

锌冶炼场地土壤中针铁矿对镉迁移的影响机制^①

高梓伦, 黄驰岳, 郭朝晖, 徐锐, 梁学超, 钟林健, 彭驰

(中南大学 冶金与环境学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 研究了某遗留锌冶炼场地土壤中重金属的污染特征, 结合模拟实验探讨了土壤中针铁矿对 Cd 迁移的影响机制。结果表明, 锌冶炼场地土壤中 As、Cd、Cu、Hg、Pb 几何均值依次为 15.9、1.52、62.1、0.108 和 167 mg/kg, Cd 含量均值为湖南省土壤背景值的 11.7 倍。场地土壤中 Cd 具有较强的迁移性, 下渗迁移可达 6 m 甚至更深。随机森林模型分析结果表明, 土壤中 Cd 迁移主要受针铁矿和粉砂影响。土壤中针铁矿可以吸附 Cd 并进行迁移, 淋滤液 pH 值和离子强度明显影响土壤中针铁矿对 Cd 的迁移作用。当淋滤液 pH=6、离子强度 1 mmol/L 时, 37.6% 的 Cd 随针铁矿携带下渗迁移。通过调控土壤 pH 值和盐基离子浓度改变土壤中针铁矿对 Cd 迁移的影响, 可以实现锌冶炼场地土壤中 Cd 等重金属污染的风险管控。

关键词: 锌冶炼场地; 重金属污染; 镉; 迁移; 针铁矿; 土壤污染; 离子强度

中图分类号: X53

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.06.022

文章编号: 0253-6099(2023)06-0100-07

Effect of Goethite on Migration of Cadmium in Soil of Abandoned Zinc Smelting Site

GAO Zilun, HUANG Chiyue, GUO Zhaohui, XU Rui, LIANG Xuechao, ZHONG Linjian, PENG Chi
(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract: The pollution of heavy metals in the soil of a zinc smelting site was analyzed, and the influence mechanism of goethite on cadmium migration in the soil was discussed by performing simulation experiments. The results show that the geometric mean values of As, Cd, Cu, Hg and Pb in zinc smelting site soil are 15.9 mg/kg, 1.52 mg/kg, 62.1 mg/kg, 0.108 mg/kg and 167 mg/kg respectively. The average content of Cd is 11.7 times the general value of soil in Hunan Province. It is shown that Cd in the soil has strong migration, and can be infiltrated down to the depth of 6 m or more of the soil. The results of stochastic forest model analysis show that Cd migration in the soil is mainly affected by goethite and silt. Cd in the soil can be adsorbed by goethite and then migrated. The pH value and ionic strength of leachate obviously affect the migration of Cd by goethite in the soil. When the pH of leachate is 6 and the ionic strength is 1 mmol/L, 37.6% of Cd in the soil can be migrated by goethite. Adjusting the pH value and salt ions concentration of soil can change the migration of Cd by goethite in the soil. As a result, the risk of pollution by heavy metals such as Cd in the soil of zinc smelting site can be controlled.

Key words: zinc smelting site; heavy metals pollution; cadmium; migration; goethite; soil pollution; ionic strength

有色金属冶炼是土壤重金属污染的主要来源之一^[1]。土壤中重金属迁移的影响因素多^[2-5], 有研究发现, 铅锌冶炼场地不同功能区土壤中重金属下渗迁移主要与地表硬化和土壤 pH 值有关^[6]; 通过内梅罗指数评价重金属在铁矿周边土壤中的垂直迁移能力, 发现 Cu、Pb 在土壤中的水平迁移能力较强, 但垂直迁移能力较差^[7]; 有研究表明, 重金属在土壤中的迁移

主要受到有机质及铁氧化物的影响^[8]。针铁矿是环境温度下热力学最稳定的铁氧化物, 也是自然氧化还原条件下无定形和亚稳态铁氧化物的最终转化产物, 针铁矿对重金属阳离子的吸附能力随着 pH 值增加而增加^[9-10]。针铁矿在土壤中的含量与气候等因素密切相关, 季风区土壤针铁矿含量为 1.20%~1.84%^[8]。因针铁矿比表面积大, 具有易于和重金属结合且迁移性

① 收稿日期: 2023-06-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1800400)

作者简介: 高梓伦(1998—), 男(彝族), 云南红河人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染防治。

通信作者: 郭朝晖(1971—), 男, 湖南宁乡人, 博士, 教授, 主要研究方向为环境污染控制技术。

强的特点,会携带重金属迁移^[11-12]。近年来越来越多的研究聚焦于针铁矿促进污染物迁移特性^[13]。锌冶炼工艺以湿法为主,生产过程中大量含盐浸出液无组织进入场地土壤后会影响到土壤中针铁矿和重金属的迁移^[14-16]。冶炼场地大多地质条件复杂,土壤孔隙度高,重金属更容易下渗迁移^[17]。然而有关含盐浸出液与针铁矿对冶炼场地中重金属迁移影响的研究较少。本文以湖南某锌冶炼场地土壤为研究对象,通过野外调查,研究土壤中重金属污染及其垂向迁移特征;结合室内模拟实验,研究针铁矿对土壤中重金属迁移的影响机制。研究成果可为冶炼场地土壤中重金属污染风险防控及污染修复提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况及样点采集

