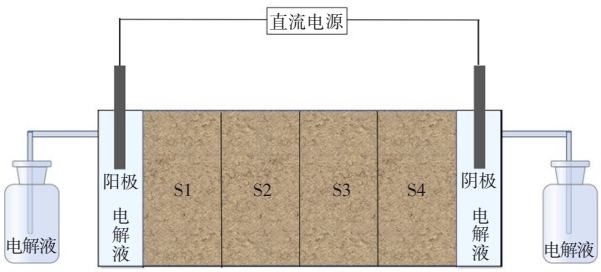


图1　电动修复装置示意图

Fig.1　Schematic diagram of electrokinetic remediation device

试验设置6组处理,具体试验设计如表2所示。所有处理中均以0.1 mol/L的柠檬酸溶液做阴极液,去离子水做阳极液。称取4.5 kg模拟土壤于土壤室中,铺平压实,保证土壤与电解液液面持平,电解室与土壤室采用阴阳离子膜隔开,电极连接电源进行常规电动修复。电动修复试验使用蠕动泵控制电解液流速使得电解液在同侧进行循环。试验过程中记录电流和能耗变化情况,试验结束后将土壤室均分成四部分,沿阳极到阴极方向依次命名为S1、S2、S3、S4区域,在各区域取土样样品用于后续分析测定。

1.3.2　复合添加剂与单一添加剂的对比试验

选择得出的最佳KCl添加浓度,与只添加TA和KCl进行对比,分析修复过程中土壤理化性质和重金属的形态变化。试验设置4组处理,具体试验设计如表3所示。具体试验方法如1.3.1小节。

1.4　分析方法

参照常规方法[14]测定土壤的基本理化性质。采用pH计测定土壤pH值,采用电导率分析计测定电导率。土壤阳离子交换量用三氯化六氨合钴浸提-

表2　复合添加剂(TA+KCl)试验设计

Tab.2　Experimental design of composite additives (TA+KCl)

处理组编号	外加剂种类	外加剂浓度/(mol·L^{-1})	电压梯度/(V·cm^{-1})	修复时间/h
FH-1	TA+KCl	0.1+0.02	1.5	72
FH-2	TA+KCl	0.1+0.03	1.5	72
FH-3	TA+KCl	0.1+0.04	1.5	72
FH-4	TA+KCl	0.1+0.05	1.5	72
FH-5	TA+KCl	0.1+0.06	1.5	72
CK	去离子水		1.5	72

表3　复合添加剂试验设计

Tab.3　Experimental design of composite additives

处理组编号	外加剂种类	外加剂浓度/(mol·L^{-1})	电压梯度/(V·cm^{-1})	修复时间/h
FH-3	TA+KCl	最佳浓度	1.5	72
CK-TA	TA	0.1	1.5	72
CK-K	KCl	最佳浓度	1.5	72
CK	去离子水		1.5	72

分光光度法测定。土壤有机质含量参照标准NY/T 1121.6—2006测定。土壤总铬含量用火焰原子吸收分光光度法测定。土壤中六价铬的含量采用碱溶液提取-火焰原子吸收法测定。

2 结果与讨论

2.1 复合添加剂(TA+不同浓度KCl)对电动修复的影响

2.1.1 去除效果分析

表4显示的是各试验组六价铬的去除率。可以看出,添加复合添加剂的各试验组六价铬的平均去除率比对照组(CK)均有提升,平均去除率均在80%以上,去除效率最高为FH-3组,平均去除率为86.45%,比CK组高23.45%。图2为各试验组修复结束后土壤六价铬区域含量。可以看出六价铬在各区域的含量均小于CK组,并且总体呈现从阴极向阳极增大的趋势。这是因为复合添加剂提供的H^+、K^+、Cl^-离子能够促进土壤中$Cr_2O_7^{2-}$的解吸过程。解吸后的$Cr_2O_7^{2-}$具有较强的迁移能力,在电场力的作用下会向阳极方向移动。在此过程中,电迁移作用成为主导反应机制,而氧化还原反应则相对较弱[15]。这种迁移模式导致了土壤各截面靠近阴极的部分六价铬浓度显著降低,促进了六价铬的迁移转化,提升了六价铬的去除率。

表5显示的是各试验组总铬的去除率。可以看出,复合添加剂的加入可在一定程度上提升总铬的去除率,FH-3试验组总铬平均去除率为10.92%,但整体上对于总铬去除效率的提升有限,这可能是因为在pH较低的情况下,三价铬会与TA发生配位反应,生成迁移能力较弱的螯合型配体化合物[16]有关,这一化学反应影响总铬的去除效果。图3为各试验组修复结束后土壤总铬区域含量。在电动修复过程中,总铬呈现从S4至S1区域迁移聚集的趋势,即向阳极迁移聚集,越靠近阳极聚集趋势越明显,主要是因为六价铬向阳极迁移聚集。这表明,复合添加剂的加入促进了铬的迁移和转化,但阳极区域仍然是铬富集的主要位置,这与电场作用下重金属离子的迁移规律相符合。

