

# 德兴铜矿地区土壤的基本特征及其对重金属元素的吸附研究

李子悦, 吴 津, 郝瑞霞

(造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871)

**摘 要:** 本文首先分析了江西德兴铜矿区周围土壤的微量元素和矿物组成特征, 结果显示该地区重金属元素富集, 且表层土中重金属元素含量与粘土矿物相对含量变化具有较好的一致性。室内土柱淋滤实验结果表明, 当总淋滤时间为 451 h 时, 土壤对  $Pb^{2+}$  的总吸附量为 2 584.75 mg/kg, 淋滤实验的前半期存在多种竞争吸附机制, 后半期土壤对  $Pb^{2+}$  的吸附基本达到动态平衡。淋滤后土壤矿物的相对质量分数发生了改变, 粘土矿物有所减少。粘土矿物在不同土壤层对  $Pb^{2+}$  的吸附能力也各异。

**关键词:** 土壤; 矿物; 粘土矿物; 重金属; 铅; 吸附

中图分类号: P618.41; P579

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-1013-09

## A study of basic features and heavy metals adsorption performance of soil in the Dexing copper mine

LI Zi-yue, WU Feng and HAO Rui-xia

(Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China)

**Abstract:** The trace element and mineral characteristics of the soil in the Dexing copper deposit were analyzed in this paper. The analytical results show that the soil is enriched with heavy metals, and the heavy metals and clay minerals show good consistency in top soil. The leaching experimental results of the soil column indicated that, when the leaching time was 451 hours, the adsorption capacity of the soil for  $Pb^{2+}$  was 2 584.75 mg/kg, and the adsorption was unstable during the first half period and then gradually attained equilibrium during the second half period. After leaching, the relative mass fraction of minerals in the soil column changed, and the amount of clay minerals decreased. The adsorption capability of clay minerals for  $Pb^{2+}$  was different in different soil layers.

**Key words:** soil; mineral; clay; heavy metal; lead; adsorption

近年来,随着工农业的迅速发展,我国大部分地区土壤不同程度地出现了重金属污染(陈志良等,2002;白洁等,2008;李丙法等,2012)。土壤中的重金属有多种来源,包括污水灌溉和农药滥施、工业固体废弃物和矿渣的排放以及大气颗粒物的沉降等(赵美微等,2007)。重金属元素在土壤中累积到一定程度,可能会通过被农作物吸收导致食物重金

属含量超标、污染水体导致水质下降等途径对人类产生危害(李选统等,2011)。因此,研究重金属在土壤中的分布特征、吸附和迁移规律,对防治和修复土壤重金属污染都具有非常重要的意义。以往有大量研究利用简单吸附实验,探讨了不同 pH 值、粒级、土壤类型等对土壤吸附重金属的影响(杨崇洁,1989;余国营等,1997;林青,2008;王岚等,2009;王朴等,

收稿日期: 2013-09-02; 修订日期: 2013-10-12

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目(41230103); 国家地调资助项目(1212011120284)

作者简介: 李子悦(1990-),女,汉族,本科生,地球化学专业,现于美国加州大学戴维斯分校攻读硕士学位;通讯作者: 郝瑞霞(1966-),女,汉族,副教授,主要从事微生物地球化学的教学与研究工作, E-mail: rxhao@pku.edu.cn.

2009;郑顺安,2010),以及不同矿物(吴大清等,1997)尤其是粘土矿物对重金属元素的吸附容量(何宏平等,2001;刘伟,2009;孙慧敏,2010;李艳梅等,2011)。但简单吸附实验在反映具有异质性和复杂性的土壤介质吸附特性时存在局限性(杨金燕等,2005)。本文探讨了在真实的自然环境下,矿区土壤重金属元素的吸附规律,并且通过天然土柱室内淋滤实验模拟含有高浓度 Pb 的废水持续排入土壤的情况,研究土壤对 Pb 的动态吸附规律,同时分析了粘土矿物在其中可能起到的作用。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土壤

本研究所用土壤采自江西省上饶德兴市德兴铜矿采矿场周边地区。土壤样品的采集在 5 个不同的地点进行,如图 1 所示。5 个采样点的具体描述与土壤基本情况如表 1 所示。ZJC 和 DWH-GK 位于大坞河流域,受到矿厂排出的酸性废水影响严重。WKB 和 WKB-MS 则受到尾矿坝渗出的弱碱性水的

影响。海口镇离矿厂和尾矿坝都相对较远。每个点都用土样采集器采集 3~4 个土柱。由于各个地段的土壤湿度、疏松程度各不相同,因此采集的土壤深度有所差异,在 41~45 cm 左右。采集后手工挑出其中的草根、砾石等杂物,然后用塑料膜包好密封进行避光保存,使其保持原有状态。

### 1.2 土壤微量元素与物相分析

#### 1.2.1 样品预处理

从 5 个采样点的土柱 0、10、20、30、40 cm 深度处各取出约 5 g 土壤,然后分别装入纸袋,在烘箱中干燥。经干燥后,去除样品中植物碎片、砾石等物质,用玛瑙研钵磨细,过 200 目尼龙网筛,装入样品袋中待测。

#### 1.2.2 分析方法

用 ICP-MS 分析土壤的微量元素,标液使用国家标准样品 GSS-7。用 Excel 处理数据。用 XRD 进行物相分析,测试条件为 Cu-K $\alpha$  靶辐射,电压 40 kV,电流 100 mA,扫描范围在 3°~70°之间,扫描速度为 4°/min,步宽为 0.02°,发散狭缝为 1,接收狭缝为 0.3。数据用 MDI Jade5.0 软件生成衍射图谱,鉴