湖南某锌冶炼厂主要生产锌锭、硫酸等,于2002年关停。该场地地理坐标为113°18'E,29°24'N,所在区域年平均降雨量1340 mm,属于温带湿润气候区。

2021年9月在锌冶炼场地以80 m×80 m进行布点,采集剖面土壤样品55个(采样点位11个,名称为S1~S11,采样深度0~0.5 m、0.5~2 m、2~4 m、4~6 m和6~8 m)。土壤样品贮存于聚乙烯塑料袋中运到实验室。在室温下风干,过100目(0.15 mm)筛,备用。

1.2 室内模拟实验

室内模拟实验主要进行Cd吸附实验和针铁矿-Cd共迁移实验。

参考文献[18]制备针铁矿。所制备的针铁矿胶体矿物相组成见图1。制备的针铁矿特征峰与针铁矿标准PDF卡片吻合,表明所制备的针铁矿胶体具有较高纯度。

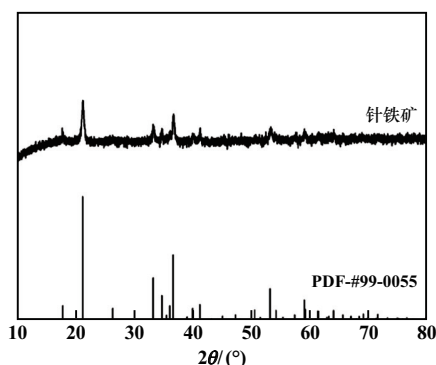


图1 针铁矿 XRD 图谱

1.2.1 Cd 吸附实验

取0.1000 g 针铁矿置于离心管中,加入初始浓度为10 mg/L 的 Cd 溶液 50 mL(背景浓度为1 mmol/L

NaNO₃, pH=5),超声分散后在恒温(25℃)摇床中振荡(转速200 r/min)。分别在0、5、10、20、60、120、240、480、720、1440 min 时取样,离心后取上清液过0.22 μm 滤膜,用电感耦合等离子发射光谱仪测定 Cd 浓度,所得数据进行吸附动力学模型拟合分析。等温吸附实验时,改变 Cd 初始浓度分别为5、10、20、40、100、200、400 mg/L,在1440 min 取样,经同样实验过程后,将取得的数据进行等温吸附模型拟合分析。同时,设置 pH 值为2、3、4、5、6、7、8、9 系列,NaNO₃ 浓度为1、10、30、100 mmol/L 系列,分别研究 pH 值和离子强度对 Cd 吸附影响。

1.2.2 针铁矿-Cd 共迁移实验

共迁移实验使用直径2.5 cm、长10.0 cm 的有机玻璃柱为实验柱,柱子两端放置0.180 mm 滤膜,填充介质为石英砂。配置共迁移溶液,其中针铁矿浓度为50 mg/L,Cd 浓度为10 mg/L,用磁力搅拌器搅动溶液,防止胶体聚沉。使用 HNO₃ 和 NaOH 调节共迁移溶液 pH 值,使用 NaNO₃ 溶液调节离子强度,设置 pH 值为4、5、6、7、8、9 系列和 NaNO₃ 浓度为1、10、30 mmol/L 系列,分别研究 pH 值和离子强度对针铁矿-Cd 共迁移的影响。使用蠕动泵自下而上给实验柱通入10PV(孔隙体积)背景溶液,后切换到共迁移溶液,开始共迁移实验。溶液流速为5 mL/min,每隔1 min 收集流出液,通入共迁移溶液4PV 后切换到背景溶液。参照文献[18],使用紫外可见分光光度法在波长425 nm 下测量流出液针铁矿胶体的浓度。使用火焰原子吸收光谱法分别测定流出液中总 Cd 浓度和溶解态 Cd 浓度,其中总 Cd 浓度消解后进行测定,溶解态 Cd 浓度在流出液经0.22 μm 滤膜过滤后测定。通过针铁矿共迁移的 Cd 浓度为总 Cd 浓度减去溶解态 Cd 浓度。

1.3 分析方法

采用 HNO₃-HCl-HF 混合酸(5:3:2)对土壤样品进行消解。采用原子荧光光谱法测定 As 和 Hg 总含量。通过电感耦合等离子体质谱仪检测其余重金属及 Fe、Al 总含量。参照《土壤农业化学分析方法》^[19]测定土壤 pH 值、游离氧化铁/铝(Fe_d/Al_d)和土壤机械组成(砂粒、粉砂和黏粒的含量)。

