

# 冶炼厂渣场周边农田土壤中铜镉的分布特征研究

刘 鹏<sup>1,2</sup>, 林玉锁<sup>2</sup>, 贺 静<sup>1,2</sup>, 张孝飞<sup>2</sup>, 冯艳红<sup>2</sup>, 徐 建<sup>2</sup>

(1.南京农业大学资源与环境学院, 江苏 南京 210095; 2.环境保护部南京环境科学研究所, 江苏 南京 210042)

**摘 要:**通过现场采样及室内测定,调查了某铜冶炼厂的废渣堆放对周边农田土壤的重金属污染状况,分别对调查区土壤中重金属的污染特征、铜和镉的土壤表层富集系数和淋失比率、土壤中重金属可提取态含量及形态进行了研究。结果表明,该调查区土壤中以铜和镉重金属污染为主。镉元素已经较明显地向下迁移,污染深度范围 0~40 cm,镉在土壤中分布特征与镉易于被水淋溶和在土壤中的形态以交换态为主有关;调查区土壤中的铜主要富集于表层土壤中(0~20 cm),这与土壤中的铜不易被水淋溶发生迁移和在土壤中形态主要以非交换态为主有关。由此可见,受重金属污染农田土壤中镉存在较大的环境风险。

**关键词:**表层富集;淋溶;淋失比率;pH 值

**中图分类号:**X53 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)07-1397-07

## Distribution Characterization of Cu and Cd in Surrounding Agricultural Soil of A Waste Dumping Site at A Copper Smelter

LIU Peng<sup>1,2</sup>, LIN Yu-suo<sup>2</sup>, HE Jing<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-fei<sup>2</sup>, FENG Yan-hong<sup>2</sup>, XU Jian<sup>2</sup>

(1.College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Nanjing Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** A site investigation was carried out for surrounding agricultural soil of a waste dumping site at a copper smelter. Heavy metals including As (HMs) were analyzed for total 24 soil samples collected. Analysis on characterization of soil contamination, accumulating factor of copper and cadmium in surface soil, leaching loss ratio and extractable concentrations of HMs in soil were performed. The results show that the highest concentrations of Cu and Cd were 1 950 and 88.1 mg·kg<sup>-1</sup> for surface soils, respectively. Cu and Cd were main contaminants from the waste dumping site and caused the contamination of the surrounding soil. An analysis on accumulating factors of HMs indicated that Cu was much easier to accumulate in the surface(0~20 cm) soil than Cd. The calculated leaching loss ratio of Cu and Cd suggest that Cu in surface soil was difficult to leach out while Cd was relatively easier to be leached out from surface soil to subsurface(20~40 cm and 40~60 cm)soil. A modified Tessier sequential extraction procedure was performed for all the soil samples. The obtained data suggested that 30%~80% of Cu in the soil were present as organic matter bound species, and 1%~20% of Cu in the soil were present as exchangeable species. Comparing with Cu, much higher percentages of Cd (50%~75%) in the soil could present as exchangeable species, which could easily mobilize and transfer to subsurface soil. Our study suggests that Cd in contaminated agricultural soils can pose a potential leaching risk to the environment.

**Keywords:** enrichment in surface soil; eluviation; the immigrant ratio; pH value

铜金属冶炼过程会产生水淬渣、尾矿、铅滤饼、砷滤饼和石膏等固体废弃物,其中含有大量重金属污染物(如铜和镉等)。这些废渣的露天堆放会对周边的农田土壤产生重金属污染,并通过植物吸收和累积作用

污染食用农产品,危害人体健康<sup>[1-2]</sup>。本文以某冶炼厂渣场周边受影响的农田为研究对象,通过现场采样分析,研究了农田土壤中重金属的污染特征,尤其是重金属可能受水淋溶和其他扰动而在土壤中发生不均匀分布特征,为重金属污染农田土壤的治理修复和风险控制提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集

某铜冶炼厂渣场周边的调查区域见图 1 所示,其

收稿日期:2008-11-24

基金项目:公益性行业科研专项项目“土壤环境质量标准制订方法学研究”和“污染土壤风险评估技术方法研究”