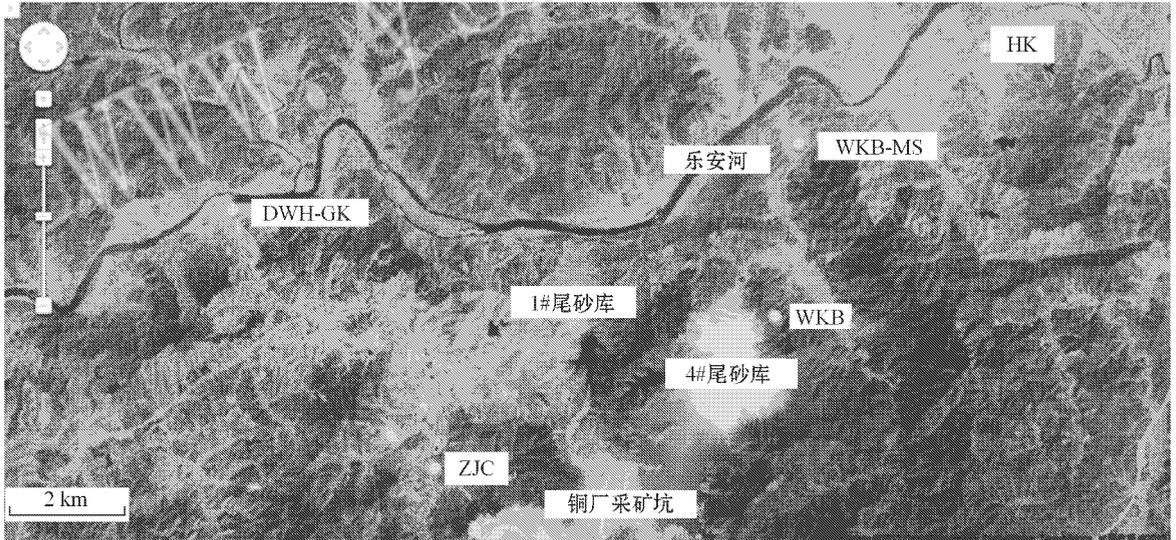


图 1 德兴铜矿区采样点示意图(摘自 Google 卫星地图)

Fig. 1 Sampling sites in the Dexing copper ore district (screenshot from Google satellite map)

表 1 德兴铜矿地区采集土壤基本情况  
Table 1 Basic information of the collected soils

样品编号	采样点	地点描述	土壤颜色	土壤类型
ZJC-1/2/3	祝家村	大坞河上游	黄棕色	红壤土
DWH-GK-1/2/3	大坞河-沽口	河岸	黄-黄棕色	红壤土
WKB-1/2/3	4#尾矿坝上游	油菜田	黄棕色	稻米土
WKB-MS-1/2/3/4	4#尾矿坝-庙山	河岸	深棕色	红壤土
LAJ-HK-1/2/3	海口镇	公路旁油菜田	浅-深黄棕色	稻米土

定物相,并采用 RIR 方法计算各物相的质量分数。

### 1.3 土柱铅液淋滤实验

#### 1.3.1 土柱

淋滤实验选取了编号为 LAJ-HK-2 的原始天然土柱进行。土柱直径 5 cm 左右,原长 41.1 cm,但由于实验装置要求,分别切除了土柱上部和下部一部分,最终长 39.0 cm。土壤上疏下密,颜色从上至下呈均匀的棕黄色,干湿程度居中。

#### 1.3.2 实验装置

利用自主设计的装置进行淋滤实验,图 2 为装置示意图。空气压缩机以一定气压产生的空气通过稳压装置后进入供液装置,将 4 mM  $Pb(NO_3)_2$  溶液压出瓶中,以一定的流速滴加入土柱。流速基本控制在  $1.0 \pm 0.3$  mL/min。按照一定的时间间隔用微量滴定管对出流液进行滴定并测定出流流速。出流液未经过其他处理,取 3 份平行样进行滴定。滴定剂为 0.4 mM 的 EDTA,指示剂为二甲酚橙。滴定前在溶

液中加入缓冲液使 pH 值稳定在 5~6 之间,保证滴定结果准确。三次滴定值的标准差在 0.05 以下。

#### 1.3.3 实验步骤

持续向土柱中滴加铅液。当出流液 Pb 浓度与输入液 Pb 浓度相差不超过 5% 时,认为土壤对铅的吸附达到动态饱和,停止实验。根据每次采集的出流液浓度和出流液流速计算得到吸附量和吸附率。将出流液浓度作为平衡液浓度进行 Langmuir、Freundlich 和 Temkin 吸附等温曲线的拟合。

当 Pb 达到饱和以后,取下土柱,分别在 0、10、20、30、40 cm 处(由于实验用的土柱顶部和底部分别被切除了一部分,实际淋滤后的取样深度相当于原始土柱的 1、10、20、30、40 cm 处)取 2~3 g 土壤,装入样品袋中,在烘箱中干燥 1~2 天。经干燥后,去除样品中植物碎片、砾石等物质,用玛瑙研钵磨细,过 200 目尼龙网筛,立即进行 XRD 分析。XRD 测试条件同 1.2.2。

