

文章编号: 0254-5357(2007)06-0455-05

## 土壤中铅铜锌镉的吸附特性

李玉萍<sup>1</sup>, 刘晓端<sup>2\*</sup>, 宫辉力<sup>1</sup>

(1. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037;

2. 国家地质实验测试中心, 北京 100037)

**摘要:**以徐州王庄矿(WZK)、奎河(KH)、背景-1(BG-1)和背景-2(BG-2)等4个土壤样品为供试对象,加入不同浓度梯度的铅、铜、锌、镉离子,通过静态实验研究了铅、铜、锌、镉的吸附特性。结果表明,土壤对4个重金属的吸附量与加入到土壤中的重金属离子浓度呈正相关性,它们之间大部分满足线性相关关系。在4个土壤样品中加入铅、铜、锌、镉离子的初始浓度比为10:10:10:1时,平衡浓度为 $C_{Zn} > C_{Cu} > C_{Pb} > C_{Cd}$ ,吸附量为 $S_{Cd} > S_{Pb} > S_{Cu} > S_{Zn}$ 。4个土壤样品对铅、铜、锌、镉离子的吸附能力依次为 $WZK > KH > BG-2 > BG-1$ 。在所选实验条件下,土壤对铅、铜、锌、镉的吸附能力受土壤中铅、铜、锌、镉的含量、土壤有机质含量、阳离子交换量、土壤饱和含水量和土壤的pH值影响较大。

**关键词:**铅;铜;锌;镉;静态吸附;土壤

中图分类号:S151.93;O647.32

文献标识码:A

## Adsorption Characteristics of Soils for Lead, Copper, Zinc and Cadmium

Li Yu-ping<sup>1</sup>, Liu Xiao-Duan<sup>2\*</sup>, Gong Hui-li<sup>1</sup>

(1. College of Resources, Environment & Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China;

2. National Research Center for Geoanalysis, Beijing 100037, China)

**Abstract:** Four kinds of soils, namely KH (rice-growing soil from coal mining area), WZK (vegetable soil from polluted irrigation area), BG-1 (background for vegetable soil) and BG-2 (background for rice-growing soil) were collected from Xuzhou city for this adsorption experiment. The heavy metals of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  with concentration ratios of 10:10:10:1 in different concentration gradients were added to the soils to study the static adsorption characteristics for these heavy metals. The results show that the adsorption capacity of these 4 kinds of soils for  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  is in the order of  $WZK > KH > BG-2 > BG-1$ . And the results also indicate that adsorption of Pb, Cu, Zn, Cd by the soils are greatly affected by the factors of Pb, Cu, Zn, Cd and organic matter contents in soils, cation change capacity of the soils, saturation moisture contents of soils and soil pH values.

**Key words:** lead; copper; zinc; cadmium; static adsorption; soil

重金属在土壤中的化学行为研究近十几年来格外受到人们的关注<sup>[1-10]</sup>。化学物质中的重金属进入土壤中所经历的化学反应主要是吸附和解吸、

络合和螯合以及沉淀和溶解,在诸多反应中,重金属的吸附反应是影响土壤污染的重要化学行为之一。本文选择了具有代表性和普遍性的重金属元

收稿日期:2007-02-15;修订日期:2007-06-22

基金项目:国土资源地质大调查项目资助——城市环境地球化学调查方法技术与污染影响机理研究(200320130004)

作者简介:李玉萍(1977-),女,山东青州人,硕士,环境科学专业。

通讯作者:刘晓端(1951-),女,北京市人,研究员,从事环境地球化学研究工作。E-mail:liuxiaoduan@sina.com。

素 Pb、Cu、Zn、Cd,研究了徐州水稻土和菜园土中这四种重金属的吸附行为,为该地区 Pb、Cu、Zn、Cd 污染的修复和治理提供了依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试土壤及其物理化学性质

供试土壤为徐州奎河灌区的菜园土(KH),王庄煤矿(WZK)附近、受矸石山淋滤影响较严重的水稻土,以及在远离城区采集的西北郊区受污染相对较少的背景菜园土(BG-1)和 水稻土(BG-2) 取样深度 0~20 cm。土样自然风干后通过 0.84 mm(20 目)筛备用<sup>[1]</sup>。取 1 kg 土样用电动振荡机振动 10 min 后称重、测定土样中土壤粒度 <0.098 mm 所占的比例。同时测定了这 4 个土样的理化性质,包括 Pb、Cu、Zn、Cd 的全量,土壤酸碱度(pH),土壤容重,有机质、阳离子交换量(CEC)以及土壤的饱和含水量( $w_{饱}$ ) 结果见表 1。