作者简介:刘 鹏(1983—),男,山西省长治市人,硕士研究生,研究方向为土壤环境污染控制与生物修复。

E-mail:liupenglearn@yeah.net

通讯作者:林玉锁 E-mail:lys@nies.org

中黑线所围的区域为受到污染的农田土壤。调查时,沿渣场大坝下游由近及远,大致按照“近密远稀”的原则布置了8个采样点。在每个采样点用不锈钢土钻分别采集表层(0~20 cm)、亚表层(20~40 cm)、下层(40~60 cm)土样,所采集土壤样品用聚乙烯塑封袋盛装,在室内自然风干,过60目筛备用。

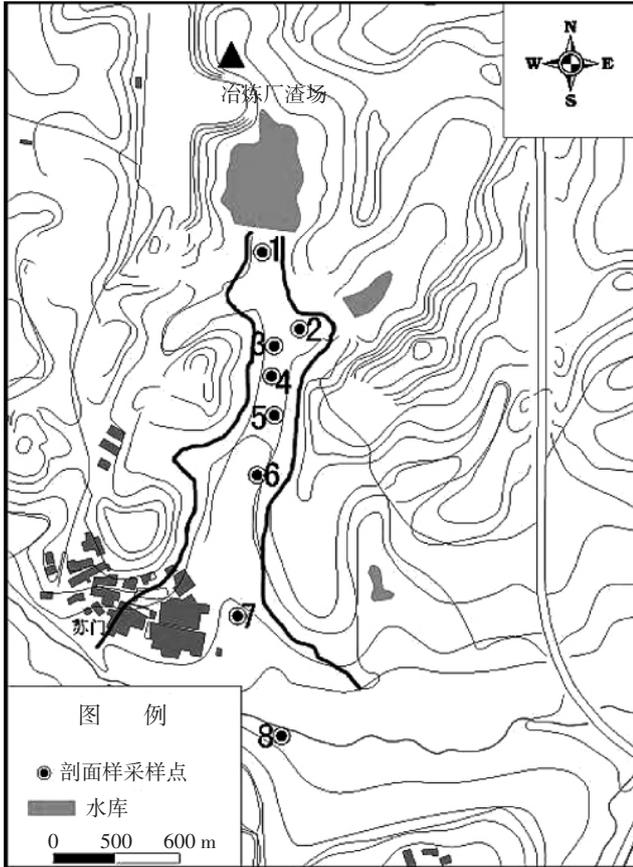


图1 调查区域示意图

Figure 1 The sketch map of the sampling sites in the investigating area

## 1.2 土壤基本性质

该区域地质基础属白垩系的红砂岩,上部为第四系土壤层,下部为白垩系的砂页岩(包括沙岩、粉沙岩和沙质砾石等)。区域土壤类型主要为红壤型水稻土,主要特征是通体棕红或黄红,呈酸性或强酸性,有机质含量不高,仅含1%左右。水稻土为该调查区的主要耕作土壤,土壤偏酸性,土壤pH值范围一般在4.3~6.5之间。本次采集表层土壤的pH值和有机质含量测定结果见表1。土壤样品的有机质含量测定采用低温外热重铬酸钾氧化-比色法<sup>[3]</sup>,表层土壤的pH值采用玻璃电极法(1:2.5土水比)进行测定<sup>[3]</sup>。

表1 土壤样品基本理化性质

Table 1 The basic physical and chemical properties of the soil samples

采样点	1	2	3	4	5	6	7	8
有机质含量/%	2.13	0.43	1.24	1.29	0.65	2.01	2.07	1.79
pH值	6.2	7.5	5.0	4.9	4.3	6.5	4.7	4.5

## 1.3 土壤样品中重金属含量测定

土壤样品中重金属含量测定:采用HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消解法进行土样前处理,铜、锌、镍、铬和铅等元素用Perkin Elmer公司的AS800火焰原子吸收法测定,镉元素用AS800石墨炉法测定。当溶液中铜、锌、镍、铬等元素含量低于0.1 mg·L<sup>-1</sup>时,铅元素含量低于1 mg·L<sup>-1</sup>时,用石墨炉方法测定其含量。

## 1.4 土壤样品的水浸提与盐酸浸提试验

称取过60目筛的土样10 g于锥形瓶中,加提取剂(去离子水或0.1 mol·L<sup>-1</sup>的HCl)50 mL,土液比为1:5,在室温(28℃)下振荡(280 r·min<sup>-1</sup>)120 min,离心过滤,测定提取液中铜、镉含量。所测得的就是重金属可浸提态含量,与该土样重金属总量之比为该元素的水/盐酸浸提率。