2.1.2 重金属形态变化分析

重金属在土壤中的形态分布对其迁移转化具有重要影响。这些形态包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态及残余态。其中,可交换态和碳酸盐结合态因其弱结合性而易于在土壤中迁移转化;相反,铁锰氧化物结合态、有机结合态

表4 六价铬去除率

Tab.4 Removal rate of hexavalent chromium 单位:%

处理组编号	不同土壤区域去除率				平均去除率
	S1	S2	S3	S4	
FH-1	78.63	83.21	82.44	86.26	82.63
FH-2	67.18	77.86	89.31	85.73	80.02
FH-3	77.10	83.97	92.37	92.37	86.45
FH-4	81.68	83.21	87.02	87.94	84.96
FH-5	76.95	87.48	87.02	89.31	85.19
CK	48.85	66.41	60.69	76.03	63.00

表5 总铬去除率

Tab.5 Removal rate of total chromium 单位:%

处理组编号	不同土壤区域去除率				平均去除率
	S1	S2	S3	S4	
FH-1	-39.81	4.85	15.53	42.72	5.83
FH-2	-65.05	10.68	12.62	19.90	-5.46
FH-3	-17.48	12.62	31.07	17.48	10.92
FH-4	-20.39	10.68	15.53	20.49	6.58
FH-5	-63.11	23.40	14.56	15.53	-2.40
CK	-33.98	20.39	12.33	15.24	3.50

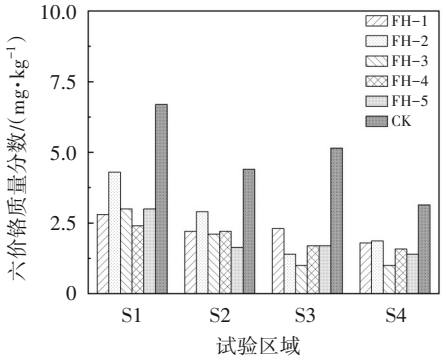


图2 复合添加剂对土壤六价铬区域含量的影响

Fig.2 The effect of composite additives on the regional content of hexavalent chromium in soil

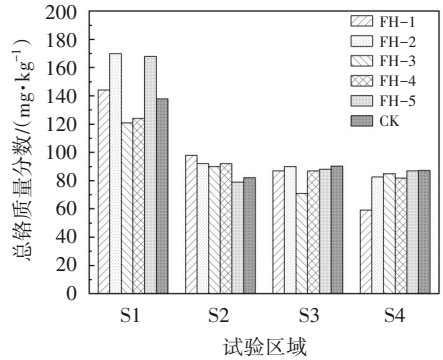


图3 复合添加剂对土壤总铬区域含量的影响

Fig.3 The effect of composite additives on the total chromium content in soil regions

及残余态则因其强结合性而相对稳定,尤其是残余态,更难从土壤中释放[17]。

图4为修复后不同区域土壤铬的五种形态的百分比。可知,各试验组相较于对照组,从S1到S4区域铁锰氧化物结合态与残余态的重金属含量呈现出的相互消长趋势更加明显。在S1区域,铁锰氧化物结合态的重金属含量升高,残余态比例降低,相对S1区域,S4区域铁锰氧化物结合态的重金属含量降低,残余态比例升高。残余态的增长可能意味着重金属离子在土壤中形成了更为稳定的化合物或沉淀,减少了其生物可利用性和环境风险,从而有利于土壤的修复过程[15]。

2.1.3 电流变化分析

在电动修复过程中,电流的变化会影响土壤中离子的迁移转化。图5为各试验组电流强度在修复过程中随时间的变化。加入复合添加剂的试验组电流强度在修复过程中均高于对照组(CK组),且电流强度增长的速率较快,在10 h左右达到峰值,随后电流强度开始下降,而CK组电流增长较为平缓。这说明复合添加剂的加入显著提升了土壤中的离子含量,促使土壤中的可溶性离子迅速溶解并进入溶液中,从而增强了电流强度,电流强度增长速度很快,电流强度的增强也促进了土壤中六价铬的迁移转化。CK组中的去离子水在电场作用下分解产生H^+和OH^-离子,这些离子对电流强度的提升起到了积极作用,但整体电流强度低于加入复合添加剂的试验组,且整体变化较为平缓。随着修复过程的持续进行,所有试验组电流强度的变化整体呈现出先上升后下降的趋势。这反映了可移动离子数量的逐渐减少以及离子逐渐向电极两端迁移的过程[14]。