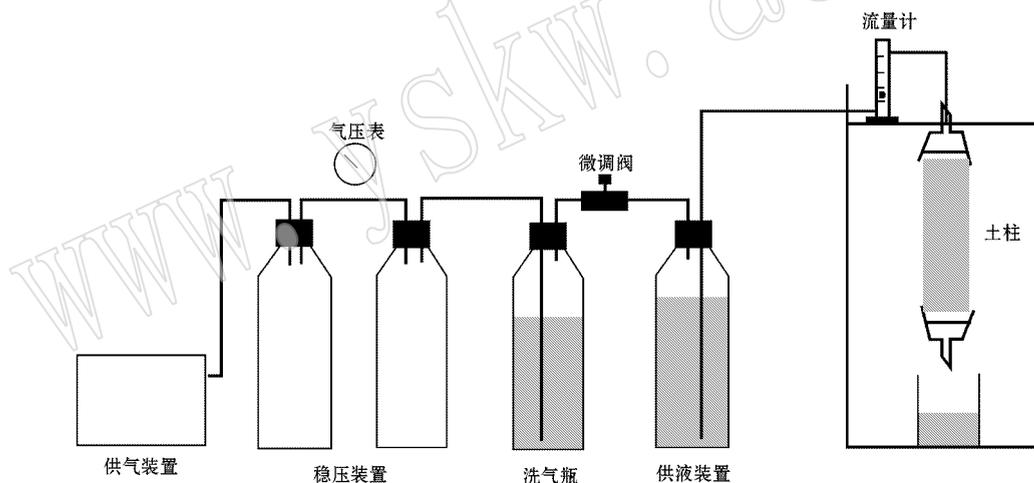


图 2 室内土柱铅液淋滤实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the equipment for soil column leaching experiment

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属元素含量与分布

利用 ICP-MS 一共测定了 39 种微量元素的含量,其中重点探讨了 V、Co、Pb、Mn、Ni 和 Cu 6 种重金属元素。由表 2 可知,几乎每个采样点的 6 种重金属元素都超过了江西省土壤背景值,说明重金属元素在德兴铜矿区相对富集。重金属元素横向分布分析结果显示,大均河流域的重金属含量整体最高,尤其 Cu 的污染在 ZJC 和 DWH-GK 十分突出。这是

由于铜矿采矿场的废水一方面大量排入大均河中,通过河水的侧渗作用进入土壤并被吸附固定,另一方面直接渗入矿厂周围的土壤中造成土壤的重金属元素富集。因此位于大均河上游,即离含高浓度重金属废水排放源最近的祝家村土壤中 Cu 的含量最高。

重金属元素垂向分布分析结果(表 3)显示,不同采样点的重金属元素随深度增加,其含量变化不存在统一的规律性,并不像我们以往认识的在表层最为富集,说明该区重金属的来源不完全是表土受到的淋滤作用和大气沉降作用。在 WKB 采样点,发现

表 2 各个采样点重金属元素平均含量与江西省土壤背景值比较

mg/kg

Table 2 Average content of heavy metals in each sample location and their comparison with the background values of Jiangxi Province

采样位置	V	Mn	Co	Ni	Cu	Pb
WKB	105.01	776.61	16.91	1 697.08	63.78	50.43
WKB-MS	119.26	722.20	19.06	1 175.64	68.56	34.92
ZJC	107.40	709.39	20.60	1 852.56	669.62	74.77
HK	102.08	1 408.29	15.54	2 907.58	31.84	54.57
DWH-GK	123.55	190.68*	7.15*	512.40	411.96	62.91
江西省背景值	83.40	259.00	9.75	19.00	20.80	32.10

注：\*表示没有超过背景值。

表 3 各个采样点重金属元素含量垂向分布

mg/kg

Table 3 Vertical distributions of heavy metals in each sampling site

采样位置	深度/cm	V	Mn	Co	Ni	Cu	Pb
DWH-GK	0	131.78	186.06	6.62	51.19	446.69	98.55
	10	119.67	169.74	5.63	72.75	322.64	63.01
	20	118.87	141.69	6.64	1 881.04	621.58	64.52
	30	123.90	265.22	9.70	44.61	256.94	25.55
ZJC	0	107.44	595.10	18.58	150.61	484.01	78.32
	10	74.09	397.45	13.72	6 943.60	398.30	68.30
	20	96.93	509.49	16.03	80.04	1 539.94	75.16
	30	121.16	870.22	22.82	48.63	659.79	90.60
WKB	40	137.38	1 174.70	31.88	2 039.93	266.05	61.47
	0	118.52	388.24	16.43	3 694.52	72.58	46.68
	10	122.87	334.62	16.21	2 314.82	144.61	43.25
	20	113.27	506.28	18.22	68.41	39.82	37.19
WKB-MS	30	53.46	1 564.56	12.31	37.42	22.44	15.75
	40	116.91	1 089.36	21.37	2 370.21	39.44	109.26
	0	114.44	736.25	17.84	55.12	106.06	31.94
	10	119.29	513.34	17.02	1 185.47	86.75	40.10
HK	20	116.40	374.51	17.95	1 304.15	68.29	39.56
	30	121.86	1 027.27	22.02	3 273.88	42.44	35.98
	40	124.30	959.64	20.45	59.60	39.26	27.02
	0	99.50	307.41	13.87	14 336.03	33.32	54.81
总平均含量	10	101.85	479.83	11.55	51.57	34.30	104.09
	20	93.61	2 084.10	23.19	53.08	27.91	38.61
	30	91.17	1 291.96	11.44	48.98	29.07	42.77
	40	124.26	2 878.14	17.63	48.23	34.61	32.57
总平均含量		110.96	785.22	16.21	1 675.58	242.37	55.21

