

施加不同电压对铬污染黄棕壤电动过程的影响*

仓 龙 周东美[†]

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘 要 研究了在控制阴极液酸度条件下, 施加不同电压对铬污染黄棕壤中铬的电动过程的影响, 结果表明增加应用电压显著提高了处理电流和电渗流量, 所有电动处理后土柱中土壤 pH 均在 3 左右, 低 pH 环境引起土柱中铬的氧化还原和沉淀反应并导致土柱中电压降的不均匀分布。施加 20 V 电压处理获得了较好的铬去除率和较低的能耗, 576 h 后土壤中总铬和六价铬的去除率分别达到 41.1% 和 77.7%。控制阳极池溶液酸度将是一个能够显著提高土壤铬去除的有效方法。

关键词 铬; 电压; 黄棕壤; 电动过程

中图分类号 S153.4 文献标识码 A

土壤处于自然环境的中心位置, 承载着环境中大约 90% 的来自各方面的污染物^[1]。对于当前日益严重的土壤污染问题, 人们相继提出了多种污染土壤的修复技术。电动修复作为一种能有效去除土壤重金属和有机污染物的方法近年来得到了人们越来越多的重视。在电场作用下, 土壤中污染物去除的主要机理包括电迁移、电渗流和电泳等^[2], 外加直流电压的大小直接影响到这三种去除机制的效率, 同时在电动修复中电能的消耗量也影响着该技术的可行性。近年来的研究侧重于使用多种化学增强试剂来提高电动处理效果^[3~9], 而对整个处理过程中能耗的研究则较少。因而, 对电动处理过程中电压分配和电能的消耗研究将有助于深入揭示电动处理过程中的作用机制。

铬在皮革、冶炼、印染等行业中应用广泛。铬随工业废水进入到土壤以后通常以六价和三价两种形式共存。六价铬具有氧化性, 毒性大, 而三价铬在土壤中具有较大的吸附能力和沉淀作用。进入到土壤中的铬在多种环境因素影响下会发生复杂的化学变化^[10, 11], 而铬的这些性质使土壤中铬的电动去除机理非常复杂。Weng 等^[12]在对三价铬污染的粘土进行电动修复研究时发现氢氧化铬沉淀堵塞了粘土孔隙, 导致电渗流下降并阻碍铬的去除。Zhou 等^[6]在对六价铬污染土壤进行电动处理时, 也发现在土柱中靠近阳极的一段截面电压降很大, 认为铬在该段

截面可能形成了某种沉淀并积聚。这些结果均表明在铬的电动过程中存在电压分配的不均一性问题。

本文通过研究在不同施加电压条件下铬污染土壤的电动处理过程, 考察处理过程中电压、电流及其与铬去除效率之间的关系, 以期揭示电压分配不均一性的成因, 提高土壤铬的电动处理效率。

1 材料与方 法

1.1 供试土壤

供试土壤为黄棕壤(0~40 cm), 采自江苏南京。土壤采回后经风干捣碎, 剔除草根和其他杂质, 研磨过 20 目筛。该土壤的 pH(土水比 1:2.5) 为 5.5, 电导率为 $2.52 \times 10^2 \mu\text{S cm}^{-1}$, 有机质含量 16 g kg^{-1} , 阳离子交换容量为 $16.5 \text{ cmol kg}^{-1}$, 重金属 Cr、Cu、Pb、Zn 和 Cd 的含量分别为 95.3、34.4、36.7、87.6 和 0.19 mg kg^{-1} 。

将该土壤与一定体积的重铬酸钾溶液混匀(使土壤中的总铬浓度为约 1000 mg kg^{-1}), 然后用瓷容器盛放, 并加水使其处于淹水状态, 在室温下培养 30 d。培养后的土壤风干、过 20 目筛, 储存备用。其 pH 为 6.04, 电导率为 $3.6 \times 10^2 \mu\text{S cm}^{-1}$, 总铬和六价铬含量分别为 1086 mg kg^{-1} 和 193 mg kg^{-1} 。