表 1 土壤样品的物理化学性质

Table 1 The physical-chemical properties of soil samples

土壤样品	土壤容重 (g/cm <sup>3</sup> )	pH	$w_{有机质}$ (%)	CEC (cmol/kg)	$w_{饱}$ (mL/kg)	粒度 比例 <sup>①</sup>					
						Pb	Cu	Zn	Cd	Mn	
KH	1.15	8.16	2.62	9.57	428.20	63.73	39.2	26.5	95.8	0.25	592
BG-1	1.27	8.35	1.31	7.97	385.97	64.17	26.9	24.4	63	0.21	580
WZK	1.16	7.58	3.09	9.74	527.85	39.33	293	36.1	103	0.6	483
BG-2	1.32	8.08	1.97	7.95	400.58	44.17	30.1	23	67.5	0.27	524

① 土壤粒度 <0.098 mm 所占的比例(%)。

### 1.2 实验装置和仪器

吸附实验装置如图 1 所示,主要由玻璃土柱、接样瓶和压力泵三部分组成。样品分析仪器和装置:电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)、电感耦合等离子体光谱仪(ICP-AES)、8411 型电动振荡机 80-2 型离心机。

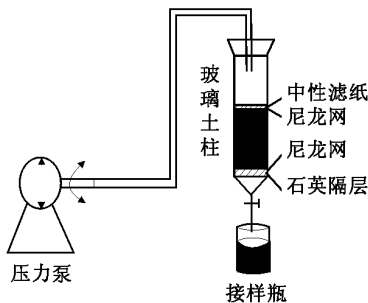


图 1 土壤重金属吸附试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of adsorption test for heavy metal elements in soils

### 1.3 工作溶液的配制

准确称取不同量的 Pb、Cu、Zn、Cd 硝酸盐于一系列 250 mL 烧杯中,用去离子水溶解,移入 1 000 mL 容量瓶中,去离子水稀释至刻度、摇匀,配制成含 Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup> 各 0、50、200、500、1 000、2 000、5 000 mg/L,含 Cd<sup>2+</sup> 各 0、5、20、50、100、200、500 mg/L 的系列工作溶液,备用。

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 土壤样品的预处理

将样品均匀混合后装入玻璃土柱中,在土壤底层放一张孔径 0.038 mm(400 目)的尼龙网,以防止土壤颗粒堵塞石英隔层,并确保溶液自由流出。在土壤上层放置一张同样的尼龙网和一张中性滤纸,防止在加入溶液的过程中土壤向上逸出。

#### 1.4.2 土壤饱和含水量的测定

为确定 1 kg 土样达到饱和时需要加入的溶液量,测定了土壤的饱和含水量。4 个土壤样品达到饱和时需要加入溶液的体积分别为:KH 样品 428.2 mL、BG-1 样品 385.97 mL、WZK 样品 527.85 mL、BG-2 样品 400.58 mL。

#### 1.4.3 土壤重金属吸附量的测定

在室温条件下,分别量取使 1 kg 土壤达到饱和时的溶液量加入到土柱中,当土壤达到饱和状态时关闭玻璃柱底端的阀门,土柱上部用橡胶塞塞严,以防止水分蒸发。土壤密闭静置 96 h<sup>[2-3]</sup>,启动压力泵,将土壤溶液压入到 10 mL 比色管中,以 2 000 r/min 离心分离 10 min,取上清液,测定溶液中 Pb<sup>2+</sup>、Cu<sup>2+</sup>、Zn<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup> 的平衡浓度 C,用差减法计算土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 的吸附量 S(表 2),以 C 和 S 作图得到平衡溶液与吸附量的关系(图 2)。

表 2 四个土壤对重金属离子的饱和吸附实验测定结果<sup>①</sup>

Table 2 Analytical results of Pb<sup>2+</sup>, Cu<sup>2+</sup>, Zn<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup> in saturated adsorption tests by four types of soils

$C_0$ (Pb <sup>2+</sup> ) (mg/L)	KH		BG-1		WZK		BG-2	
	C	S	C	S	C	S	C	S
0	0.213	0.091	0.148	0.057	0.013	0.001	0.145	0.058
50	0.846	21.048	0.451	19.124	0.014	26.385	0.586	19.794
200	0.948	85.234	0.717	76.917	0.0534	105.542	0.849	79.776
500	1.245	213.567	0.982	192.606	0.0958	263.874	1.456	199.707
1000	2.489	427.134	1.049	385.565	1.153	527.241	3.458	399.195
2000	3.489	854.906	1.816	771.239	1.472	1054.923	6.879	798.404
5000	5.424	2138.677	6.149	1927.477	5.139	2636.537	7.586	1999.861