V、Cu、Pb、Co 的含量有着相似的变化趋势,都在 30 cm 深处出现谷值。这可能与植物作物的根系在 30 cm 处比较发达从而吸收了土壤中大量的重金属元素有关。另外,该采样点 Cu 和 Mn 含量与深度的变化呈现出反相关关系。由于 Cu 和 Mn 都是生物必需的微量元素,它们的变化与生物体以及有机质有着密切的关系。因此 Cu 和 Mn 在油菜地土壤中呈现一定的反相关关系,可能和植物对这两种元素的竞争吸附有关。这说明土壤中的有机组分对重金属吸附有着重要作用。

## 2.2 土壤矿物组成与重金属元素的关系

XRD 分析结果表明,德兴铜矿区土壤主要由石英(55.4%)和伊利石(31.9%)组成,其余为少量的钾长石(1.0%)、斜长石(4.8%)、黄铁矿(0.1%)、针铁矿(0.3%)、石膏(0.1%)、高岭石(6.7%)和绿泥石(1.7%)。总粘土矿物平均含量达到 39.4%。5 个采样点的物相组成比较稳定,只是矿物的相对含量有所变化。图 3 显示各采样点的土壤都主要由石英和粘土矿物组成。其中 DWH-GK 和 ZJC(大均河流域)以及 WKB-MS 的石英和总粘土矿物含量大致相同。WKB 的石英含量高于上述 3 个采样点,为 58.6%。而 HK 的石英含量最高,达到 67.4%。

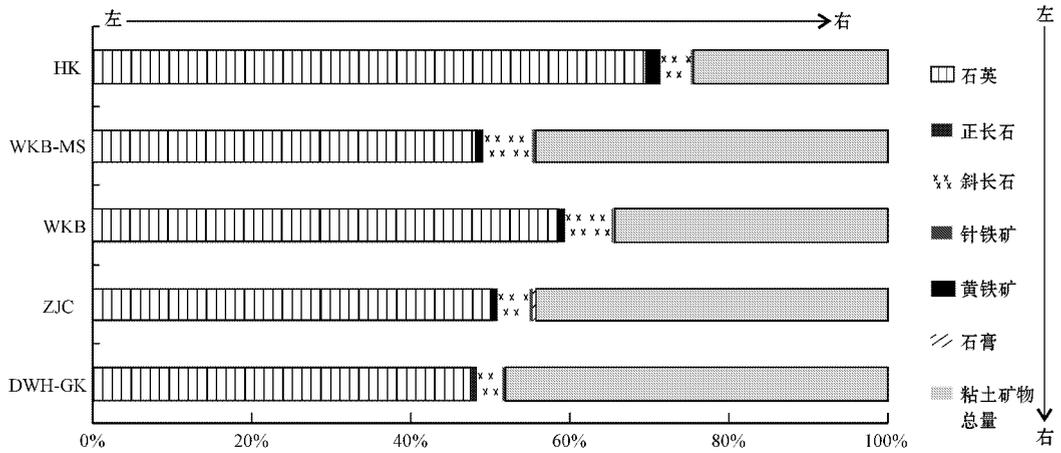


图 3 德兴铜矿地区土壤矿物组成空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of mineral composition of the soils

对 5 个采样点不同深度重金属含量和粘土矿物相对含量的变化进行了综合分析,如图 4 所示。总体来看,在土壤表层 0~10 cm 处,粘土矿物相对含量与各重金属元素含量的变化规律具有较好的一致

性,而更深层土壤则变化复杂,没有统一的规律性。变化趋势一致说明粘土矿物对重金属吸附起到了重要作用,即粘土矿物很少的时候不利于重金属元素的吸附,而高含量的粘土矿物有利于促进土壤对重