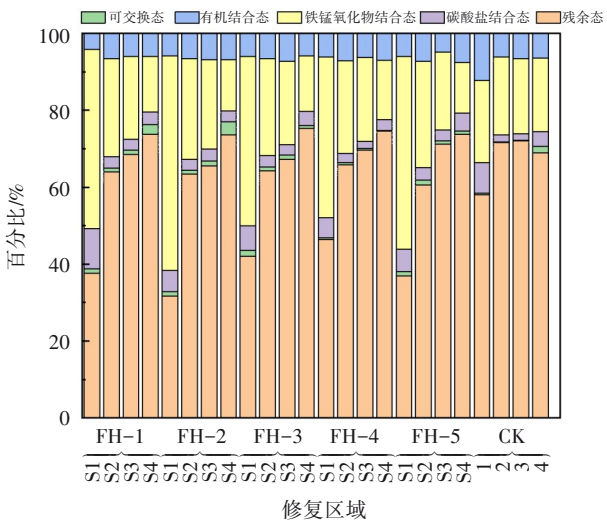


图4 修复后不同区域土壤铬的五种形态

Fig.4 Five forms of chromium in soil in different regions after remediation

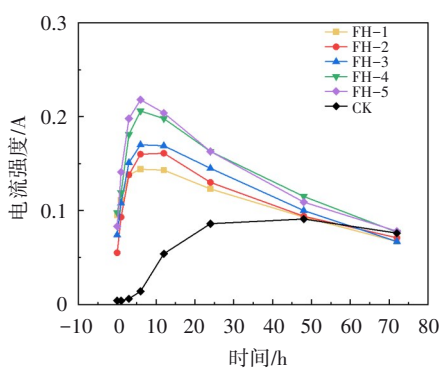


图5 复合添加剂对电流变化的影响

Fig.5 The effect of composite additives on current variations

2.1.4 土壤pH与电导率(EC)变化分析

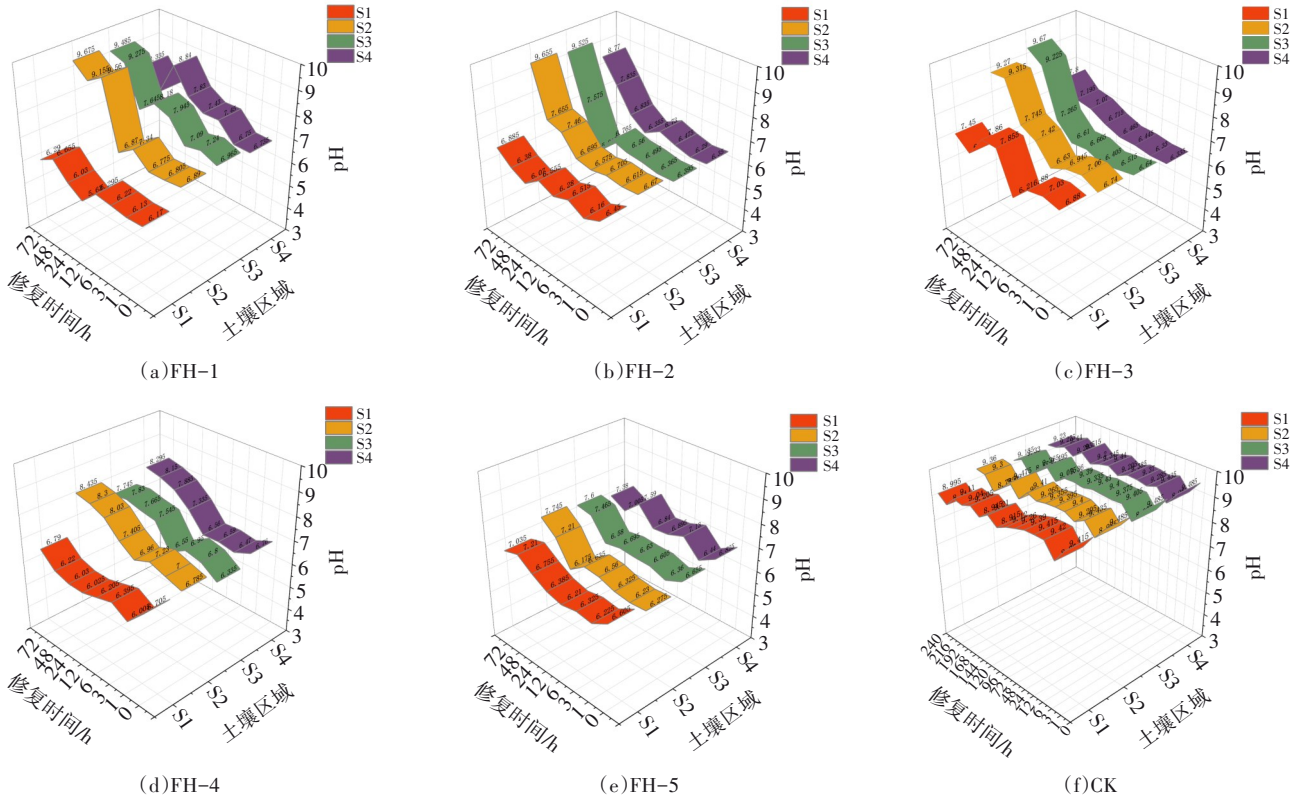
图6为各试验组土壤pH变化。结果显示,初始土壤的pH(初始pH为9.46)呈现下降趋势,这与复合添加剂中酒石酸有关[11]。随着修复时间的变化,土壤pH升高,土壤pH整体恢复较慢,尤其S1区域pH回升较慢,且pH值明显低于S2~S4区域。这可能是因为随着修复时间的延长,土壤中的有机酸逐渐释放出其携带的H^+离子,这些离子被土壤中的其他成分所利用,导致土壤中的H^+离子浓度逐渐降低,因此,土壤的pH逐渐回升[6]。但随着复合添加剂中KCl浓度增加,土壤pH整体恢复较慢,这说明KCl作为酸性肥料,在土壤中施加,当K^+被吸附时,可以降低土壤的pH值,促进土壤中六价铬的迁移转化,这也为复合添加剂修复六价铬污染的碱性土壤提供了思路。