## 1.5 土壤样品中重金属形态分析试验

采用经典的 Tessier 五步连续萃取法<sup>[4]</sup>,具体如下:

(1)可交换态:用8 mL MgCl<sub>2</sub>溶液(1 mol·L<sup>-1</sup> MgCl<sub>2</sub>溶液,pH7.0),在室温下持续振荡1 h来提取。

(2)碳酸盐结合态:第一步的残渣在室温下加入8 mL 1 mol·L<sup>-1</sup> 醋酸钠(pH5.0 醋酸调节)持续振荡5 h提取。

(3)铁锰氧化物结合态:第二步的残渣加入0.04 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸羟胺的25%的醋酸溶液,在(96±2)℃水浴加热6 h,偶尔搅拌。

(4)有机结合态:第三步的残渣加入3 mL 0.02 mol·L<sup>-1</sup> 硝酸和5 mL 30%的双氧水(用硝酸调pH到2),混合物加热到(85±2)℃ 2 h,间歇性的搅动。然后加入3 mL 30%的双氧水(硝酸调pH到2),混合液加热到(85±2)℃ 3 h,间歇性的搅动。冷却后,加入5 mL 3.2 mol·L<sup>-1</sup> 醋酸铵的20%的硝酸溶液,试样稀释到20 mL,并且持续振荡30 min。

(5)残渣态:第四步的残渣用HF-HClO<sub>4</sub>混酸消解,提取其中全量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 调查区土壤中重金属污染特征

本次调查采集的土壤样品中重金属测定结果见

表 2。由表 2 可见,靠近渣场大坝(1 号采样点)重金属污染最为严重,靠近运渣道路旁(6 号采样点)土壤也有较重的污染,其余各采样点土壤中重金属呈现不同程度的污染。对照 HJ332—2006《食用农产品产地土壤环境质量评价标准》(Cd:0.3 mg·kg<sup>-1</sup>、As:30 mg·kg<sup>-1</sup>、Pb:80 mg·kg<sup>-1</sup>、Cu:50 mg·kg<sup>-1</sup>、Zn:200 mg·kg<sup>-1</sup>、Cr:250 mg·kg<sup>-1</sup>、Ni:40 mg·kg<sup>-1</sup>),As、Cr、Ni、Pb 和 Zn 5 种元素均未超出土壤环境评价标准规定值,其含量接近

表 2 土壤样品中重金属含量测定结果

Table 2 The heavy metal concentrations of the soil samples of the investigating area

样点 编号	采样深 度/cm	As/ mg·kg <sup>-1</sup>	Cd/ mg·kg <sup>-1</sup>	Cr/ mg·kg <sup>-1</sup>	Cu/ mg·kg <sup>-1</sup>	Ni/ mg·kg <sup>-1</sup>	Pb/ mg·kg <sup>-1</sup>	Zn/ mg·kg <sup>-1</sup>
1	0~20	489	56	83.1	1 950	115	701	1 270
	20~40	658	88.1	41.9	1 570	219	465	944
	40~60	20	0.78	37	30.1	17.6	29.9	62.9
2	0~20	6	0.4	10.6	164	9	17	21
	20~40	10	2.37	8.8	54	9	21	36
	40~60	28	10	13.2	327	15	40	85
3	0~20	13	0.1	12.3	76	6	24	18
	20~40	10	0.31	22.8	105	15	20	37
	40~60	9	0.15	25.9	23	16	20	33
4	0~20	33	0.74	19.7	639	11	59	43
	20~40	8	0.21	13	46	15	16	17
	40~60	6	0.12	19.2	11	11	15	26
5	0~20	10	0.42	15.5	188	8	30	29
	20~40	4	0.04	13.9	16	8	16	18
	40~60	5	0.08	18	11	6	17	18
6	0~20	55	4.47	128	857	98	360	1 670
	20~40	30	3.33	18.5	196	11	47	115
	40~60	7	0.66	14.6	7	8	13	19
7	0~20	26	2.45	23.3	293	19	42	49
	20~40	6	1.32	20.6	11	6	18	47
	40~60	7	0.66	14.6	7	8	13	19
8	0~20	9	1.13	21.1	339	9	31	27
	20~40	11	1.47	20.7	269	11	24	27
	40~60	22	1.9	28	54	11	19	52
土壤环境 评价标准		40	0.3	250	50	40	80	200