1.2 试验设计及步骤

试验装置详见早期报道^[8]。土柱为 L 12 cm ×

* 国家自然科学基金项目(20207010)资助

[†] 通讯作者, E-mail: dmzhou@issas.ac.cn

作者简介: 仓龙(1978-), 男, 硕士, 主要从事污染土壤电动修复方面的研究工作

收稿日期: 2004-11-15; 收到修改稿日期: 2005-04-26

f 6.6 cm 的有机玻璃柱, 内装土约 580 g, 压实; 阴、阳两极各有一电解池, 其体积约为 78 cm^3 ; 土柱两端与电解池结合处放置多孔烧结玻璃以防止土壤进入溶液池; 土柱中均匀地插入不锈钢细棒用于测量土柱中电压降的变化; 工作电极为石墨棒; 电解池与两旁的处理池用蠕动泵相连, 用于溶液循环, 流速为 18 ml min^{-1} ; 在阴极处理池中插入 pH 电极, 监测处理池溶液的 pH, 而溶液 pH 控制采用自行设计的 pH 控制系统。

试验开始后先从阴、阳两极通蒸馏水 24 h, 使土柱水饱和, 然后重新更换溶液, 其中阳极池仍为蒸馏水, 阴极池则为 0.1 mol L^{-1} 的 NaH_2PO_4 溶液。试验过程中通过 pH 控制系统控制阴极池溶液的 pH 为 5.5, 控制液为 50% 的浓磷酸, 200 h 后换成 2.0 mol L^{-1} 的 NaH_2PO_4 溶液。试验共设 4 个处理, 所加直流电压分别为 0 V、10 V、20 V 和 40 V, 在试验过程中定期测定土柱各部分的电压降、电流、电渗流以及阴极池和阳极池中溶液的 pH 和电导率, 整个处理时间为 24 d。试验结束后将土柱分成均等的 10 等份, 测定每份土壤的 pH 和电导率; 土样经风干后测定总铬和六价铬含量。

1.3 分析测试及计算方法

电压和电流用 DT9208B 型数字万用表测定; 土壤 pH 和电导率直接用鲜土并用去除 CO_2 的蒸馏水浸提(土水比 1: 2.5) 后分别使用 pHS-3B 精密酸度计和 DDS-11A 型电导仪测定; 电渗流通过计算阳极溶液池中溶液体积变化获得。土壤中六价铬的测定

采用美国 EPA 的碱消化方法^[4]; 土壤中总铬的测定采用 $\text{HF-HClO}_4\text{-HNO}_3$ 消化法并用 Hitachi 180-80 原子吸收光谱仪进行测定。试验过程中的电能消耗 (E) 用如下公式计算^[13]:

$$E = \int (Vdt/M) \quad (1)$$

其中: E 为能耗 (kWh t^{-1}); V 为施加电压 (V); I 为电流 (A); t 为处理时间 (h); M 为土重 (t)。

2 结果与讨论

2.1 不同施加电压对铬污染土壤电动处理过程中电流、电渗流和溶液电导率的影响

图 1A 显示的是在施加不同电压条件下电流随时间的变化。由图可知, 电流的变化均在短时间内达到一个峰值, 随后逐渐下降, 并在 200 h 后到达了一个稳定值。施加电压越高, 电流越大, 且出现峰值所需时间也越短。其中, 10 V 的处理在 78 h 时电流达到最高值 (17.9 mA), 20 V 的处理在 54 h 达到最高值 (24.0 mA), 而 40 V 的处理在 36 h 已达到最高值 (51.7 mA)。由于土壤中固有离子数量有限, 所以一段时间后电流有所下降。当溶液池中的离子通过扩散和电迁移进入土壤以后, 电流开始逐渐达到平衡。已有研究^[2,14]发现, 在电动过程中电流与土壤中可移动离子的浓度有十分密切的关系。