①  $C_0$  为初始浓度, C 为平衡浓度,单位 mg/L; S 为吸附到达平衡时的吸附量,单位 mg/kg。

(续表 2)

$C_0(Cu^{2+})$ (mg/L)	KH		BG-1		WZK		BG-2	
	C	S	C	S	C	S	C	S
0	0.0589	0.025	0.245	0.095	0.0425	0.022	0.452	0.181
50	0.0849	21.374	0.859	18.967	0.0849	26.348	0.958	19.645
200	0.156	85.573	1.245	76.713	0.157	105.487	2.435	79.141
500	1.256	213.562	8.859	189.566	1.485	263.141	3.478	198.897
1000	4.849	426.124	14.489	380.378	4.856	525.287	5.428	398.406
2000	5.426	854.077	18.579	764.769	6.158	1052.449	8.461	797.771
5000	9.478	2136.942	21.456	1921.569	7.459	2635.313	29.156	1991.221

$C_0(Zn^{2+})$ (mg/L)	KH		BG-1		WZK		BG-2	
	C	S	C	S	C	S	C	S
0	0.548	0.235	0.456	0.176	0.109	0.056	0.498	0.199
50	0.948	21.004	1.485	18.725	1.141	25.799	1.502	19.427
200	1.456	85.017	3.452	75.862	1.311	104.878	3.489	78.718
500	5.496	211.747	9.478	189.327	4.07	261.777	6.587	197.651
1000	9.149	424.282	13.464	380.773	8.272	523.484	15.486	394.377
2000	13.478	850.629	28.451	760.959	9.682	1050.589	34.589	787.304
5000	19.486	2132.656	55.461	1908.444	12.632	2632.582	78.561	1971.430

$C_0(Cd^{2+})$ (mg/L)	KH		BG-1		WZK		BG-2	
	C	S	C	S	C	S	C	S
0	0.171	0.00007	0.154	0.000059	0.0158	0.00001	0.548	0.00022
5	0.502	2.141	0.546	1.93	0.0516	2.639	1.589	2.002
20	0.624	8.564	0.978	7.719	0.157	10.557	1.826	8.011
50	0.856	21.41	1.458	19.298	0.478	26.392	2.458	20.028
100	2.153	42.819	3.459	38.596	1.485	52.784	4.687	40.056
200	3.549	85.638	8.146	77.191	3.456	105.568	8.156	80.113
500	8.459	214.096	9.485	192.981	5.843	263.922	11.458	200.285

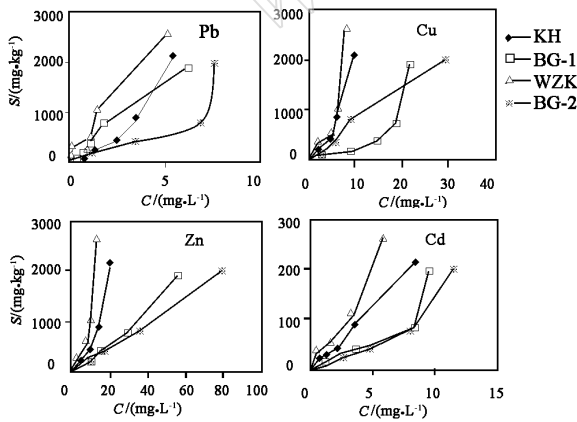


图 2 土壤样品中重金属的平衡浓度与吸附量的关系  
Fig. 2 Relationship between equilibrium concentration of heavy metal elements and their adsorption mass by soils

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤样品中重金属元素的吸附特性

4 个土壤样品的吸附实验中,1 号土柱中加入的重金属离子浓度  $C_0$  均是 0,而吸附达到平衡时

$C$  均大于 0,说明当用去离子水浸入土壤至静态饱和和状态时,土壤会发生“倒吸”现象,即解吸过程<sup>[3]</sup>, $C$  值是土壤中元素水溶态的含量。