区域背景值(见表 3),说明受渣场影响的农田土壤中没有发生明显的 As、Cr、Ni、Pb 和 Zn 的污染。而铜和镉元素污染较重,所有样点都超出了土壤环境评价标准,也比本地区土壤背景值高,说明土壤中受渣场污染以铜和镉元素为主。

对各采样点表层土壤中 7 种重金属含量间的相关性进行分析,其相关系数见表 4。从表 4 可以看出,各采样点表层土壤中铜和镉的含量呈现 1%水平下极显著相关,两元素在表层土壤中的含量具有强烈的共变性。说明该调查区铜、镉污染来自同一污染源,已经形成明显的复合污染。

表 4 各采样点表层土壤中重金属含量的相关性分析(相关系数)

Table 4 The correlations between the heavy metal concentrations in the surface soil of different sample sites

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.999**	1					
Cr	0.489	0.474	1				
Cu	0.940**	0.928**	0.686	1			
Ni	0.781*	0.771*	0.924**	0.887**	1		
Pb	0.225	0.208	0.956**	0.455	0.781*	1	
Zn	0.594	0.581	0.988**	0.756**	0.964**	0.917**	1

注:\*表示 5%水平下显著相关,\*\*表示 1%水平下显著相关,下同。

### 2.2 铜和镉在农田表层土壤中的富集作用

通过作图分析铜和镉两元素的含量在不同深度土壤中的分布,可以直观地获得其在各采样点的垂直分布及迁移情况。图 2 显示铜和镉元素在各采样点表层(0~20 cm)、亚表层(20~40 cm)和深层(40~60 cm)土壤中的含量分布。横坐标为采样点,纵坐标为重金属在不同土层中的含量百分比。

从图 2 可以看出,1、2、3 和 8 号采样点亚表层和深层土壤中铜和镉含量较高,铜和镉发生了不同程度的向下迁移。尤其是 2 号点,深层土壤中铜和镉含量很高,已经发生了严重的重金属下移;4、5、6 和 7 号采样点铜和镉都是表层含量>亚表层>深层,铜和镉在

表 3 调查区土壤中重金属背景值(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 3 The background level of the heavy metals of the investigating area(mg·kg<sup>-1</sup>)

类型		Cu	Pb	Zn	Cd	As
区域	范围	0.023~40.35	20.70~47.70	28.07~145.91	0.010~0.380	3.69~40.05
红壤背景值	均值	20.11	31.35	63.99	0.060	13.17
水稻土	范围	4~34	10~50	11~95	0.020~0.800	1.6~1.8
背景值	均值	12.13	25.63	38.19	0.120	5.12
1991 年表土	历史值	66.5	30.4	107.3	1.956	9.3

表层土壤中的含量比例高达 80%~95%，均未出现明显的向下迁移。从图 2 中还可以看出，镉向下迁移现象比铜明显。

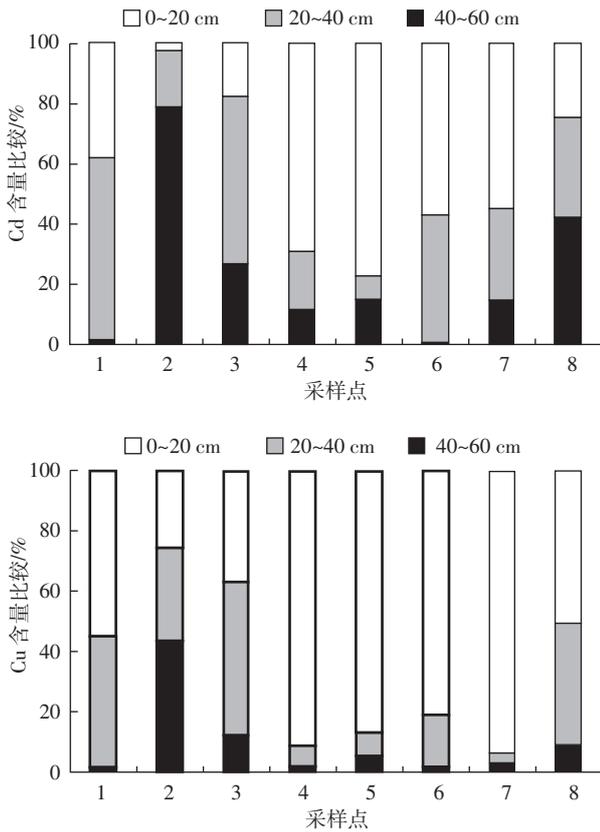


图 2 各采样点不同深度土壤中的重金属含量比例

Figure 2 The proportions of the heavy metal concentrations in different depth of each sampling site