图 1B 显示的是在施加不同电压条件下电渗流随时间的变化。结果表明: 所有处理的电渗流均朝向阴极方向, 在前 200 h 内不同电压处理的电渗流

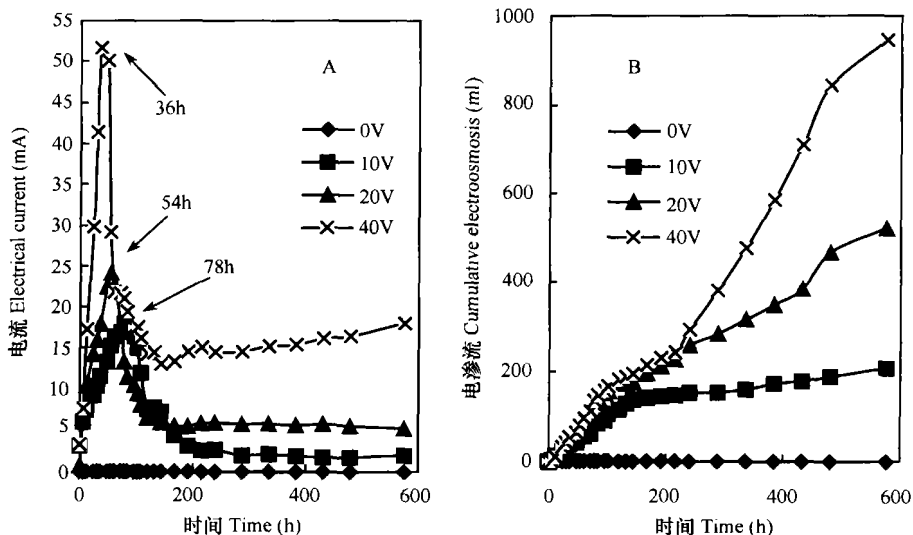


图 1 施加不同电压对电动处理过程中电流(A)和电渗流(B)的影响

Fig. 1 Effects of voltage during electrokinetic treatments on electrical current (A) and electroosmotic flow (B)

差异并不大,但随处理时间的推移,三者表现出来的差异越来越大,施加电压增加,电渗流的量也增加。这是因为电渗流与电压梯度满足正比关系^[15]。

表 1 是在不同电动处理时间各处理阴、阳极电解池溶液铬总量情况。结果发现当处理电压为 10 V 时阳极池中铬的浓度很低,可能是由于少量的被迁

移进入该池的铬在石墨电极上被吸附。对于 20 V 和 40 V 的处理,在 240 h 以后均有大量的铬从土壤中被移出,且主要以铬酸根离子通过电迁移而进入阳极池。0 V 处理的电解池铬浓度也有所增加,这是因为整个系统溶液的不断循环,导致部分铬由土壤向溶液中的扩散所致。

表 1 试验过程中阳极池和阴极池中溶液铬总量的变化
Table 1 Change in total chromium content in anolyte and catholyte (mg)

试验时间 Time (h)	0 V		10 V		20 V		40 V	
	阳极池 Anolyte	阴极池 Catholyte	阳极池 Anolyte	阴极池 Catholyte	阳极池 Anolyte	阴极池 Catholyte	阳极池 Anolyte	阴极池 Catholyte
192	1.42	2.05	0.11	bd ¹⁾	2.50	bd	3.58	bd
240	1.86	2.50	0.11	bd	2.12	bd	13.7	bd
336	2.39	3.91	0.23	bd	32.5	bd	27.4	bd
384	2.68	4.19	0.06	bd	36.3	bd	27.1	bd
480	3.15	6.34	0.33	bd	40.4	bd	26.6	bd
576	4.36	7.85	0.44	0.53	44.0	1.62	23.8	2.39

1)“bd”表示低于检测限“bd” means the content below the detection limit

图 2 显示的是在施加不同电压条件下阳极池和阴极池溶液电导率随时间的变化。随处理时间的增加,阳极池中溶液的电导率不断增加,在 200 h 时达到了一个较高的值,随后处于一个较为稳定的范围,这与电流的变化趋势相一致,说明土柱中的阴离子在电场作用下不断向阳极池移动。当阳极池的电导率趋于稳定时,电流值也趋于稳定。与 10 V 和 20 V

的处理相比,40 V 电压处理时阳极池溶液电导率明显要高。

而阴极池溶液的电导率则先迅速上升(前 100 h),然后降低,这是因为在这段时间内电流较大,在阴极产生的 OH^- 也较多。为了中和这些 OH^- ,所加入的控制溶液也多;但随着电流的下降,用于控制阴极液 pH 变化所加入的离子减少,电导率也逐渐降低。