土壤电导率(EC)是衡量土壤导电能力的重要指标,它直接关联着土壤中离子物质的浓度[15],本次试验所用土壤的初始电导率为39.4 μS/cm。图7为各试验组对土壤电导率的影响。可知,随着时间变化,加入复合添加剂可提升土壤的电导率,各试验组电导率均比CK组增长显著,随着修复时间变化,整体电导率呈现减弱趋势,这与电流的变化趋势相符,其中,S1区域总体呈现电导率先增强后减弱的趋势(除FH-2组),S4区域总体呈现电导率增强后先减弱后增强再减弱的趋势,这些说明土壤中的离子发生了较为复杂的迁移转化过程。

2.2 复合添加剂与单一添加剂的对比分析

2.2.1 去除效果分析

表6显示的是各试验组六价铬去除效率的分析。可知,FH-3试验组六价铬平均去除率为

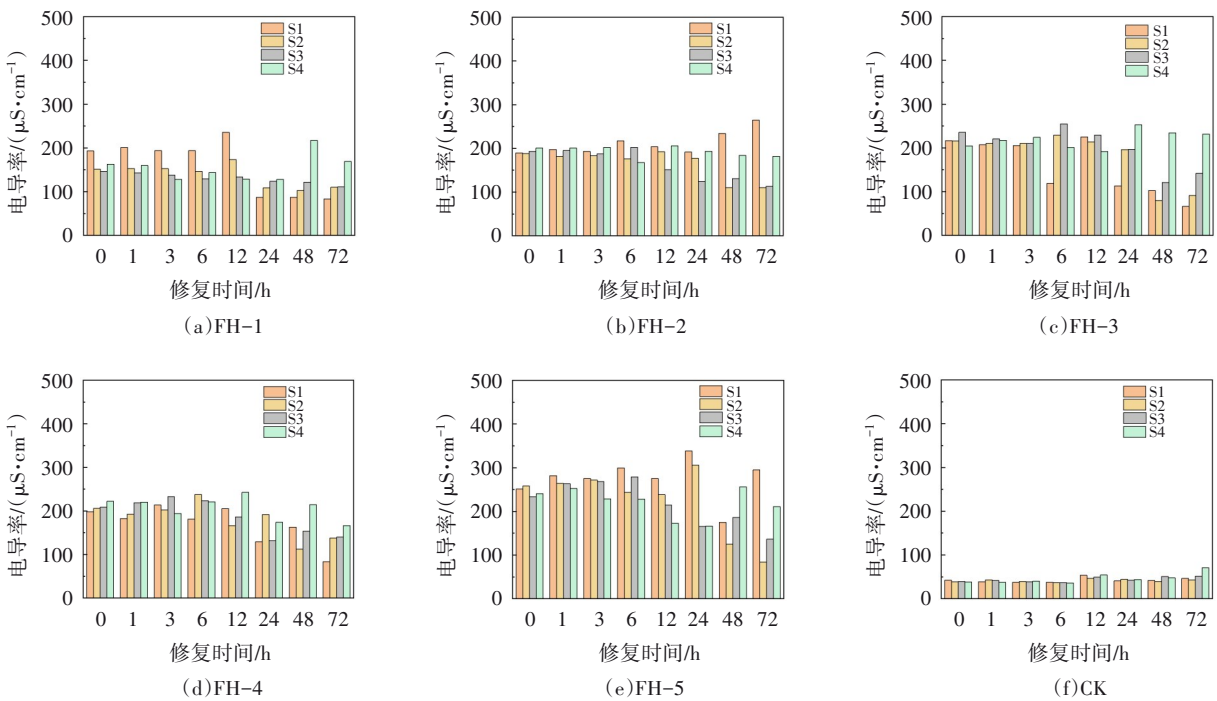


(a)FH-1　(b)FH-2　(c)FH-3

(d)FH-4　(e)FH-5　(f)CK

图6　各试验组对土壤pH的影响

Fig.6　The effect of each experimental group on soil pH



(a)FH-1　(b)FH-2　(c)FH-3

(d)FH-4　(e)FH-5　(f)CK

图7　各试验组对土壤电导率的影响

Fig.7　The effect of each experimental group on soil conductivity

86.45%，比只加入0.1 mol/L TA（CK-TA组）提升4.01%，比只加入0.04 mol/L KCl（CK-K组）提升16.79%，比CK组提升23.45%。图8为各添加剂对土壤六价铬区域含量的影响。由图可知，FH-3、CK-K组六价铬含量从S1~S4区域呈降低的趋势更加明显，尤其是CK-K组。这说明KCl的加入进一步增强了六价铬

表6　六价铬去除率

Tab.6　Removal rate of hexavalent chromium　　单位:%

处理组编号	不同土壤区域去除率				平均去除率
	S1	S2	S3	S4	
FH-3	77.10	83.97	92.37	92.37	86.45
CK-TA	80.92	84.73	82.44	81.68	82.44
CK-K	29.01	81.68	78.63	89.31	69.66
CK	48.85	66.41	60.69	76.03	63.00

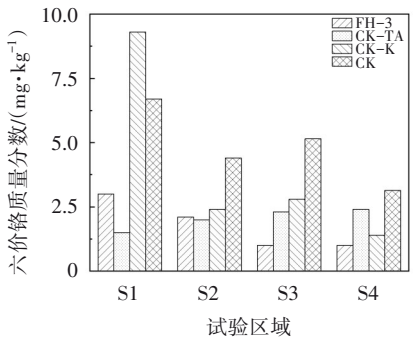


图8　复合添加剂对土壤六价铬区域含量的影响