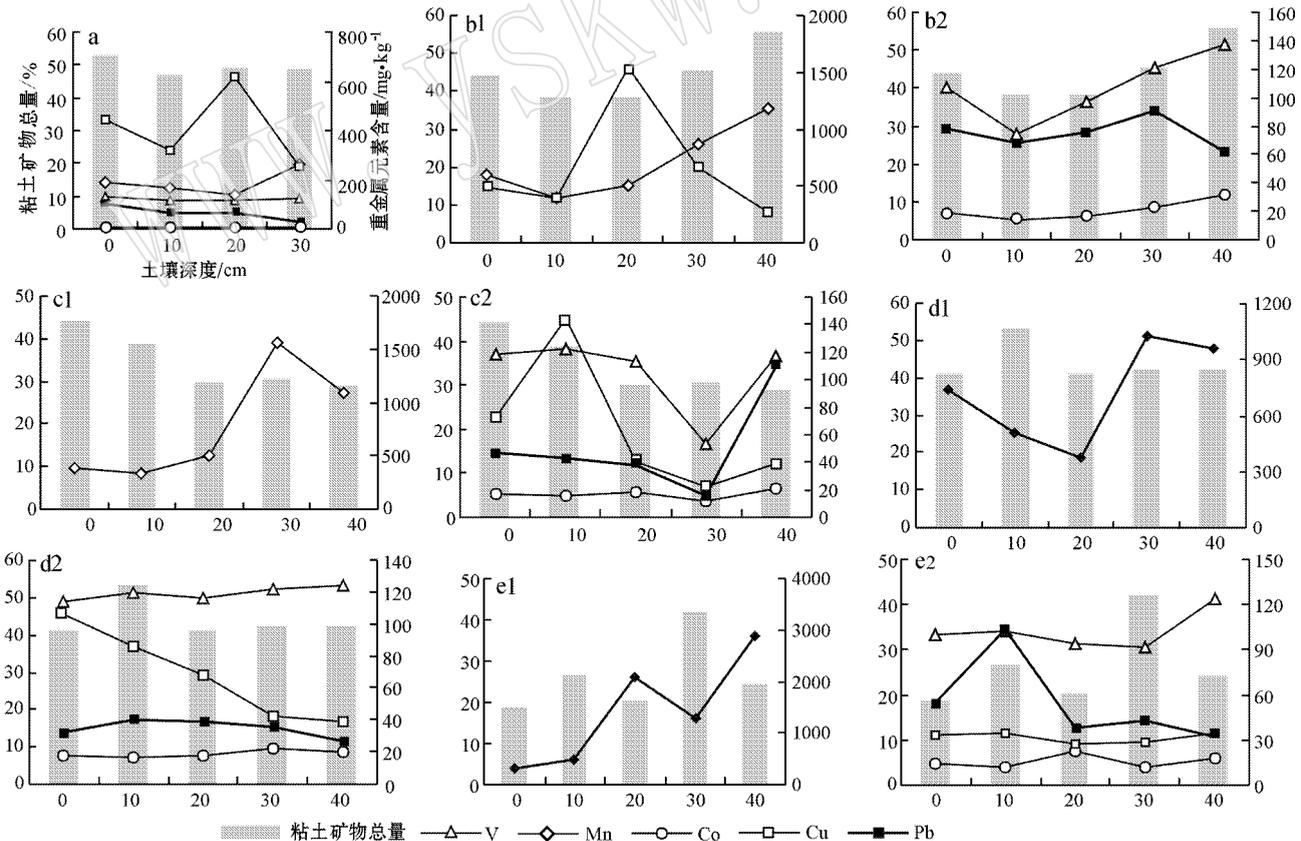


图 4 德兴铜矿地区土壤中金属元素含量与粘土矿物相对含量垂向分布图

Fig. 4 Vertical distributions of heavy metals and clay minerals in 5 sampling sites

a—DWH-GK ; b—ZJC ; c—WKB ; d—WKB-MS ; e—HK

金属元素的吸附。但是更深层土壤没有呈现规律性,这可能是由深层的土壤结构更加复杂,影响因素更加多元化造成的。另外,在 5 个重金属元素中,Pb 的含量变化与粘土矿物相对含量变化具有最好的一致性,如图 4 中黑线所示。这说明粘土矿物是影响该区土壤,尤其表层土壤吸附 Pb 的主要因素。

## 2.3 土柱淋滤实验

### 2.3.1 Pb 的动态吸附

当总淋滤时间为 451 h 时,出流液 Pb 浓度与输入液 Pb 浓度的比值  $c/c_0$  达到 0.93,总吸附量为 2 584.75 mg/kg,总吸附率为 32%,Pb 在土柱中未达到完全饱和。

图 5 显示了整个淋滤过程中出流液浓度的变化。根据变化速率的快慢可以将整个过程分为 6 个小阶段。出流液的浓度直接反映了土壤对铅的动态吸附能力,浓度低说明吸附能力很高,浓度上升说明吸附能力下降。出流液浓度的变化曲折上升,并且低浓度反复出现,说明土壤对铅的吸附能力决定于很多种不同的因素,它们之间存在竞争吸附和优先作用。

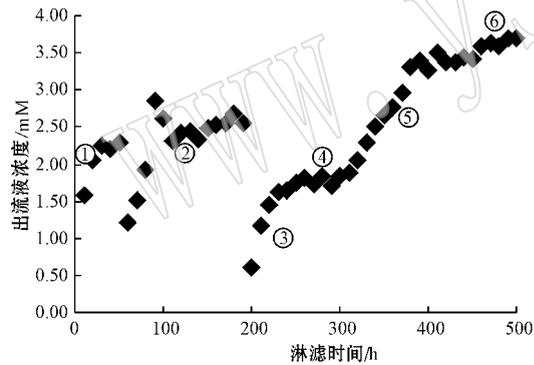


图 5 出流液 Pb 浓度随累积淋滤时间的变化

Fig. 5 Temporal variation of Pb concentrations in the outflow solution

将图 5 所示的淋滤过程分别进行了③~⑥整个阶段和③④、⑤⑥分阶段的拟合。拟合参数见表 4。分阶段拟合结果如图 6 所示。结果显示,分阶段拟合后 Langmuir 方程和 Freundlich 方程对阶段⑤⑥的拟合程度均有很大提高, Temkin 方程对阶段⑤⑥拟合的相关系数也达到显著水平。而 3 种方程对阶段③④的拟合普遍较差。这表明在淋滤的前半期,土壤中多种吸附剂和吸附机制存在着竞争关系,无法达到动态平衡,因此出流液浓度不能很好的代表平衡液浓度。而在淋滤实验的后半期(累积淋滤时间

达到 211 h 以后),土壤对于铅的吸附基本达到了动态平衡的状态,土壤中已经形成了较为稳定的吸附模式。这进一步反映了土壤的复杂性。

表 4 不同吸附等温方程的拟合特征  
Table 4 Fitting characteristics of different Pb adsorption isotherms

阶段	样品数	Langmuir 方程		Freundlich 方程	Temkin 方程
		$Q_0^a/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$r^b$	$r$	$r$
③④	11	- <sup>c</sup>	0.382 5	0.844 3	0.728 6
⑤⑥	20	10 000	0.817 9	0.973 0	0.958 1
③~⑥	31	-	0.538 9	0.948 5	0.972 7

注:<sup>a</sup> $Q_0$  为最大吸附量,<sup>b</sup> $r$  代表相关系数,<sup>c</sup>表示计算得到负值。

### 2.3.2 土柱淋滤前后矿物组成变化

淋滤前后的不同深度土壤衍射图中出峰位置上非常一致,主要的矿物仍然为石英和伊利石,淋滤后并没有新的矿物生成。但是前后峰的峰强有所变化,说明各物相的相对质量分数发生了改变。