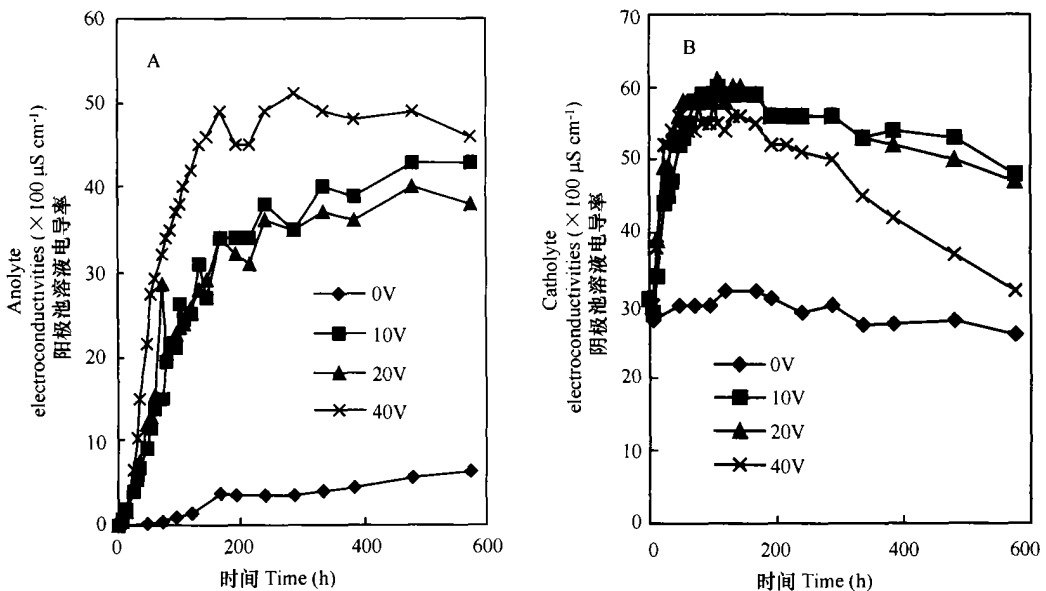


图 2 施加不同电压对阳极池(A)和阴极池(B)溶液电导率的影响

Fig. 2 Effects of voltage during electrokinetic treatments on electroconductivities of anolyte (A) and catholyte (B)

2.2 电动处理过程中土柱中的电压降分布

在所有三种不同的电压处理条件下,随着处理时间(即电解时间)的延长,分配于阳极池的电压降在不断减少,而分配在土柱上的电压降在不断增加,当阴阳两极溶液的电导率达到稳定值时,分配于土柱上的电压基本维持不变。这是因为在本试验中阳极池最初的溶液是蒸馏水,电阻很大,随着电解时间的不断延长,阳极池溶液导电性增强,因而分配于土柱上的电压增加。

在整个电动试验过程中,各段土壤截面的电压也在发生着变化,尤其是出现电压最高值的土壤截面在呈现着规律性的变化,总体趋势是出现电压最高值的土壤截面从阴极向阳极移动,逐渐稳定于4号或5号土柱并出现土柱中电压降的高值。表2中的数据(由于结果类似,所以对于施加10V和40V电压处理的结果未在这里列出)显示在102h时第4

片土壤上的电压降为7.90V,此后的波动范围为6.00~9.42V。但随着处理时间的延长(336h以后),出现最高电压降的土壤截面又在不断向阴极移动,且电压的值在逐渐下降。而表1中阳极池中铬含量快速增加也出现在336h附近,说明只有当土壤截面的高电压降开始消失时,六价铬向阳极池的移动才会明显增加,如果高电压降不消失则六价铬的移动就很困难。这表明铬在土壤溶液中于特定条件下可能会发生还原沉淀反应,导致铬不发生移动;而当这种土壤条件消失后,沉淀反应将不再发生,同时,这些沉淀物可能被重新溶解。事实上,这样的沉淀反应的确发生。Olazabel等^[16]曾研究了Cr(VI)和Fe(II)在水溶液中于不同酸度条件下可发生沉淀反应。溶液pH不同,沉淀物组成和结构不同。在酸性条件下,主要沉淀物为FeOHCrO₄、FeOHCrO₄·2Fe(OH)₃和Fe(OH)₃。

表2 20V电压处理条件下土柱和电解池中各部分的电压降

Table 2 Distribution of voltage drops in soil column and chambers during the electrokinetic treatment of 20 V voltage drop applied (V)