采用统计学指标评价冶炼场地及周边土壤污染程度,并运用地累积指数(I_{geo})对土壤中重金属污染程度进行综合评价^[20], I_{geo} 的具体评判标准参考文献[21]。

$$I_{geo} = \log_2 [C_n / (1.5B_n)] \quad (1)$$

式中 C_n 为土壤重金属含量; B_n 为对应湖南省土壤背景值。

分析了剖面土壤重金属垂直分布特征,并采用随机森林模型对剖面土壤中影响重金属分布的因素进行

分析。模型建立过程^[22]包括:①将土壤重金属含量和理化性质作为输入数据;②输入数据中训练集和测试集的比例设置为9:1;③设置量化数据命令并比较拟合优度。此外,为了提高拟合优度,对训练数据集进行了10倍交叉验证处理。

2 实验结果与讨论

2.1 锌冶炼场地及其周边土壤重金属污染特征

锌冶炼场地土壤重金属含量见表1。土壤中As、Cd、Cr、Cu、Hg和Pb含量范围分别为1.36~93.9、0.144~29.3、34.8~91.4、23.6~679、0.022~1.16和29.6~8550 mg/kg,几何平均值分别为15.9、1.52、64.3、62.2、0.108

和167 mg/kg。其中Cd污染最严重,其含量均值为湖南省土壤重金属背景值11.7倍;Hg和Pb均值均超出当地背景值3倍以上。说明冶炼活动造成土壤中Cd、Hg和Pb累积。与《土壤环境质量建设用土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 36600—2018)中第二类用地筛选值比较,土壤中As和Pb的超标率分别为3.63%和16.4%。土壤中As和Cu的变异系数(标准差与平均值的比值,CV)均大于0.5,可初步判定土壤中As和Cu来自人为活动^[23]。由此可知,土壤中As、Cd、Cu、Hg和Pb主要来源为人为活动。Cr含量接近背景值,且其CV值较低(0.189),表明土壤中Cr来自地质背景。

表1 锌冶炼场地土壤中重金属含量

元素	含量/(mg·kg ⁻¹)					背景值 ^[24]	第二类用地筛选值	变异系数 CV	超标率/%
	最小值	最大值	中位值	平均值	标准差				
As	1.36	93.9	15.1	15.9	17.6	13.6	60	1.16	3.63
Cd	0.144	29.3	1.61	1.52	6.86	0.13	65	1.50	0
Cr	34.8	91.4	68.6	64.3	12.4	66.71	—	0.189	—
Cu	23.6	679	58.0	62.2	130	41.97	18 000	1.33	0
Hg	0.022 0	1.16	0.084	0.108	0.099 0	0.034	38	1.32	0
Pb	29.6	8 550	115	167	1 380	29	800	2.34	16.4

采用地累积指数(I_{geo})对场地土壤中重金属污染程度进行评价。根据土壤中各重金属的 I_{geo} 值对重金属污染程度进行分级,重金属各污染级别所占比例见表2。从表2可以看出,土壤中Cd、Pb和Hg的 I_{geo} 值高于2级的比例分别为61.8%、41.8%和21.7%,说明土壤中Cd、Pb和Hg污染程度达到中度至重度。As和Cu的 I_{geo} 值大多数为0~1级,比例分别为91.0%和80.0%,即As和Cu在土壤中轻度污染。Cr的 I_{geo} 值全部为0级,即场地土壤中Cr未污染。

表2 锌冶炼场地土壤中重金属污染级别占比

I_{geo} 范围	级别	各重金属污染级别占比/%					
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Pb
$I_{geo} \leq 0$	0	65.5	16.4	100.00	58.2	25.5	14.6
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	25.5	10.9	0.00	21.8	27.3	32.7
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	7.2	10.9	0.00	12.7	25.5	10.9
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	1.8	10.9	0.00	3.65	12.7	7.3
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	0.00	12.7	0.00	3.65	3.6	14.5
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	0.00	12.7	0.00	0.00	5.4	14.5
$I_{geo} > 5$	6	0.00	25.5	0.00	0.00	0.00	5.5

注:“0级”代表“无污染”,“1级”代表“轻中度污染”,“2级”代表“中度污染”,“3级”代表“中强污染”,“4级”代表“强污染”,“5级”代表“强-重度污染”,“6级”代表“重度污染”。

进一步研究了冶炼场地土壤As、Cd、Cr、Cu、Hg和Pb含量与土壤剖面深度的关系,见图2。从图2可以看出,除Cr外,其他5种重金属含量随着深度增加而

降低。As和Cd在地下4~6 m剖面土壤中含量分别为2.17~35.9 mg/kg和0.147~4.39 mg/kg,分别为背景值的0.16~2.64和1.13~33.77倍,表明土壤重金属中Cd具有较强的迁移性,As次之,Cd和As可迁移至剖面土壤6 m甚至更深处。Cu、Hg和Pb主要集中在剖面土壤0~2 m土层中,说明这些元素在土壤中含量较低或向下迁移速度较慢。与前人报道的土壤中Cu、Pb等在风化、地层移动、降雨等作用会缓慢向土壤深层迁移^[25]结果相一致。可能是场地土壤中Cr含量较低,且主要来源于土壤母质,剖面土壤中Cr含量随土壤深度增加变化不明显。