从图 7 可以看出,淋滤后总粘土矿物和石英的相对含量曲线趋于直线,垂向上的波动与变化幅度减小,说明淋滤后土壤中矿物比例在垂向上趋向均匀化。这可能是由于外源铅溶液的持续淋滤作用导致土壤中的矿物经历化学溶蚀作用,在吸附铅的同时,矿物表面发生破碎形成胶体并随着流动相迁移。土壤中石英和粘土矿物是主要组成部分,因此两者的相对含量在垂向上呈现出镜像的变化关系。比较淋滤前后两者比例发现,淋滤后石英的相对含量增加,相应的粘土矿物总含量减小。尤其在 30 cm 处,两者的变化十分明显。吴大清等(1997)曾研究了不同矿物对金属离子的竞争吸附,结果表明在近中性低离子强度溶液中,矿物单位表面积吸附金属离子数的大小顺序是  $\text{CaCO}_3 > \text{石英} > \text{水云母} > \text{高岭土} > \text{蒙脱石} > \text{针铁矿} > \text{三水铝矿}$ 。根据这个结果,考虑到淋滤实验用的土柱中石英含量远远高于粘土矿物,那么石英的质量分数在淋滤后增加可能是石英吸附了大量的 Pb 所致。也许石英表面本来吸附有大量的负电荷或是络合离子使 Pb 离子很容易在其表面转化为沉淀形态。

进一步观察淋滤实验前后土柱中伊利石、高岭石和绿泥石在粘土矿物中所占比例的变化(如图 8)发现,淋滤后的土柱中伊利石-高岭石的比值发生了明显的变化。在 0~10 cm 的深度,该比值增加,而在 20~40 cm 深度,该比值大大减小。这说明在表层

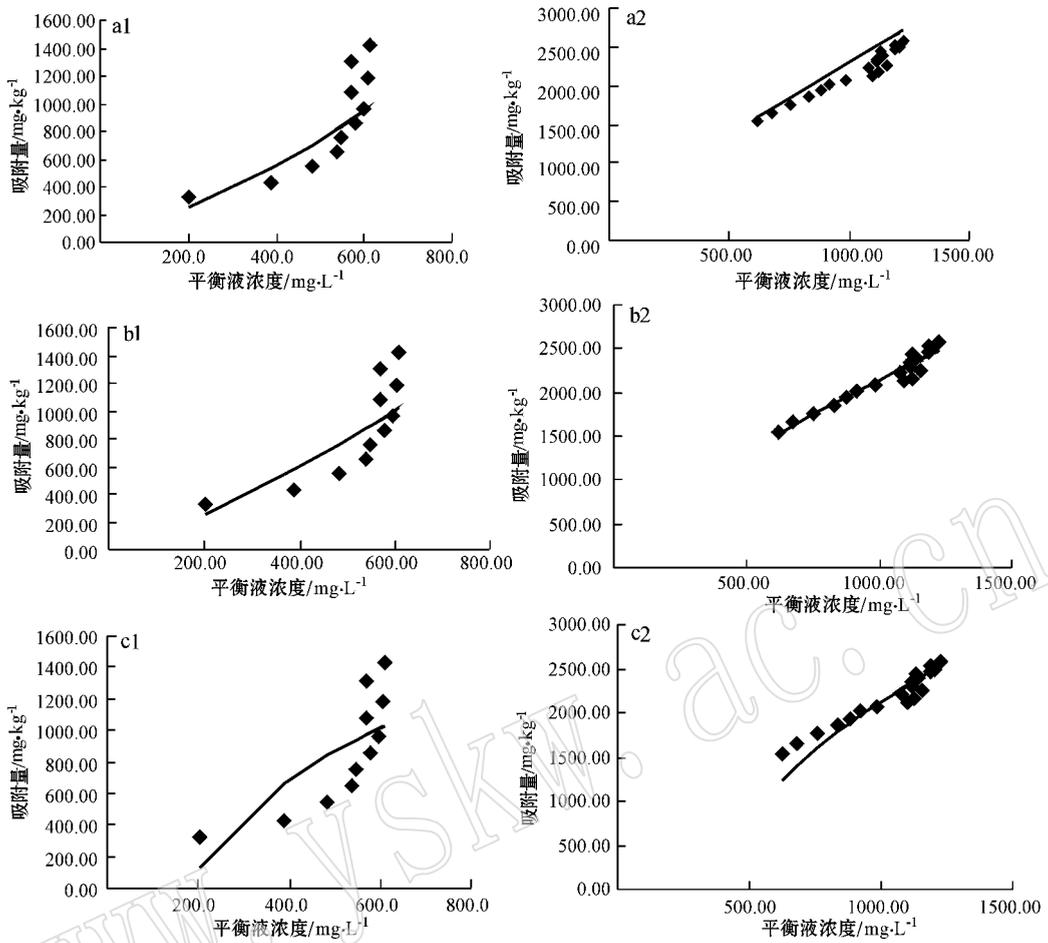


图 6 分阶段等温吸附曲线拟合(点为实测值,线为拟合值)

Fig. 6 Pb adsorption isotherms for two periods (dots for experimental data, lines for calculated data)  
a—Langmuir 模型; b—Freundlich 模型; c—Temkin 模型; 1、2 分别代表阶段③④和阶段⑤⑥  
a—Langmuir; b—Freundlich; c—Temkin; 1, 2 represent period ③④ and period ⑤⑥, respectively