时间 Time (h)	阳极池 电压降 Drop in anode cell	各段土壤截面的电压降 ¹⁾ Drop in soil section										土柱总 电压降 Drop in soil column	阴极池 电压降 Drop in cathode cell
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10		
6	14.9	0.35	0.47	0.14	0.08	0.09	0.00	0.23	0.39	0.75	0.77	3.25	1.99
24	8.91	0.27	0.66	0.46	0.26	0.18	0.06	0.68	3.28	2.62	1.01	9.25	1.98
48	7.32	0.17	0.23	0.83	0.77	0.39	0.31	2.21	2.91	1.80	1.01	10.4	2.38
72	4.04	0.18	0.10	0.04	2.54	3.77	2.25	1.63	1.55	1.20	0.80	13.4	2.56
102	1.82	0.22	0.03	0.04	7.90	3.93	1.57	0.64	0.77	0.68	0.51	15.9	2.13
144	0.98	0.32	0.00	0.10	9.42	3.73	1.69	0.89	0.52	0.45	0.29	17.1	1.97
192	1.03	0.27	0.03	0.19	8.90	3.08	2.11	1.09	0.94	0.38	0.27	16.9	2.11
240	1.08	0.26	0.17	0.75	6.00	3.29	2.65	1.47	1.19	0.62	0.34	16.4	2.48
336	1.02	0.45	0.94	1.20	2.76	3.07	2.92	1.87	1.60	1.15	0.69	16.4	2.47
432	1.57	0.78	1.02	1.23	1.83	2.89	3.19	2.12	1.94	1.38	0.79	16.8	1.76
576	3.16	0.77	0.96	1.05	1.32	2.63	2.94	2.02	2.22	1.03	0.43	15.2	1.70

1) 从阳极自左向右 S1~S10 from anode to cathode

2.3 电动处理后土柱中土壤pH和电导率的分布

因为阴极池溶液pH控制和H⁺在土柱中向阴极方向的迁移,所以不同电动处理后土柱中土壤的pH与土壤原始pH值(6.04)相比都明显下降,各截面土壤的pH均在3左右。

对于不加电压的处理,各段土壤截面的电导率均明显高于原始值,这是因为阴极池溶液的成分是0.1 mol L⁻¹的NaH₂PO₄,在整个试验过程中由于离子的扩散作用,溶液中的可移动离子进入到土壤中

提高了土壤的电导率。而施加电压的各个处理,其土柱中部分土壤的电导率明显下降,虽然阴极池的pH被控制在酸性范围,将不会有铬的氢氧化物生成,但在土柱或溶液中可能存在一些其他的沉淀反应,如CrPO₄的沉淀等导致土壤电导率的降低。

2.4 不同电压处理后铬的去除效率及能耗

表3和表4是电动处理后各段土壤截面中剩余的总铬和六价铬含量及其去除率。其中,20V处理的土壤中剩余总铬含量最低,去除率达到41.1%,

其次是 40 V 处理, 其去除率为 24.9%, 而 0 V 和 10 V 处理的去除率也达到了 20% 以上。但是, 所有电动处理后土壤中六价铬的去除率均高于 70%, 表现出很好的处理效果。

土壤中六价铬主要以 HCrO_4^- 、 CrO_4^{2-} 、 $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ 等较大离子半径的阴离子形式存在, 这些体积较大的阴离子在 10 V 的电场条件下移动慢; 另一方面, 电场作用和土壤中的低 pH 环境可以强化六价铬在土壤中的还原反应, 使其生成难移动的三价铬^[17, 18] 滞留在土壤中(表 3: $3.1625 \text{ mg kg}^{-1}$)。比较表 3 和

表 4 发现, 当施加电压分别为 10 V 和 20 V 时, 在土柱的第 3 片和第 4 片分别形成了一个总铬浓度分布的峰值, 而在该土壤截面的六价铬浓度并不高, 也说明这些铬主要以三价铬形式存在。而导致这些截面存在较高浓度的三价铬是因为一方面土壤本身存在的三价铬在电场作用下的迁移, 另一方面则是因为一部分六价铬在土柱中迁移并在该位置由于特殊的土壤环境条件而被还原和生成沉淀(土壤电导率降低)。

表 3 不同电压处理后土柱中各段土壤的总铬含量

Table 3 Soil total Cr concentrations in different soil sections during electrokinetic treatments using different voltage drops