以Cd为例,采用随机森林模型对影响重金属迁移的主要影响因素进行重要性分析,结果如图3所示,其中Fe、Al为土壤总Fe、总Al。由图3可以看出,土壤中Cd含量主要受游离氧化铁(Fe_d)和粉砂的影响。金属在土壤中的迁移率在很大程度上取决于土壤的物理化学性质。根据聚集层次理论,土壤颗粒会增强土壤的渗透性,粒径越大,Cd的迁移能力越强^[26]。因此,粉砂可以加快Cd在土壤中的迁移。游离氧化铁由非晶型氧化铁和针铁矿、赤铁矿等晶型氧化铁组成^[27]。其中针铁矿分布广泛,是环境温度下热力学最稳定的铁氧化物^[28]。针铁矿具有较大比表面积,对Cd的吸附性较强,可以影响土壤中Cd的迁移特征^[29]。因此,针铁矿和粉砂都能影响Cd在土壤中的迁移性。

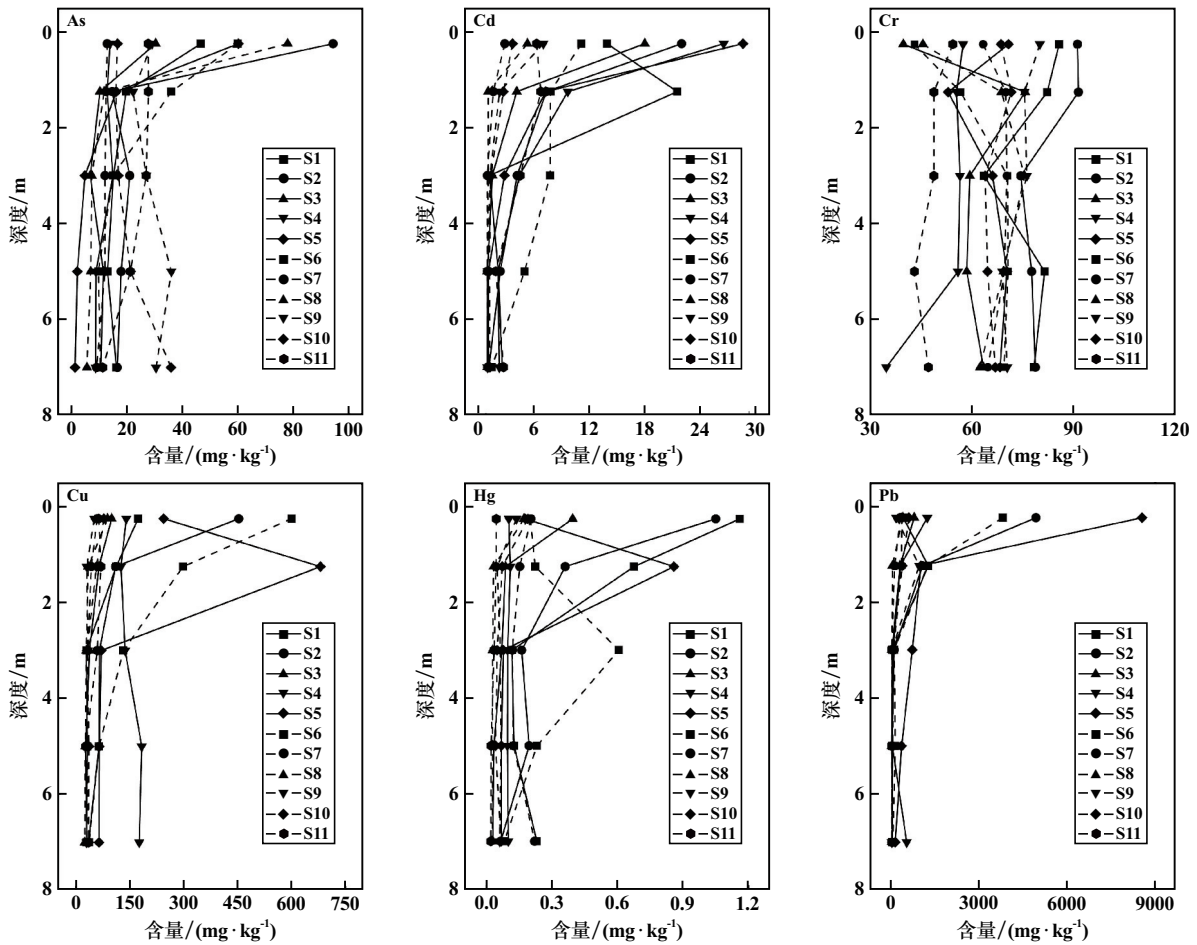


图 2 锌冶炼场地剖面土壤中重金属含量垂向分布特征

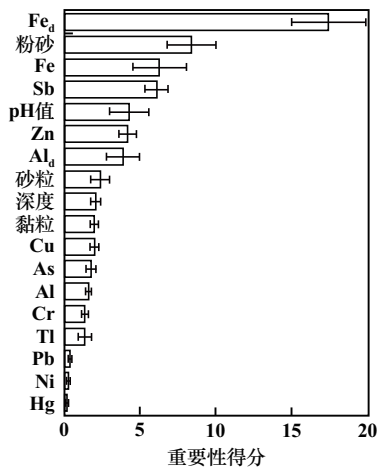


图 3 土壤中 Cd 迁移的主要影响因素

2.2 土壤中针铁矿对 Cd 迁移的影响机制

针铁矿作为典型游离氧化铁,具有易于和重金属结合且迁移性强的特点,本文以针铁矿为代表来阐明游离氧化铁对土壤中 Cd 迁移的影响。

分别采用拟一级、拟二级动力学模型对针铁矿对 Cd 的吸附动力学曲线进行拟合分析,结果见图 4(a)

和表 3。针铁矿对 Cd 的吸附在最初的 2 h 内很快,4 h 左右吸附达到平衡。这主要是液相中 Cd 初始浓度与胶体表面 Cd 浓度差较大,吸附速率快,而随着吸附的进行,两者浓度差减小,吸附有效位点趋于饱和,传质推动力减小,使得吸附速率降低,直达到吸附平衡。比较两种模型针铁矿对 Cd 吸附的相关系数 R^2 可以看出,针铁矿对 Cd 吸附更符合拟一级动力学吸附 ($R^2 = 0.9924$),表明吸附过程是由边界扩散的交换吸附过程控制。