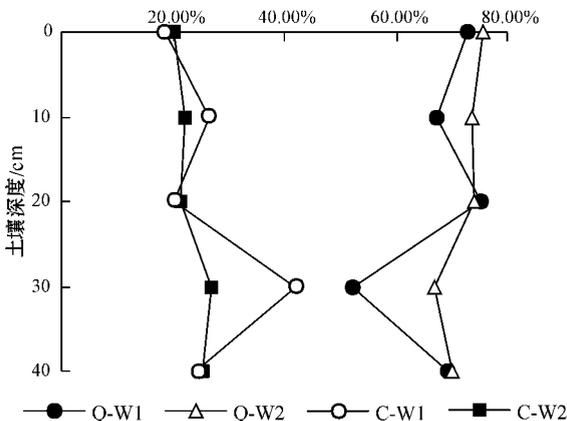


图 7 铅液淋滤实验前后土柱不同深度石英和总粘土矿物相对含量变化

Fig. 7 Variations of relative concentrations of quartz and clay minerals in different depths before and after the soil column experiment  
Q—石英; C—粘土矿物; W1—淋滤前; W2—淋滤后  
Q—quartz; C—clay minerals; W1—before the leaching experiment; W2—after the leaching experiment

土壤中伊利石对铅的吸附贡献率更大,而在稍深一些的土壤中,高岭石的贡献率更大。这是土壤上疏下密的性质、伊利石和高岭石不同结构所导致的吸附率差异以及各粘土矿物对 Pb 吸附的选择性大小共同作用的结果。

### 3 结论

(1) 德兴铜矿区周围土壤的重金属含量都高于背景值,其中 V 轻微富集,Co 和 Pb 中度富集, Mn、Ni 和 Cu 十分富集。土壤中的主要矿物是石英和粘土矿物。在表层土壤中粘土矿物与重金属元素的变化规律具有较好的一致性。

(2) 室内土柱淋滤实验总淋滤时间为 451 小时,最终出流液 Pb 浓度与输入液 Pb 浓度的比值  $c/c_0$  达到 0.93,总吸附量为 2584.75 mg/kg,铅在土柱中

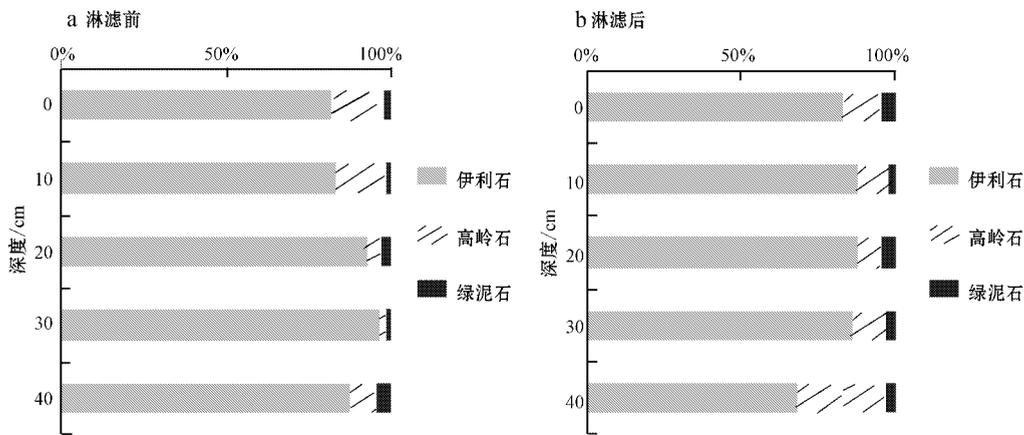


图 8 铅液淋滤实验前后土柱不同深度粘土矿物组成比例变化对比

Fig. 8 A comparison between the proportions of different clay minerals in the soils before and after the soil column experiment

未达到完全穿透。吸附等温曲线拟合结果显示淋滤实验的前半期存在多种机制竞争吸附,而后半期土壤对于铅的吸附基本达到动态平衡。

(3) 经过铅液淋滤后的土柱没有新的矿物生成,只是各物相的相对质量分数发生了改变,石英的相对含量增加,粘土矿物相对含量减小。淋滤后的土柱中伊利石-高岭石的比值发生了明显的变化。该比值在 0~10 cm 的深度增加,而在 20~40 cm 深度大大减小。

## References

- Bai Jie, Sun Xuekai and Wang Daohan. 2008. Heavy metal pollution in soil and technology of phytoremediation[J]. *Environmental Protection and Circular Economy, Ecological Environment*, (3): 49~51 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhiliang, Qiu Rongliang, Zhang Jingshu, et al. 2002. Removed technology of heavy metal pollution in soil[J]. *Environmental Protection, Engineering and Technology*, 29(6): 21~23 (in Chinese).
- He Hongping, Guo Jiugao, Zhu Jiayi, et al. 2001. An experimental study of adsorption capacity of montmorillonite, kaolinite and illite for heavy metals[J]. *Acta Petrological et Mineralogica*, 20(4): 573~578 (in Chinese with English abstract).
- Li Bingfa and Liu Yang. 2012. Technology on remediation of soils contaminated by heavy metals[J]. *Science and Technology Information*, (1): 105~106 (in Chinese with English abstract).
- Li Xuantong, Lu Weisheng, Li Qian, et al. 2011. The remediation of heavy metal pollution in soil[J]. (24): 295~297 (in Chinese with English abstract).
- Li Yanmei, Ren Xiaoli, Du Yunyun, et al. 2011. Study on the adsorp-

tion of heavy metals with clay[J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 17(2): 34~37 (in Chinese with English abstract).