电压 Voltage (V)	原土 Initial S0	各段土壤截面的总铬含量 ¹⁾										去除率 Removal percent (%)
		Total Cr concentration in soil section (mg kg^{-1})										
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
0	1 086	1 185	840	1 236	741	720	784	805	876	592	710	22.8
10	1 086	701	860	1 625	877	924	556	965	725	912	818	20.2
20	1 086	1 108	662	714	1 040	611	510	492	598	502	438	41.1
40	1 086	1 048	1 070	1 220	1 249	712	983	468	495	608	507	24.9

1) 从阳极自左向右 S1~ S10 from anode to cathode

表 4 不同电压处理后土柱中各段土壤的六价铬含量

Table 4 Soil Cr(VI) concentrations in different soil sections after electrokinetic treatments using different voltage drops

电压 Voltage (V)	原土 Initial S0	各段土壤截面的六价铬含量 ¹⁾										去除率 Removal percent (%)
		Cr(VI) concentration in soil section (mg kg^{-1})										
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	
0	193	85.7	150	180	202	206	207	183	120	69.0	51.6	25.7
10	193	38.0	54.6	76.5	81.4	75.1	40.8	43.7	41.1	50.2	39.8	72.9
20	193	49.8	47.1	49.0	45.2	47.8	45.8	41.2	45.2	42.5	35.5	77.7
40	193	37.9	41.9	49.6	46.7	58.5	47.3	42.6	41.3	40.4	35.4	77.7

1) 从阳极自左向右 S1~ S10 from anode to cathode

根据电能消耗的计算公式(1), 计算得出 10 V 处理(电压梯度为 0.8 V cm^{-1}) 的能耗为 47 kWh t^{-1} , 20 V 处理(电压梯度为 1.6 V cm^{-1}) 的能耗为 147 kWh t^{-1} , 40 V 处理(电压梯度为 3.2 V cm^{-1}) 的能耗为 694 kWh t^{-1} 。随着施加电压的增加, 能耗也成倍增加。所以在实际应用中电压的使用不能太高, 应同时考虑到电能消耗和去除率这两种因素, 并尽量选择较低的电压。综合以上两种因素, 在本研究中最优的施加电压为 20 V。

3 小 结

在施加不同电压处理铬污染黄棕壤时, 由于六价铬离子本身较弱的移动性和较强的氧化性等特征, 在低电压梯度(0.8 V cm^{-1}) 和高电压梯度(3.2 V cm^{-1}) 条件下均难以获得满意的去铬效率和能耗, 而在 1.6 V cm^{-1} 时结果较好; 电动处理过程中土柱某段土壤出现的高电压降现象主要是由于氧化还原