采用 Langmuir 和 Freundlich 模型方程拟合针铁矿对 Cd 的吸附等温线,结果如图 4(b) 和表 3 所示。由拟合结果可知, Freundlich 模型的 R^2 值为 0.9957,其拟合程度更好,表明吸附剂表面不是均一稳定的,为多分子层吸附。 $n > 1$ 时为优惠吸附, $n = 2 \sim 10$ 时易于吸附, $n < 0.5$ 时难以吸附。 $n = 5.014$,可见针铁矿对 Cd 易于吸附^[30]。

针铁矿对 Cd 的吸附受溶液 pH 值与离子强度的影响,如图 5 所示。体系 pH 值在针铁矿对 Cd 的吸附过程中起着重要作用。在实验条件范围内,随着溶液

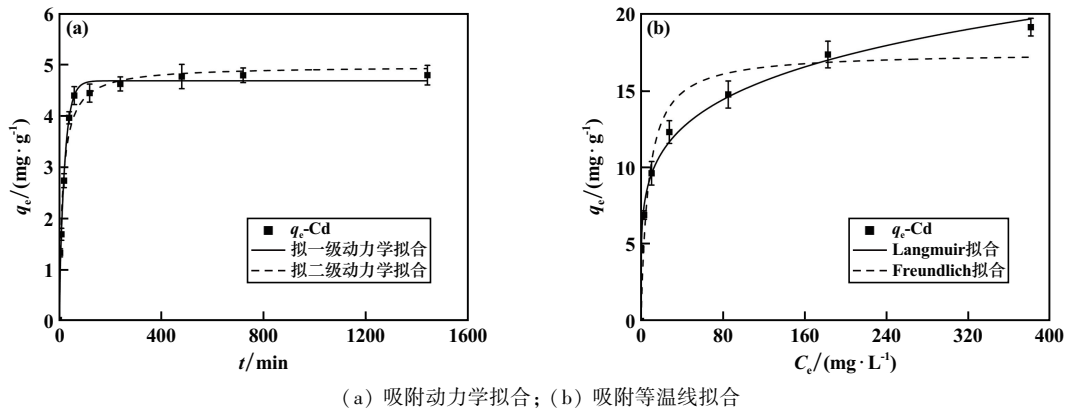


图4 针铁矿对Cd吸附的动力学拟合曲线与等温线拟合曲线

表3 针铁矿对Cd的吸附动力学与等温线拟合参数

拟一级动力学拟合			拟二级动力学拟合			Langmuir拟合			Freundlich拟合		
$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_1/$ [$\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$]	R^2	$q_e/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$k_2/$ [$\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{min})^{-1}$]	R^2	$Q_m/$ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	$B/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	R^2	$K_f/$ ($\text{L} \cdot \text{mg}^{-1}$)	n	R^2
4.689	0.046 5	0.992 4	4.978	0.013 84	0.985 2	17.47	2.811	0.910 2	6.003	5.014	0.995 7