重金属在土壤剖面中的垂直分布具有一定的规律性。一般重金属污染主要是对表层土壤造成影响，而对下层土壤的影响较小，例如镉元素一般集中分布在土壤 0~15 cm 的表层，15 cm 以下含量明显减少<sup>[5]</sup>，这就是重金属污染的表聚性。随着时间的推移，重金属污染物浓度的增加，还有淋溶作用的影响，重金属污染物会不断下移，从而对下层土壤环境造成污染。郭跃品等<sup>[6]</sup>在研究某农产品种植基地的重金属污染风险时，指出外源重金属在浅层土壤中有富集现象，并指出可以通过计算公式(1)来描述重金属元素在不同成土母质类型土壤中的富集规律。本文通过计算铜和镉在土壤表层的富集系数来描述表征各采样点铜和镉的表层富集作用。

重金属在土壤表层的富集系数计算公式为：

$$r=2(W_{浅}-W_{深})/(W_{浅}+W_{深}) \quad (1)$$

式中： $r$  表示重金属在表层土壤的富集系数； $W_{浅}$ 表示

某重金属元素在表层土壤中的含量， $W_{深}$ 表示某重金属元素在亚表层土壤中的含量。如果  $r>0$ ，表示该点发生了重金属的表层富集， $r$  值越大，富集程度越高；如果  $r<0$ ，则表示元素在浅层土壤相对深层土壤亏损，绝对值越大，亏损越严重，可能发生了重金属的向下迁移。

采用表层土壤重金属富集系数计算公式 (1)，得出各采样点铜、镉富集系数见表 5。

表 5 铜和镉在表层土壤的富集系数

Table 5 The accumulating factor of the copper and the cadmium in the surface soil

样点编号	Cd	Cu	均值
1	-0.45	0.22	-0.115
2	-1.42	1.01	-0.205
3	-1.02	-0.32	-0.67
4	1.12	1.73	1.425
5	1.65	1.69	1.67
6	0.29	1.26	0.775
7	0.60	1.86	1.23
8	-0.26	0.23	-0.015
均值	0.06	0.96	—
$r>0$ 个数	4	7	—

从表 5 可以看出，铜元素在 7 个采样点都发生了表层富集现象，而且富集系数的平均值也远大于镉元素，各样点铜的表层富集系数平均值是镉元素的 16 倍。表明铜易在土壤表层发生富集。镉元素只有采样区中部的 4、5、6、7 点发生了表层富集，与铜相比程度较轻。

### 2.3 铜和镉在农田土壤中的迁移性

重金属在土壤中的迁移率也称为淋失比率，可以用来研究重金属在土壤剖面中的迁移特征。重金属在土壤中受水流的淋溶及农业耕作等作用的影响会发生向下迁移。有研究指出，重金属元素在土壤表层污染越重，淋洗下移的深度也越大<sup>[7-9]</sup>。南忠仁等分析了重金属元素淋失迁移的规律，认为扣除元素背景含量后可视为剖面中重金属元素的淋失下移量。土层元素淋失比率为下层土壤淋失下移量与上层土壤淋失下移量之比<sup>[10]</sup>。本文在重金属淋失比率的计算上参照李亮亮等的算法，对南忠仁的方法进行了改变，以扣除背景值的下层土壤重金属含量与扣除背景值的总量之比作为土壤重金属的迁移率，来衡量各采样点重金属垂直迁移的程度<sup>[11]</sup>。

土壤中重金属的淋失比率计算公式如下：

$$wlc = \frac{M_{i-1} - C}{(M_i - C) + (M_{i-1} - C)} \quad (2)$$

式(2)中: $wlc$ 为*i*层中某元素的淋失比率; $M_{i-1}$ 为*i*-1层中某元素的含量; $M_i$ 为*i*层中某元素的含量; $C$ 为该元素的背景含量。