Fig.8　The impact of complex additives on the regional content of hexavalent chromium in soil

的迁移转化,这体现在比单一使用TA作为添加剂,六价铬的去除效率更高.主要是复合添加剂提供的H^+、K^+、Cl^-离子能够促进土壤中$Cr_2O_7^{2-}$的解吸过程.解吸后的$Cr_2O_7^{2-}$具有较强的迁移能力,在电场力的作用下会向阳极方向移动[18]。在此过程中,电迁移作用成为主导反应机制,而氧化还原反应则相对较弱[13],这种迁移模式导致了土壤各截面靠近阴极的部分六价铬浓度显著降低。

表7显示为各试验组总铬去除效率的分析。复合添加剂的加入可提升总铬的平均去除率,FH-3试验组总铬的平均去除率为10.92%,CK组总铬的平均去除率为3.50%。图9为各添加剂对土壤总铬区域含量的影响,可知,各试验组修复结束后,总铬呈现向阳极迁移聚集的趋势,其中CK-TA组的总铬从S4~S1区域的聚集效应更加明显,也就是总铬向阳极移动迁移的趋势更加明显,CK-K、CK次之,FH-3

表7　总铬去除率

Tab.7　Removal rate of total chromium　　单位:%

处理组编号	不同土壤区域去除率				平均去除率
	S1	S2	S3	S4	
FH-3	-17.48	12.62	31.07	17.48	10.92
CK-TA	-92.23	12.62	24.27	11.65	-10.92
CK-K	-48.54	-33.01	1.94	7.77	-17.96
CK	-33.98	20.39	12.33	15.24	3.50

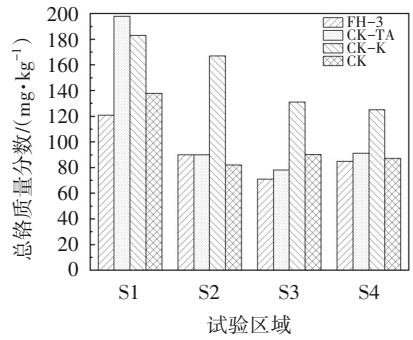


图9　复合添加剂对土壤总铬区域含量的影响

Fig.9　The effect of complex additives on the total chromium content in soil regions

趋势最弱。这可能是因为在pH较低的情况下,三价铬会与TA发生配位反应,生成迁移能力较弱的螯合型配体化合物[16]。

2.2.2　重金属形态变化分析

图10为修复后不同区域土壤铬的五种形态的百分比。可知,从S1到S4区域铁锰氧化物结合态与残余态的重金属含量呈现出的相互消长趋势,在S1区域,铁锰氧化物结合态的重金属含量升高,残余态比例降低,相对S1区域,S4区域铁锰氧化物结合态的重金属含量降低,残余态比例升高。这种趋势的明显程度为:CK-TA>FH-3>CK。残余态的增长可能意味着重金属离子在土壤中形成了更为稳定的化合物或沉淀,减少了其生物可利用性和环境风险,从而有利于土壤的修复过程[17]。