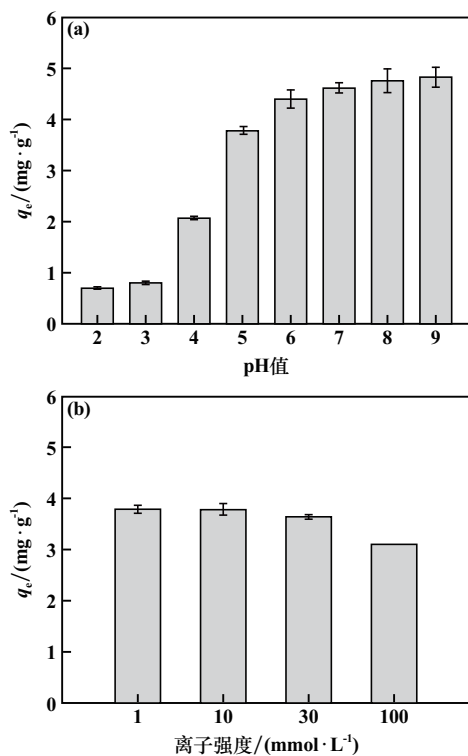


图5 pH值和离子强度对针铁矿吸附Cd的影响

pH值增加,吸附量 q_e 显著增加。pH=9时,针铁矿Cd的吸附接近饱和, q_e 达到了4.829 mg/g,约为pH=2时的6倍。pH值较低时,可能是针铁矿表面具有较高的Zeta电位,与金属阳离子之间的静电斥力增大导致吸附量较低;此时溶液中较高浓度的 H_3O^+ 可以通过与Cd竞争吸附位点以降低金属阳离子的吸附量。以上结果表明,静电吸附可能是针铁矿吸附Cd的主要原因。

离子强度从1 mmol/L增大到100 mmol/L,针铁矿对Cd的吸附量从3.79 mg/g降到3.10 mg/g。这可能是随着离子强度增大,Na⁺的竞争作用增强。与Cd相比,Na⁺具有较小的水合离子半径,大量的Na⁺会导致较强的交换吸附,从而降低针铁矿对Cd的吸附。此外,随着离子强度增大,胶体颗粒表面的双电层被压缩,胶粒逐渐聚集,针铁矿的比表面积迅速降低,有效吸附位点随之减少。这也解释了离子强度100 mmol/L时针铁矿对Cd的吸附量迅速降低的原因。这表明针铁矿对Cd的吸附可能形成外层络合物,导致吸附量随着离子强度增加而降低。

2.3 锌冶炼场地土壤中针铁矿-Cd共迁移研究

针铁矿在吸附Cd后,会通过自身运动与Cd产生共迁移现象,同时pH值与离子强度会影响它们迁移。

不同pH值条件下针铁矿与Cd在石英砂柱中的穿透曲线见图6,离子强度对针铁矿与Cd迁移的影响见图7,不同pH值和离子强度对针铁矿与Cd迁移的影响结果见表4。

由图6和表4可知,pH值对针铁矿的迁移有显著影响。pH值从4增大到9时,针铁矿的穿透速率变慢,最大穿透率和回收率都降低。由DLVO理论可知,随着pH值增大,胶体之间的相互作用能逐渐降低,最大能垒值逐渐减小,胶体间斥力减小,更加容易聚集;针铁矿与石英砂表面之间的相互吸引逐渐增加,针铁矿更加容易滞留在石英砂柱中。因而酸性条件更有利于针铁矿在多孔介质中的迁移。总Cd的最大穿透率和回收率均随着pH值增大而降低。通过针铁矿共迁移Cd的比例随pH值增大呈现先升高后降低的趋势。