反应和沉淀反应(土壤电导率降低)导致该截面土壤离子浓度减少所致;通过提高阳极池溶液的电导率和控制 pH 会有效提高铬的去除效率和降低能耗。

参 考 文 献

- [1] 王慎强, 陈怀满, 司友斌. 我国土壤环境保护研究的回顾和展望. 土壤, 1999, 31(5): 255~ 260. Wang S Q, Chen H M, Si Y B. The study review and prospect of soil environment protection in China (In Chinese). Soils, 1999, 31(5): 255~ 260
- [2] Acar Y B, Alshawabkeh A N. Principles of electrokinetic remediation. Environ. Sci. Technol., 1993, 27(13): 2638~ 2647
- [3] Ribeiro A B, Mateus E P, Ottosen L M, *et al.* Electrodialytic removal of Cu, Cr, and As from chromated copper arsenate-treated timber waste. Environ. Sci. Technol., 2000, 34: 784~ 788
- [4] Reddy K R, Asce M, Chinthamreddy S. Sequentially enhanced electrokinetic remediation of heavy metals in low buffering clayey soils. J. Geotechnical and Geoenviron. Engineer., 2003, 129(3): 263~ 277
- [5] Reddy K R, Chaparro C, Saichek R E. Removal of mercury from clayey soils using electrokinetics. J. Environ. Sci. and Health Part A-Toxic/Hazardous Substances Environ. Engineer., 2003, 38(2): 307~ 338
- [6] Zhou D M, Alshawabkeh A N, Deng C F, *et al.* Electrokinetic removal of chromium and copper from contaminated soils by lactic acid enhancement in the catholyte. J. Environ. Sci., 2004, 16(4): 529~ 532
- [7] Zhou D M, Deng C F, Cang L. Electrokinetic remediation of a Cu contaminated red soil by conditioning catholyte pH with different enhancing chemical reagents. Chemosphere, 2004, 56: 265~ 273
- [8] 周东美, 仓龙, 邓昌芬. 过氧化氢对铬在黄棕壤中电动过程的影响. 土壤学报, 2005, 42(1): 59~ 63. Zhou D M, Cang L, Deng C F. Study of electrokinetic processes of chromium in a yellow brown soil as affected by hydrogen peroxide (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2005, 42(1): 59~ 63
- [9] 周东美, 仓龙, 邓昌芬. 络合剂和电解液酸度控制对土壤铬电动过程的影响. 中国环境科学, 2005, 25(1): 10~ 14. Zhou D M, Cang L, Deng C F. Electrokinetic processes of soil chromium as affected by complexes and catholyte pH (In Chinese). China Environment Science, 2005, 25(1): 10~ 14
- [10] 仓龙, 周东美, 邓昌芬. 柠檬酸和 EDTA 对六价铬在黄棕壤和红壤上吸附行为的影响. 农业环境科学学报, 2004, 23(4): 710~ 713. Cang L, Zhou D M, Deng C F. Effect of citric acid and EDTA on adsorption of chromium (VI) in yellow brown soil and red earth (In Chinese). Journal of Agro-Environment Science, 2004, 23(4): 710~ 713
- [11] Chen N C, Kanazawa S, Horiguchi T. Chromium (VI) reduction in wheat rhizosphere. Pedosphere, 2000, 10(1): 31~ 36
- [12] Weng C H, Yuan C. Removal of Cr (VI) from clay soils by electrokinetics. Environ. Geochem. and Health, 2001, 23: 281~ 285
- [13] Sawada A, Mori K, Tanaka S, *et al.* Removal of Cr (VI) from contaminated soil by electrokinetic remediation. Waste Management, 2004, 24(5): 483~ 490
- [14] Li Z, Yu J W, Neretnieks I. Removal of Pb (II), Cd (II) and Cr (VI) from sand by electromigration. J. Hazardous Mater., 1997, 55: 295~ 304
- [15] Eykholt G R. Development of pore pressures by nonuniform electroosmosis in clays. J. Hazardous Mater., 1997, 55: 171~ 186
- [16] Olazabal M A, Nikolaidis N P, Suib S A, *et al.* Precipitation equilibria of the Chromium (VI)/Iron (III) system and spectroscopic characterization of the precipitates. Environ. Sci. Technol., 1997, 31: 2898~ 2902
- [17] Pamuku S, Week A, Wittleand J K. Enhanced reduction of Cr (VI) by direct electric current in a contaminated clay. Environ. Sci. Technol., 2004, 38(4): 1236~ 1241
- [18] Haran B S, Popov B N, Zheng G, *et al.* Mathematical modeling of hexavalent chromium decontamination from low surface charged soils. J. Hazardous Mater., 1997, 55: 93~ 107

ELECTROKINETIC TREATMENT OF A CHROMIUM CONTAMINATED YELLOW BROWN SOIL AS AFFECTED BY VOLTAGE

Cang Long Zhou Dongmei

(State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Because of complex chemical reactions of chromium in soil, the mechanism of electroremediation of Cr⁶⁺ contaminated soil remains unclear up to now. In this paper, effects of voltage drops during electrokinetic treatments on the movement of chromium in a yellow brown soil were studied by evaluating distribution of voltage drops in soil sections, electric energy consumption, change in soil basic properties and total chromium residual in the soil. The results show that electrokinetic currents and electroosmosis flows increased with increasing voltage, and the soil pHs in all soil sections dropped to about 3 after electrokinetics. Redox and precipitation reactions occurred in the soil column during the electrokinetic treatments, which led to decrease in ions concentration in the soil solution and uneven distribution of voltage drop in the soil column. The applied electric field and low pH environment strengthened reduction reaction of hexavalent chromium to form hardly-movable trivalent chromium in the soil. Application of 20 V voltage achieved higher Cr removal rate and used up less electric energy. After 576 hours, the treatment removed 41.1% and 77.7% of soil Cr and Cr(VI) respectively, and used up 147 kWh t⁻¹ of electric energy. It suggests that to control anolyte pH and increase the anolyte electroconductivity is an effective method to increase Cr removal rate from the soil column and reduce electric energy consumption.

Key words Chromium; Voltage drop; Yellow brown soil; Electrokinetic