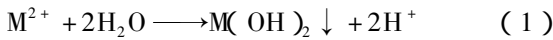
从图 2 可以看出 4 个土壤样品对重金属  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附量随着加入到土柱中重金属溶液浓度的增大而增加。根据图 2 对 4 个土壤样品中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附曲线进行直线拟合(表 3),可以看出 4 个土壤样品中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附曲线大部分满足线性拟合,即土壤平衡溶液中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  浓度与土壤吸附 Pb、Cu、Zn、Cd 的量之间呈现显著的正比关系,尤其是奎河土壤(KH)中 4 个重金属的平衡浓度与吸附量的关系拟合曲线相关系数都在 0.88 以上。背景-2 土壤(BG-2)中  $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  平衡浓度与吸附量的关系拟合曲线相关系数都在 0.91 以上。这是因为当重金属离子浓度增大时,它们与土壤表面碰撞的机会增多,因而有较大的吸附机会,造成土壤对重金属的吸附量增大。

表 3 四个土壤吸附重金属离子的平衡浓度与吸附量的相关关系

Table 3 Correlative relationship between equilibrium concentration of heavy metal elements and their adsorption mass by four types of soils

采样点	离子	直线拟合方程	相关系数
KH	$Pb^{2+}$	$y = 402.54x - 308.3$	0.9297
	$Cu^{2+}$	$y = 199.41x - 73.083$	0.8946
	$Zn^{2+}$	$y = 99.88x - 189.21$	0.8878
	$Cd^{2+}$	$y = 26.045x - 7.1758$	0.9972
BG-1	$Pb^{2+}$	$y = 330.03x - 51.469$	0.9705
	$Cu^{2+}$	$y = 65.26x - 133.95$	0.7136
	$Zn^{2+}$	$y = 34.265x - 73.126$	0.9871
WZK	$Cd^{2+}$	$y = 16.627x - 9.2998$	0.8424
	$Pb^{2+}$	$y = 502.2x + 90.362$	0.9812
	$Cu^{2+}$	$y = 259.25x - 91.386$	0.7606
	$Zn^{2+}$	$y = 171.02x - 252.18$	0.7820
BG-2	$Cd^{2+}$	$y = 41.817x - 2.6371$	0.9630
	$Pb^{2+}$	$y = 208.53x - 124.82$	0.8044
	$Cu^{2+}$	$y = 70.402x - 8.6771$	0.9810
	$Zn^{2+}$	$y = 24.907x - 7.9466$	0.9977
	$Cd^{2+}$	$y = 17.138x - 25.144$	0.9187

这 4 个土壤样品均属于弱碱性土(pH 为 7.58~8.35),由于重金属的氢氧化物的溶度积非常小,当重金属离子进入水土混合溶液后,可以与溶液中的  $OH^-$  形成水合金属离子或氢氧化物沉淀<sup>[5]</sup>。



因此在一定条件下若增大反应式(1)左边  $M^{2+}$  (或  $H_2O$ ) 的浓度,会引起反应向右进行,使土壤溶液中  $H^+$  浓度增大,土壤的 pH 值减小。

## 2.2 四个土壤样品中重金属元素的竞争吸附能力

4 个土壤样品中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸

附率( $\eta$ )计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$\eta = (C_0 - C) / C_0 \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中,  $C_0$  为重金属离子的初始浓度(mg/L);  $C$  为吸附重金属离子后的平衡浓度(mg/L)。

根据式(2)计算出 4 个土壤样品中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附率见表 4。

表 4 四个土壤样品中重金属元素的吸附率<sup>①</sup>

Table 4 Adsorption rates of  $Pb^{2+}$ ,  $Cu^{2+}$ ,  $Zn^{2+}$  and  $Cd^{2+}$  in four types of soil samples

土柱 编号	加入浓度 <sup>②</sup> $\rho_B / (mg \cdot L^{-1})$	KH				BG-1				WZK				BG-2			
		$Pb^{2+}$	$Cu^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Pb^{2+}$	$Cu^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Pb^{2+}$	$Cu^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cd^{2+}$	$Pb^{2+}$	$Cu^{2+}$	$Zn^{2+}$	$Cd^{2+}$
1	0(0)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	50(5)	98.3	99.8	98.0	100	99.1	98.0	97.0	100	100	99.8	97.8	100	98.8	98.1	97.0	100
3	200(20)	99.5	99.9	99.3	100	99.6	99.4	98.3	100	100	99.9	99.3	100	99.6	98.8	98.3	100
4	500(50)	99.8	99.8	98.9	100	99.8	98.2	98.1	100	100	99.7	99.2	100	99.7	99.3	98.7	100
5	1000(100)	99.8	99.5	99.1	100	99.9	98.6	98.7	100	99.9	99.5	99.2	100	99.7	99.5	98.5	100
6	2000(200)	99.8	99.7	99.3	100	99.9	99.1	98.6	100	99.9	99.7	99.5	100	99.7	99.6	98.3	100
7	5000(500)	99.9	99.8	99.6	100	99.9	99.6	98.9	100	99.9	99.9	99.7	100	99.9	99.4	98.3	100