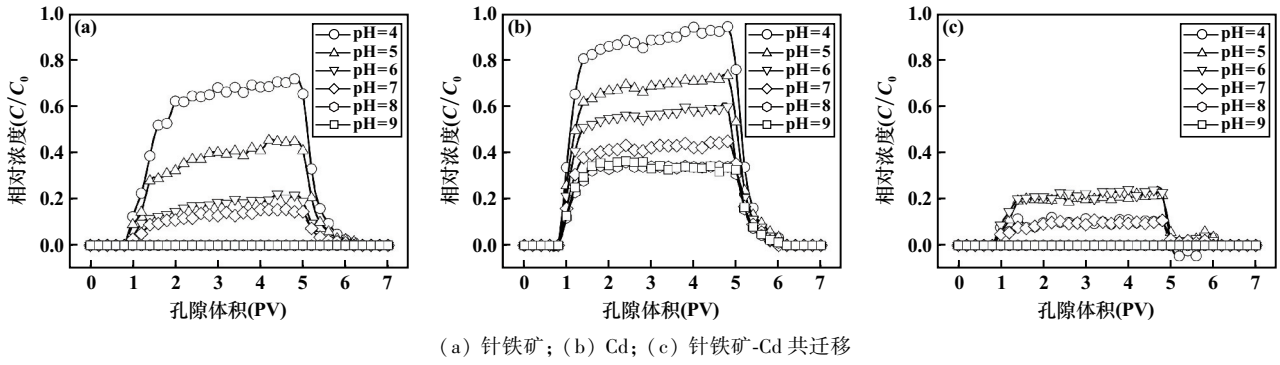


图 6 不同 pH 值条件下针铁矿与 Cd 的穿透曲线

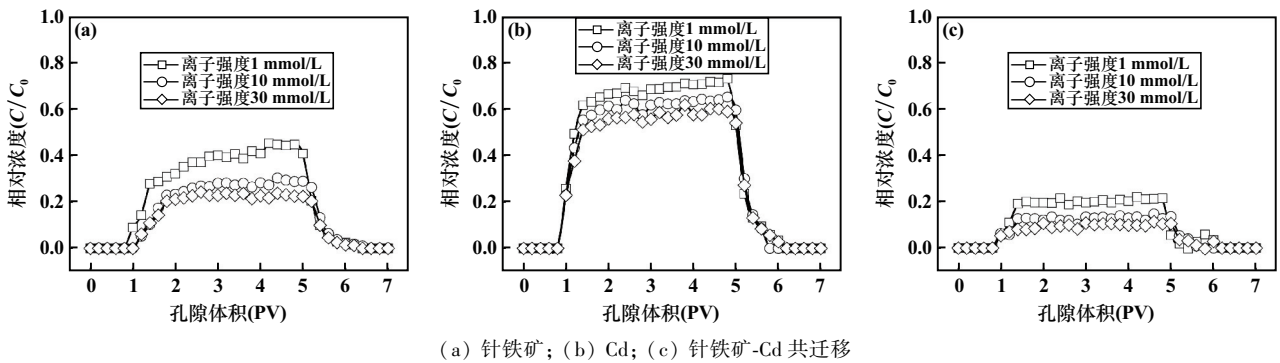


图 7 不同离子强度条件下针铁矿与 Cd 的穿透曲线

表 4 不同 pH 值和离子强度对针铁矿与 Cd 迁移的影响

pH 值	影响因素 离子强度/(mmol · L ⁻¹)	针铁矿迁移		Cd 总体迁移		Cd 胶体迁移
		最大穿透率/%	回收率/%	最大穿透率/%	回收率/%	针铁矿贡献率/%
4	1	71.7	65.7	94.4	91.6	10.4
5	1	45.3	39.9	73.3	71.0	28.3
6	1	22.2	18.5	59.8	57.9	37.6
7	1	17.6	16.0	44.9	43.7	22.8
8	1	0.0	0.0	35.8	35.0	0.0
9	1	0.0	0.0	36.4	35.7	0.0
5	10	30.3	27.4	65.4	64.6	20.6
5	30	24.2	22.8	62.0	59.9	17.5

由图 7 和表 4 可知,随着 NaNO₃ 浓度增大,针铁矿最大穿透率和回收率均降低。说明高离子强度限制了针铁矿的迁移。由 DLVO 理论,离子强度增大减小了针铁矿之间的斥力,增加了针铁矿与石英砂表面间的相互吸引,多孔介质对针铁矿的滞留增加而降低了胶体迁移。而且先沉积的胶体可以为之后注入的胶体提供额外的沉积位点,进一步促进针铁矿在柱中的沉积。随着离子强度增加,Cd 的最大穿透率、回收率都降低。通过针铁矿共迁移 Cd 的比例随离子强度增大而减小。针铁矿在多孔介质的滞留过程中起到了主导作用。所以针铁矿存在条件下,低离子强度更有利于 Cd 在多孔介质中的迁移。

由表 4 可知,pH=6 时,Cd 的胶体携带迁移率最

高,为 37.6%。由此可知,当 pH<6 时针铁矿对 Cd 吸附量较小从而阻碍 Cd 通过针铁矿迁移,pH>6 后,针铁矿容易被多孔介质截留,从而影响 Cd 的迁移。

3 结 论

1) 某锌冶炼场地土壤受到重金属污染,其中 Cd 污染最严重,其含量为背景值的 11.7 倍,其次为 Hg、Pb、As 和 Cu 污染;As、Cd、Cu、Hg 和 Pb 主要来源为人为活动,Cr 的主要来源是地质背景。

2) 锌冶炼场地剖面土壤重金属垂直分布特征表明,Cd 迁移可达 6 m 甚至更深处;通过随机森林模型分析,Cd 的迁移主要受游离氧化铁和粉砂影响;土壤中针铁矿可以通过吸附及自身的迁移影响 Cd 的迁移

特征。

3) 针铁矿携带 Cd 的迁移特征受 pH 值和离子强度影响。淋滤液 pH=6、离子强度 1 mmol/L 时,针铁矿携带 Cd 迁移能力较强。冶炼场地土壤中 Cd 环境风险评价及修复过程中应关注针铁矿对 Cd 迁移的影响。

参考文献:

- [1] WU H Y, YANG F, LI H P, et al. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soil near a smelter in an industrial city in China[J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2020,30(2):174-186.
- [2] Aminiyan M M, Rahman M M, Rodriguez-Seijo A, et al. Elucidating of potentially toxic elements contamination in topsoils around a copper smelter: Spatial distribution, partitioning and risk estimation[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2022,44(6):1795-1811.
- [3] 韦春媛,严青. 金盏菊和龙葵对土壤中镉的耐受性和富集特征研究[J]. *矿冶工程*, 2022,42(3):108-111.
- [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] 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.
- [6] 韩科,李亚轲,翟丽,等. 铅锌冶炼场地不同功能区土壤重金属污染及迁移特征[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2023(1):57-64.
- [7] ZHANG X, YANG H H, CUI Z J. Evaluation and analysis of soil migration and distribution characteristics of heavy metals in iron tailings[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,172:475-480.
- [8] Pontoni L, Hullebusch E D V, Fabbriano M, et al. Assessment of trace heavy metals dynamics during the interaction of aqueous solutions with the artificial OECD soil: Evaluation of the effect of soil organic matter content and colloidal mobilization[J]. *Chemosphere*, 2016,163:382-391.
- [9] ZHAO X, LI Z, TANG W, et al. Competitive kinetics of Ni(II)/Co(II) and Cr(VI)/P(V) adsorption and desorption on goethite: A unified thermodynamically based model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022,423:127028.
- [10] Komarek M, Antelo J, Kralova M, et al. Revisiting models of Cd, Cu, Pb and Zn adsorption onto Fe(III) oxides[J]. *Chemical Geology*, 2018,493:189-198.
- [11] Hokkanen S, Repo E, Lou S, et al. Removal of arsenic(V) by magnetic nanoparticle activated microfibrillated cellulose[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2015,260:886-894.
- [12] YAO Z, WANG D, XU N, et al. Phosphate and humic acid inhibit corrosion of green-synthesized nano-ironparticles to remove Cr(VI) and facilitate their cotransport[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022,450:9-16.
- [13] Kersting A B. Plutonium Transport in the Environment[J]. *Inorganic Chemistry*, 2013,52(7):3533-3546.
- [14] 黄云东,王国栋,梁艳辉. 硫酸锌溶液深度净化处理的技术研究[J]. *山西冶金*, 2023,46(2):42-44.
- [15] LI M, HE L, ZHANG M, et al. Cotransport and deposition of iron oxides with different-sized plastic particles in saturated quartz sand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019,53(7):3547-3557.
- [16] SHENG W, HOU Q, YANG Z, et al. Impacts of periodic salt water inundation on heavy metals in soils from the Pearl River Delta, China[J]. *Marine Environmental Research*, 2023,187:105968.
- [17] Sante M D, Mazzieri F, Pasqualini E. Assessment of the sanitary and environmental risks posed by a contaminated industrial site[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009,171(1-3):524-534.
- [18] WANG D J, JIN Y, Jaisi D P. Effect of Size-Selective Retention on the Cotransport of Hydroxyapatite and Goethite Nanoparticles in Saturated Porous Media[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015,49(14):8461-8470.
- [19] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业科技出版社, 2000.
- [20] WANG W Q, XU D Y, HUANG Q Q, et al. Characteristics of heavy metals in the soil-wheat system of sewage irrigation area and its health risk assessment[J]. *Environmental Chemistry*, 2022,41(10):3231-3243.
- [21] JI Y Q, FENG Y C, WU H H, et al. Using geoaccumulation index to study source profiles of soil dust in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2008,20(5):571-578.
- [22] YANG H R, HUANG K, ZHANG K, et al. Predicting heavy metal adsorption on soil with machine learning and mapping global distribution of soil adsorption capacities[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021,55(20):14316-14328.
- [23] WANG Y Z, DUAN X J, WANG L. Spatial distribution and source analysis of heavy metals in soils influenced by industrial enterprise distribution: Case study in Jiangsu Province[J]. *Science of the Total Environment*, 2020,710:134953.
- [24] 潘佑民,杨国治. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1988.
- [25] QIAO D M, LU H F, ZHANG X X. Change in phytoextraction of Cd by rapeseed (*Brassica napus* L.) with application rate of organic acids and the impact of Cd migration from bulk soil to the rhizosphere[J]. *Environmental Pollution*, 2020,267:115452.
- [26] TIAN Z, PAN Y, CHEN M, et al. The relationships between fractal parameters of soil particle size and heavy-metal content on alluvial-proluvial fan[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2023, 254: 104140.
- [27] Wiriyakitnatekul W, Suddhiprakarn A, Kheoruenromne I, et al. Iron oxides in tropical soils on various parent materials[J]. *Clay Minerals*, 2007,42(4):437-451.
- [28] Kumar S, Dumpala R M R, Chandane A, et al. Elucidation of the sorbent role in sorption thermodynamics of uranium(VI) on goethite[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2022,24(4):567-575.
- [29] YU H Y, LIU C P, ZHU J S, et al. Cadmium availability in rice paddy fields from a mining area: The effects of soil properties highlighting iron fractions and pH value[J]. *Environmental Pollution*, 2016,209:38-45.
- [30] Toor M, Jin B. Adsorption characteristics, isotherm, kinetics, and diffusion of modified natural bentonite for removing diazo dye[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012,187:79-88.

引用本文: 高梓伦,黄驰岳,郭朝晖,等. 锌冶炼场地土壤中针铁矿对镉迁移的影响机制[J]. *矿冶工程*, 2023,43(6):100-106.