2.2.3　电流变化分析

图11为添加复合添加剂或加入单一添加剂后随着修复时间的变化,电流强度的变化趋势。加入

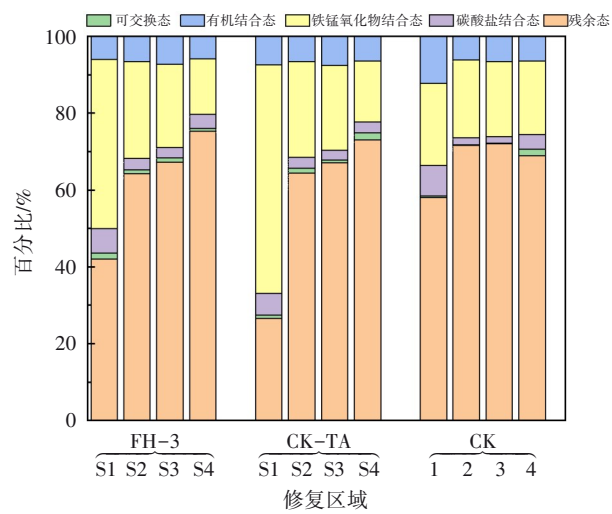


图10　修复后不同区域土壤铬的五种形态

Fig.10　Five forms of chromium in soil in different regions after remediation

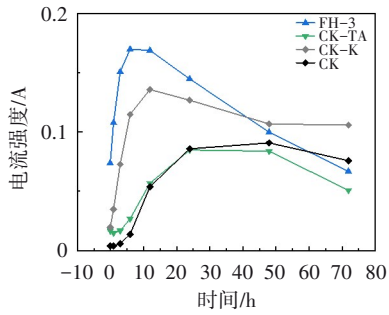


图11　复合添加剂对电流变化的影响

Fig.11　The effect of composite additives on current variations

复合添加剂或者单一添加剂的电流强度在修复过程中均高于仅使用去离子水(CK组)对照组(CK−TA组除外),且电流强度增长的速率较快,FH−3、CK−K组在10 h左右达到峰值,随后电流强度开始下降,而CK−TA、CK组电流强度增长较为平缓,前期CK−TA组电流强度强于CK组,后期小于CK组。这说明复合添加剂的加入显著提升了土壤中的离子含量,其中KCl的作用更显著,促使土壤中的可溶性离子迅速溶解并进入溶液中,从而增强了电流强度,电流增长速度很快,电流的增强也促进了土壤中六价铬的迁移转化。CK−TA、CK组中提供的离子对电流强度的提升起到了积极作用,但整体电流强度低于加入复合添加剂的试验组。

2.2.4　土壤pH与电导率(EC)变化分析

图12为各试验组修复过程中对土壤pH的影响。可知,由于TA的添加,修复开始后,CK−TA组土壤的pH(初始pH为9.46)呈现下降趋势,随着修复的进行,土壤pH基本回升到初始值,这说明随着修复时间的延长,土壤中的有机酸逐渐释放出其携带的H^+,这些离子被土壤中的其他成分所利用,导致土壤中的H^+离子浓度逐渐降低,因此,土壤的pH逐渐回升,趋向于恢复到其原始水平[6]。CK−K、CK组的土壤pH波动变化,但整体呈现比较稳定的趋势。

值得关注的是FH−3组,土壤pH的回升较慢,修复结束后,S1、S4区域的pH低于初始值,这说明复合添化剂添加后,土壤中发生了较为复杂的离子迁移转化,结合3.1.4小节结果,说明酒石酸能够促进K^+被吸附,而KCl作为酸性肥料,K^+被吸附后,可以降低土壤的pH值。

图13为各试验组对土壤电导率的影响。电导率的提升说明土壤中的离子浓度增加,迁移转化增强。可知,随着时间变化,各试验组土壤电导率为FH−3>CK−K>CK−TA>CK,这说明KCl的加入对于电导率的提升较为明显,这也与修复过程中电流强度的变化相对应,这也进一步说明KCl的加入能在一定程度上促进六价铬的迁移转化。