① 表中的 100 均为大于 99.95 的约数; ② 括号( )外的数据为  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  的浓度( )内的数据为  $Cd^{2+}$  的浓度。

从表 4 中看出,加入到土壤中  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  的浓度达到 200 mg/L 时,土壤对重金属元素的吸附率接近最大值,之后趋于平稳。而随着加入  $Cd^{2+}$  初始浓度的增大,土壤对 Cd 的吸附率都接近于 100%,说明加入的 Cd 几乎全部被吸附。

考虑到实际环境中 Cd 的浓度比 Pb、Cu、Zn 要低得多<sup>[7]</sup>,所以设置的  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的质量浓度比为 10:10:10:1。由于不同重金属离子对吸附位存在竞争作用,在竞争吸附条件下土壤对某一重金属离子的吸附量小于单一体系,这种竞争作用随重金属离子浓度的增加而增强。本文试验中由于  $Cd^{2+}$  的浓度仅为  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  的 1/10,尽管  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  的浓度已经增加至 5 000 mg/L,4 个土壤样品对 Cd 的吸附率仍然是最大的。

一般来说, Pb 和 Cd 在酸性条件下,土壤中吸附反应起主控作用;在中性和碱性条件下, pH 升高,生成 Pb 和 Cd 的氢氧化物、硫化物、磷酸盐和碳酸盐的沉淀反应所占的比重逐渐增大。随 pH 上升,土壤表面性质以外的因素(水解、沉淀等)对吸附的影响逐渐加强,不同土壤对 Pb 和 Cd 的吸附差异逐渐减少<sup>[18-10]</sup>。本实验的 4 个土壤样品,对重金属元素的吸附率顺序是  $\eta_{Cd} > \eta_{Pb} > \eta_{Cu} > \eta_{Zn}$ 。

## 2.3 影响土壤吸附重金属元素的因素分析

加入相同浓度  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的条件下,4 个土壤样品中 Pb、Cu、Zn、Cd 的吸附能力与土壤理化性质之间的相关性见表 5。

表 5 土壤中重金属元素的吸附量与土壤理化性质的相关关系

Table 5 Correlative relationship between heavy metal element adsorption by soils and physical-chemical properties of soils

项目	相关系数				
	pH	有机质	CEC	饱和含水量	土壤粒度 <sup>①</sup>
pH	1.0000				
有机质	-0.7373	1.0000			
CEC	-0.5567	0.8534	1.0000		
饱和含水量	-0.9544	0.9051	0.7194	1.0000	
土壤粒度 <sup>①</sup>	0.8362	-0.2502	-0.0681	-0.6376	1.0000
土壤吸附 Pb 的量	-0.9541	0.9055	0.7199	1.0000	-0.6368
土壤吸附 Cu 的量	-0.9520	0.9085	0.7243	1.0000	-0.6312
土壤吸附 Zn 的量	-0.9471	0.9150	0.7337	0.9997	-0.6187
土壤吸附 Cd 的量	-0.9544	0.9051	0.7194	1.0000	-0.6376

① 土壤颗粒 < 0.098 mm 所占比例(%)。

分析结果表明,在加入相同浓度  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的条件下,4 个土壤样品对 Pb、Cu、Zn、Cd 吸附能力与土壤有机质含量、阳离子交换量(CEC)、土壤饱和含水量呈正相关性。

土壤对 Pb、Cu、Zn、Cd 吸附能力受到土壤中有有机质和阳离子交换量的影响,是因为土壤中的有机质大部分以有机颗粒或以有机膜被覆的形式与土壤中的黏土矿物、氧化物等无机颗粒相结合形成有机胶体和有机-无机复合胶体,由此增加了土壤的表面积和表面活性,使得土壤的吸附能力随有机质的增加而增加。土壤有机质包含部分腐殖质,而腐殖质属于高分子有机化合物,含有多种含氧功能团,如羧基、酚羟基和醇羟基等,它们容易和重金属元素发生络合或螯合反应,进而增加土壤的吸附能力。土壤中阳离子交换量反映了土壤胶体的负电荷量,阳离子交换量越高,负电荷量就越高,能够提供较多吸附点位来吸附重金属离子,也能增加重金属的吸附量,因而通过静电吸引而吸附的重金属离子也就越高<sup>[8,11]</sup>。