Lin Qing. 2008. Experimental studies of adsorption and transport of heavy metals Cu, Cd, Zn and Pb in soil[D]. Qingdao University (in Chinese with English abstract).

Liu Wei. 2009. A preliminary study on remediation of heavy metal contaminated soil using natural bentonite[D]. South China University of Technology (in Chinese with English abstract).

Pan Fangming. 2012. Research progress of heavy metal treatment using clay mineral[J]. *Science & Technology Association Forum*, (8): 116~117 (in Chinese).

Sun Huimin. 2010. Study of effect of clay mineral colloid on the environmental behavior of Pb[D]. Northwest Agricultural & Forestry University (in Chinese with English abstract).

Wang Lan, Wang Yaping, Xu Chunxue, et al. 2009. Adsorption characteristics of cadmium, lead and mercury in different sized soils[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 28(2): 119~124 (in Chinese with English abstract).

Wang Pu, Hu Hongqing, Ding Shaoquan, et al. 2009. Study of adsorption of Pb in two types of soil[J]. *Gardening Technology*, (1): 32~35 (in Chinese).

Wu Daqing, Diao Guiyi and Peng Jinlian. 1997. Experiment on the competition adsorption of metal ions onto mineral[J]. *Geochemica*, 26(6): 25~32 (in Chinese with English abstract).

Yang Chongjie. 1989. Transport and transformation of some heavy metals in soil and research of their adsorption mechanism[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 10(3): 2~8 (in Chinese with English abstract).

Yang Jinyan, Yang Xiao'e, He Zhenli, et al. 2005. Advance in the studies of Pb adsorption and desorption in soils[J]. *Ecology and Environment*, 14(1): 102~107 (in Chinese with English abstract).

- Yu Guoying and Wu Yanyu. 1997. Effects of heavy metals joint action on their characteristic of sorption and desorption in brown soil[ J ]. Environmental Chemistry , 16( 1 ): 31 ~ 36( in Chinese with English abstract ).
- Zhao Meiwei, Ta Li and Li Ping. 2007. Research on heavy metal pollution to soil and countermeasures on prevention and restoration[ J ]. Environmental Science and Management , 32( 6 ): 70 ~ 72 in Chinese with English abstract ).
- Zheng Shun 'an. 2010. Studies on the transformation and transport of heavy metals in typical Chinese agricultural soils[ D ]. Zhejiang University( in Chinese with English abstract ).
- 李艳梅,任晓莉,杜云云,等. 2011. 粘土矿物吸附重金属的研究[ J ]. 天津农业科学, 17( 2 ): 34 ~ 37.
- 林青. 2008. 土壤中重金属 Cu、Cd、Zn、Pb 吸附及迁移的实验研究[ D ]. 青岛大学.
- 刘伟. 2009. 四种粘土矿物对  $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  污染废水和土壤的修复效果研究[ D ]. 华南理工大学.
- 潘方明. 2012. 粘土矿物处理重金属的研究进展[ J ]. 科协论坛, ( 8 ): 116 ~ 117.
- 孙慧敏. 2010. 粘土矿物胶体对铅的环境行为影响研究[ D ]. 西北农林科技大学.
- 王岗,王亚平,许春雪,等. 2009. 不同粒级土壤中镉铅汞的吸附特性[ J ]. 岩矿测试, 28( 2 ): 119 ~ 124.
- 王朴,胡红青,丁绍全,等. 2009. 两种土壤对 Pb 的吸附研究[ J ]. 园林科技, ( 1 ): 32 ~ 35.
- 吴大清,刁桂仪,彭金莲. 1997. 矿物对金属离子的竞争吸附实验研究[ J ]. 地球化学, 26( 6 ): 25 ~ 32.
- 杨崇洁. 1989. 几种金属元素进入土壤后的迁移转化规律及吸附机理的研究[ J ]. 环境科学, 10( 3 ): 2 ~ 8.
- 杨金燕,杨肖娥,何振立,等. 2005. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展[ J ]. 生态环境, 14( 1 ): 102 ~ 107.
- 余国营,吴燕玉. 1997. 土壤环境中重金属元素的相互作用及其对吸附特性的影响[ J ]. 环境化学, 16( 1 ): 31 ~ 36.
- 赵美微,塔莉,李萍. 2007. 土壤重金属污染及其预防、修复研究[ J ]. 环境科学与管理, 32( 6 ): 70 ~ 72.
- 郑顺安. 2010. 我国典型农田土壤中重金属的转化与迁移特征研究[ D ]. 浙江大学.
- ### 附中文参考文献
- 白洁,孙学凯,王道涵. 2008. 土壤重金属污染及植物修复技术综述[ J ]. 环境保护与循环经济, 生态环境, ( 3 ): 49 ~ 51.
- 陈志良,仇荣亮,张景书,等. 2002. 重金属污染土壤的修复技术[ J ]. 环境保护, 29( 6 ): 21 ~ 23.
- 何宏平,郭九皋,朱建喜,等. 2001. 蒙脱石、高岭石、伊利石对重金属离子吸附容量的实验研究[ J ]. 岩石矿物学杂志, 20( 4 ): 573 ~ 578.
- 李丙法,刘洋. 2012. 重金属污染土壤的修复技术研究[ J ]. 科技信息, ( 1 ): 105 ~ 106.
- 李选统,卢维盛,李谦,等. 2011. 土壤重金属污染的修复[ J ]. 资源与环境科学, 现代农业科技, ( 24 ): 295 ~ 297.