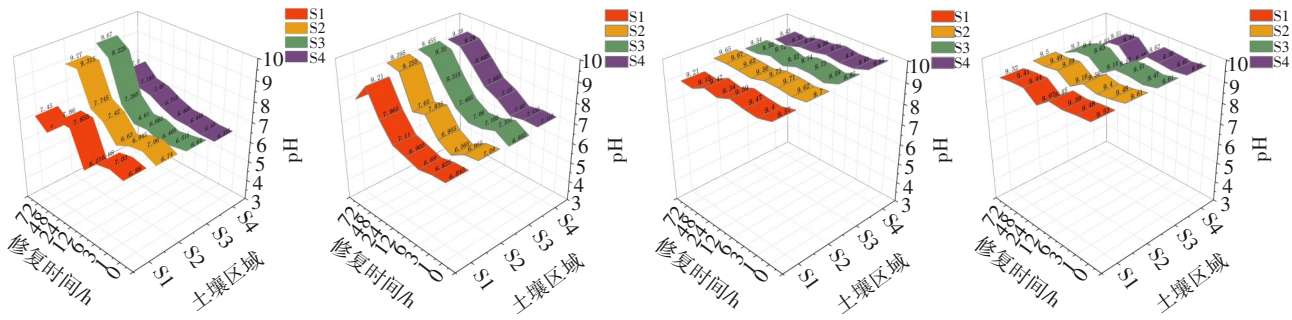
3　结论

1)复合添加剂(TA+KCl)联合电动修复,复合添加剂的加入对土壤中六价铬的迁移和转化产生了显著影响,土壤各截面靠近阴极的部分六价铬浓度显著降低,氯化钾的加入增强了六价铬的迁移转化。

2)六价铬去除效率得到显著提升,平均去除率可提升4.01%~23.45%,总铬去除效率在一定程度上得到提升。

3)修复后土壤的pH降低,氯化钾浓度增加时pH降低更多,电导率增加明显,酒石酸促进了土壤对K^+吸附,降低了土壤pH。

受试验条件及时间的限制,为更好探索复合添加剂联合电动修复六价铬污染的适用试验条件,可从修复时间、使用绿色能源、电压梯度的设置、有机酸种类和浓度的变化、土壤含水率、修复实际污染土壤等方面进一步研究,为更进一步提升修复效果提供数据支撑。



(a)FH−3　(b)CK−TA　(c)CK−K　(d)CK

图12　各试验组对土壤pH的影响

Fig.12　The effect of each experimental group on soil pH

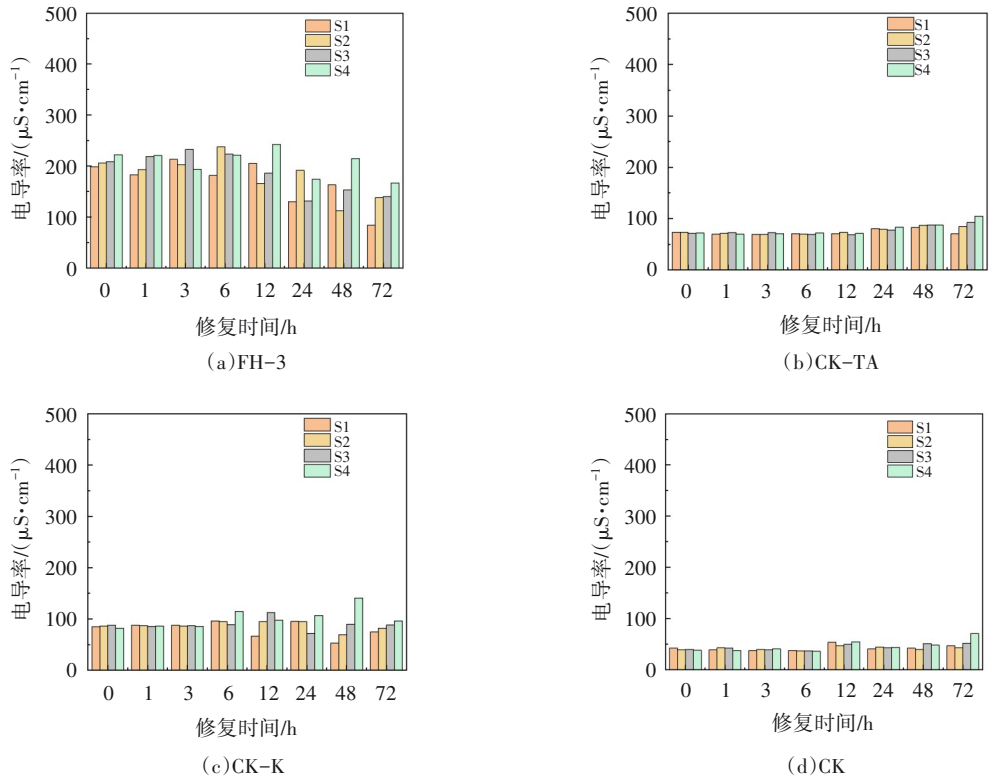


图13　各试验组对土壤电导率的影响

Fig.13　The effect of each experimental group on soil conductivity

参考文献:

[1] Hu L G, Cai Y, Jiang G B. Occurrence and speciation of polymeric chromium(III), monomeric chromium(III) and chromium (VI) in environmental samples [J]. Chemosphere, 2016, 156: 14-20.