土壤对 Pb、Cu、Zn、Cd 的吸附能力还与土壤的 pH 值呈负相关性。本实验中土壤的 pH 值越小,土壤对 Pb、Cu、Zn、Cd 的吸附能力也相对越强。

### 3 结语

(1) 4 个土壤样品对  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附实验表明,随着外源  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  浓度的增大,土壤对  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的吸附量也相应增大,当加入到 1000 g 土壤中的  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$  分别为 5000 mg, Cd 为 500 mg 时,土壤的吸附容量仍未达到饱和。

(2) 本实验中的 4 个土壤样品属于弱碱性土,土壤重金属的吸附能力与土壤 pH 呈现显著负相关。在土壤环境发生变化如 pH 减小时,则会导致土壤对重金属的吸附能力增强,进而可能会促进重金属在土壤-水-植物系统的迁移和转化。

(3)  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  在 4 个土壤中的吸附能力顺序为:WZK(水稻土) > KH(菜园土) > BG-2(背景水稻土) > BG-1(背景菜园土),这表明水稻土对重金属的吸附能力强于菜园土。受矸石山淋滤和污水灌溉影响的土壤,由于土壤的有机质含量、阳离子交换量、pH 值等理化性质发生变化,对重金属的吸附能力比背景区土壤的吸附能力强。

(4) Pb、Cu、Zn、Cd 在 4 个土壤样品中的吸附率顺序是  $\eta_{Cd} > \eta_{Pb} > \eta_{Cu} > \eta_{Zn}$ ,表明在引入相同浓

度的外源  $Pb^{2+}$ 、 $Cu^{2+}$ 、 $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$  的条件下,Cd 被吸附的比率最大。这与土壤中 Pb、Cu、Zn、Cd 的含量、土壤有机质含量、阳离子交换量、土壤饱和含水量呈正相关性,与土壤的 pH 值呈负相关性。说明土壤理化性质的改变,会直接影响土壤对重金属的吸附能力。

(5) 本文通过徐州水稻土和菜园土对重金属 Pb、Cu、Zn、Cd 吸附特性的研究,分析了影响土壤重金属吸附的主要因素,可以通过调节土壤的有机质含量、阳离子交换量、pH 值等方法来控制矸石山淋滤和污水灌溉对土壤的污染,治理和修复徐州奎河污灌区的土壤。

### 4 参考文献

- [1] 宗良纲,徐晓炎. 土壤中镉的吸附解吸研究进展[J]. 生态环境, 2003, 12(3): 331-332.
- [2] 张增强,张一平,朱兆华. 镉在土壤中吸持的动力学特征研究[J]. 环境科学学报, 2000, 20(3): 371-375.
- [3] 许春雪,潘小菲,王亚平,等. 北京城近郊区土壤对镉的吸附特征研究[J]. 岩矿测试, 2005, 24(3): 164-165.
- [4] 王亚平,潘小菲,许春雪,等. 土壤对镉离子的竞争吸附研究——以北京城近郊为例[J]. 岩矿测试, 2007, 26(4): 251-256.
- [5] 张淼,李亚青,王敏新. 黄土体对重金属(Cd、Pb、Zn、Cu)吸附试验研究[J]. 西北水资源与水工程, 1996, 7(2): 37-39.
- [6] 张建梅. 东京根霉对重金属  $Cr^{3+}$ 、 $Mn^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  的吸附研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2006, 7(8): 65-66.
- [7] 谢丹,徐仁扣,卞永荣,等. 不同体系中不同土壤对 Cu(II)、Pb(II)和 Cd(II)吸附能力的比较[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 900-901.
- [8] 杨金燕,杨肖娥,何振立,等. 土壤中铅的吸附-解吸行为研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 103-104.
- [9] 王果. Cu、Cd 在 2 种土壤上的吸附特征[J]. 福建农业大学学报, 1995, 24(4): 437-440.
- [10] Yu S, He Z L, Huang C Y, et al. Adsorption-Desorption Behavior of Copper at Contaminated Levels in Red Soils from China[J]. *Journal of Environmental Quality* 2002, 31: 1130-1134.
- [11] 张磊,宋凤斌. 土壤吸附重金属的影响因素研究现状及展望[J]. 土壤通报, 2005, 36(4): 628-629.