采用重金属淋失比率公式(2),计算各采样点铜和镉的淋失比率,结果见表 6。

表 6 铜和镉在土壤中的淋失比率

Table 6 The leaching loss ratio of the copper and cadmium in the soil

采样点	$wlc$ -Cd	$wlc$ -Cu	铜、镉 $wlc$ 均值	pH
1	0.612	0.446	0.529	6.2
2	0.889	0.216	0.552 5	7.5
3	1.118	0.592	0.855	5.0
4	0.127	0.051	0.089	4.9
5	-0.364	0.022	-0.171	4.3
6	0.425	0.179	0.302	6.5
7	0.34	-0.004	0.168	4.7
8	0.572	0.44	0.506	4.5
样点均值	0.46	0.24	—	—

由表 6 可知,各样点淋失比率的均值为镉>铜,镉的平均淋失比率约是铜的 2 倍。表明镉比铜易于淋失。这与李亮亮等研究结果一致。土壤中有胶体和 Al 胶体对铜离子的吸附强于对镉离子的吸附,镉与各种无机有机配位体形成的络合-螯合物的稳定性也弱于铜<sup>[12-14]</sup>。受这些因素的综合影响,土壤中的铜不易淋失,而镉元素较易于淋失。

分别进行重金属含量在表层-亚表层、亚表层-深层的相关性分析,结果见表 7。

表 7 不同层次土壤间重金属含量的相关性分析

Table 7 The correlations of the heavy metal concentrations among different depth in the soil

重金属	表-亚表	亚表-深
Cd	0.999 **	-0.123
Cu	0.905 **	-0.038

由表 7 可以看出,两元素在表层和亚表层土壤中的含量分别呈 1%水平极显著相关,表层和亚表层土壤中重金属含量具有明显的共变性,说明亚表层土壤中的铜、镉污染直接来自表层土壤污染物的向下迁移。

各采样点铜和镉淋失比率与土壤 pH 值的相关性分析结果见表 8。由表 8 显示,镉元素与土壤 pH 值的相关性比铜元素高,证明镉元素比较容易受到土壤

酸性的影响而迁移。但镉元素的淋失比率与土壤 pH 值间的相关性并不显著,说明并非土壤酸性越强重金属淋失越严重,是否发生重金属的淋失还与水流的淋溶作用有关。另外,铜与镉在土壤中的淋失比率呈 5% 水平显著相关,说明两种重金属淋失比率有较强的共变性。

表 8 重金属淋失比率及与土壤 pH 值的相关系数

Table 8 The correlations between the leaching loss ratio of the heavy metals and the pH values of the soil

重金属	Cd	Cu	pH
Cd	1		
Cu	0.765 *	1	
pH	0.486	0.128	1

## 2.4 土壤中铜和镉的环境活性(有效性)

采用水浸提和盐酸浸提试验方法,研究农田土壤中铜和镉元素的环境活性或被植物吸收利用的难易。试验测定结果分别见表 9 和表 10。

表 9 土样中 Cu 和 Cd 的水浸提率(%)

Table 9 The water extract ratio of the copper and cadmium in the soil samples (%)

采样点	Cd	Cu
1	5.43	0.03
2	1.72	0.09
3	1.97	0.11
4	1.16	0.16
5	2.07	0.18
6	0.42	0.28
7	5.47	0.14
8	2.80	0.45
均值	2.63	0.18

从表 9 可以看出,镉的水浸提率普遍高于铜,说明土壤样品中镉较易被水淋出,进一步证明调查区农田土壤中的镉较易于被水淋溶而发生向下迁移。

1、7 和 8 号采样点镉的水浸提率均较高,这与土样 pH 值较低有关。由图 3 可以直观地看出,镉的水浸提率与土样 pH 值有较好的负相关关系,pH 值高的土壤样品水浸提率较低,反之镉的水浸提率较高。而铜无此规律,并且铜的水浸提率极低,说明铜不易被水淋溶而发生迁移。

如果采用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸进行土壤样品中铜和镉浸提试验,发现浸提率比水浸提率高很多(表 10),并且铜与镉的盐酸浸提率比较接近。盐酸浸提试验可