[2] Wang Y C, Li A, Cui C W. Remediation of heavy metal-contaminated soils by electrokinetic technology: Mechanisms and applicability [J]. Chemosphere, 2021, 265: 129071.

[3] Yan Y J, Xue F J, Muhammad F, et al.Application of iron-loaded activated carbon electrodes for electrokinetic remediation of chromium-contaminated soil in a three-dimensional electrode system [J]. Scientific Reports, 2018, 8: 5753.

[4] 谢文强. 六价铬对人体急性与慢性危害探究[J]. 资源节约与环保, 2016(7): 131.
Xie W Q. Investigation on the acute and chronic hazards of hexavalent chromium to human health [J]. Resources Economization & Environmental Protection, 2016 (7): 131.

[5] 李克, 王芳, 陈瑛. 我国铬渣污染地块现状与政策建议[C]//2018 中国环境科学学会科学技术年会论文集. 合肥, 2018: 448-453.
Li K, Wang F, Chen Y. Current status and policy recommendations of chromium residue contaminated sites in China[C]//Proceedings of the 2018 Annual Scientific and Technological Conference of Chinese Society for Environmental Sciences. Hefei, 2018: 448-453.

[6] 李银柳. 离子交换膜耦合辅助液相室电动修复铬污染土壤技术优化[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Li Y L. Optimization of coupling-assisted electrokinetic remediation technology for chromium-contaminated soil with ion exchange membrane[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.

[7] 吴桐. 电动修复铬污染高岭土及铬渣污染土试验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
Wu T. Experimental study on electrokinetic remediation of chromium-contaminated kaolin and chromium residue-contaminated soil [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2013.

[8] Wu J N, Wei B, Lv Z W, et al.To improve the performance of focusing phenomenon related to energy consumption and removal efficiency in electrokinetic remediation of Cr-contaminated soil [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 272: 118882.

[9] Marques A P G C, Rangel A O S S, Castro P M L. Reme-

diation of heavy metal contaminated soils: An overview of site remediation techniques[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2011, 41(10): 879-914.

[10] 丁玲. 电动增强技术修复重金属Cd(Ⅱ)污染土壤的研究[D]. 广州:广东工业大学,2016.
Ding L. Experimental study on remediation of heavy metal Cd(Ⅱ)-contaminated soil by electrokinetic enhancement technology [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2016.

[11] 李超,范文瑞,岳正波,等. 酒石酸强化重金属复合污染模拟土壤电动修复过程及机理分析[J]. 环境工程学报,2019,13(11):2675-2681.
Li C, Fan W R, Yue Z B, et al. Process and mechanism analysis on tartaric acid enhanced electrokinetic remediation of simulated heavy metal combined contamination soil[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(11): 2675-2681.

[12] 杨宗政,李文轩,董春婷,等. 螯合剂与低分子有机酸复配淋洗修复Cr(Ⅵ)污染土壤[J]. 农业环境科学学报,2024,43(3):543-552.
Yang Z Z, Li W X, Dong C T, et al. Washing remediation of polluted Cr(Ⅵ)-containing soil using chelators compounded with low-molecular weight organic acids [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(3): 543-552.

[13] 马强,卫泽斌,吴启堂. 化学淋洗联合电动技术修复重金属污染土壤的效果及其机制[J]. 环境科学,2023,44(3):1668-1677.
Ma Q, Wei Z B, Wu Q T. Effectiveness and mechanisms of chemical leaching combined with electrokinetic technology on the remediation of heavy metal contaminated soil [J]. Environmental Science, 2023, 44(3): 1668-1677.

[14] 肖兴. 改进电动力技术修复铬污染土壤[D]. 泉州:华侨大学,2023.
Xiao X. Improved electrokinetic technology for remediation of chromium-contaminated soil[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2023.

[15] Sun Y H, Guan F, Yang W W, et al. Removal of chromium from a contaminated soil using oxalic acid, citric acid, and hydrochloric acid: Dynamics, mechanisms, and concomitant removal of non-targeted metals [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(15): 2771.

[16] 汤迪勇,向琦,雷炜东,等. 有机酸对污染土壤中重金属镉、铬、锰解吸效果的影响研究[J]. 中南民族大学学报(自然科学版),2022,41(1):44-50.
Tang D Y, Xiang Q, Lei W D, et al. Effects of organic acids on the desorption of Cd, Cr and Mn ions in heavy metal contaminated soil[J]. Journal of South-Central University for Nationalities (Natural Science Edition), 2022, 41(1): 44-50.

[17] 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.

[18] 张治国,谭雨柠,郑永红,等. 外源有机酸对复垦土壤中重金属Cr的活化效果研究[J]. 金属矿山,2024(1):285-292.
Zhang Z G, Tan Y N, Zheng Y H, et al. Effect of exogenous organic acids on activation of heavy metal Cr in reclaimed soil[J]. Metal Mine, 2024(1): 285-292.

(编辑 康 艳)