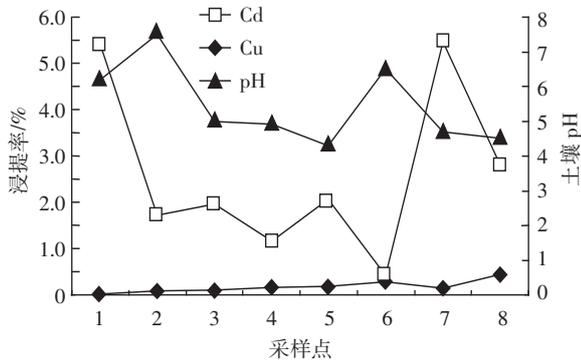


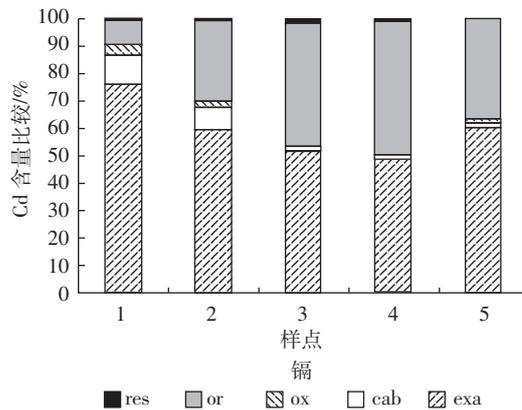
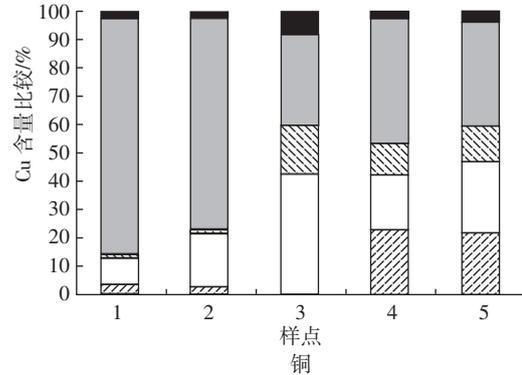
图 3 土样中重金属的水浸提率与 pH 的关系

Figure 3 The relationship between the water extract ratios of the heavy metals and the pH values of the soil samples

表 10 土样中 Cu 与 Cd 的盐酸浸提率(%)

Table 10 The HCl(0.1 mol·L<sup>-1</sup>) extract ratio of the copper and cadmium in the soil samples(%)

采样点	Cu	Cd	pH
1	31.79	27.14	6.2
2	50.00	42.50	7.5
3	42.28	70.00	5
4	7.72	24.32	4.9
5	20.00	40.48	4.3
6	33.54	29.53	6.5
7	35.67	8.98	4.7
8	83.48	24.78	4.5
均值	38.06	33.47	



(exa: 金属可交换态 Exchangeable; cab: 碳酸盐结合态 Carbonate bound; ox: 铁锰氧化物结合态 Iron manganese oxide bound; or: 有机质及硫化物结合态 organic matter bound; res: 残渣态 Residues)

图 4 铜、镉的形态分析结果

Figure 4 The speciation result of the copper and the cadmium

以模拟在酸雨淋溶的情况下重金属的迁移情况。由该试验可知,在酸雨淋溶下,铜和镉的淋失情况比较接近,平均都能达到 30%左右。

### 2.5 土壤中铜和镉的形态分析

铜和镉在土壤中迁移分布、淋失作用及环境活性均与这两种元素在土壤中的存在形态相关,所以本研究对 5 个样点进行了重金属形态分析试验,结果见图 4 所示。

由形态分析结果可知(图 4),该调查区土样中的铜大部分以有机态存在,约 30%~80%的铜都与土壤中的有机质较紧密地结合。可交换态的铜仅占 1%~20%,所以调查区土壤中的铜不易被水淋溶而发生迁移。碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态的铜含量占 10%~22%,该部分铜在酸性条件下可能转化为可交换态铜。镉元素可交换态的比例大约是 50%~75%,所以该区域土壤中镉较易于被水淋溶而发生迁移。形态分析的结果较好地支持了本文上述研究结论。

### 3 结论

该调查区土壤以铜和镉重金属污染为主。镉元素已经较明显地向下迁移,污染浓度范围 0~40 cm,镉在土壤中分布特征与镉易于被水淋溶和在土壤中的形态以交换态为主有关。调查区土壤中的铜主要富集于表层土壤中(0~20 cm),这与土壤中的铜不易被水淋溶发生迁移和在土壤中形态主要以非交换态为主有关。由此可见,受重金属污染农田土壤中镉存在较大的环境风险。

#### 参考文献:

[1] 付善明,周永章,张澄博,等. 粤北大宝山矿尾矿铅污染迁移及生态系统环境响应[J]. 现代地质, 2007, 21(3):570-577.  
 FU Shan-ming, ZHOU Yong-zhang, ZHANG Cheng-bo, et al. Transfer and ecosystem effects of lead contamination in dabaoshan mine tailings, Northern Guangdong[J]. *Geoscience*, 2007, 21(3):570-577.

- [2] 许晓春, 王 军, 李 援, 等. 安徽铜陵林冲尾矿库重金属元素分布与迁移及其环境影响[J]. 岩石矿物学志, 2003, 22(4):433-436.  
XU Xiao-chun, WANG Jun, LI Yuan, et al. The distribution and migration of heavy metal elements of Linchong tailings reservoir in Tongling, Anhui Province, and their environment effects[J]. *Acta Petrologica et mineralogical*, 2003, 22(4):433-436.
- [3] 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: 106-109.  
LU Ru-kun. The agricultural chemical analyse methods of the soil[M]. Beijing: China Agricultural Sciencetech Press, 2000: 106-109.
- [4] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Anal Chem*, 1979, 51: 844-851.
- [5] 刘 俐, 高新华, 宋存义, 等. 土壤中镉的赋存行为及迁移转化规律研究进展[J]. 能源环境保护, 2006, 20(2):6-9.  
LIU Li, GAO Xin-hua, SONG Cun-yi, et al. Progress in the study of cadmium occurrence and transportation in soils[J]. *Energy Environmental Protection*, 2006, 20(2):6-9.
- [6] 郭跃品, 吴国爱, 付杨荣, 等. 海南省胡椒种植基地土壤中重金属元素污染评价[J]. 地质科技情报, 2007, 26(4):92-94.  
GUO Yue-pin, WU Guo-ai, FU Yang-rong et al. Evaluation of heavy metal pollution of soil in pepper fields in Hainan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(4):92-94.
- [7] 段永惠. 污水灌区汞、镉在土壤中的纵向迁移及影响因素研究[J]. 环境保护, 2004, 12:35-37.  
DUAN Yong-hui. Distribution and affecting factors of mercury and cadmium in soil profiles of sewage irrigation area[J]. *Environmental Protection*, 2004, 12:35-37.
- [8] 孙立波, 张兰英, 张玉玲, 等. 通辽地区污灌区土壤中重金属迁移规律[J]. 世界地质, 2007, 26(1):71-74.  
SUN Li-bo, ZHANG Lan-ying, ZHANG Yu-ling, et al. Heavy metal migration in soil in sewage irrigation region of Tongliao[J]. *Global Geology*, 2007, 26(1):71-74.
- [9] 沈根祥, 谢 争, 钱晓雍, 等. 上海市蔬菜农田土壤重金属污染物累积调查分析[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):37-40.  
SHEN Gen-xiang, XIE Zheng, QIAN Xiao-yong, et al. Investigation and analysis of heavy metal accumulation in the soil of vegetable cropland in Shanghai[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(Sup):37-40.
- [10] 南忠仁, 李吉均. 干旱区耕作土壤中重金属镉铅镍剖面分布及行为研究[J]. 干旱区研究, 2000, 17(4):39-45.  
NAN Zhong-ren, LI Ji-jun. Study on the distribution and behavior of selected metals (Cd, Ni, Pb) in cultivated soil profile in arid zone (take Baiyin region as an example) [J]. *Arid Zone Research*, 2000, 17(4):39-45.
- [11] 李亮亮, 张大庚, 等. 葫芦岛市连山区·龙港区土壤重金属垂直分布与迁移特征[J]. 安徽农业科学, 2007, 35(15):3916-3918.  
LI Liang-liang, ZHANG Da-geng, et al. Vertical distribution and immigrant character of heavy metals in soil in Lianshan and Longgang Districts of Huludao City[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35(15):3916-3918.
- [12] WU Qi-tian, Morel J L, Guckert A. Effects of soil pH, texture, moisture, organic matter and cadmium content on cadmium diffusion coefficient[J]. *Pedosphere*, 1994, 4(2):97-103.
- [13] 王晓蓉. 环境化学[M]. 南京: 南京大学出版社, 1993.  
WANG Xiao-rong. Environmental science[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1993.
- [14] Gupate, Gupta S K, Aten C, et al. Concentration of ionic copper in soil solution[J]. *Intern Environ Anal Chem*, 1988, 34:45-50.