

# 云南某铅锌矿区周边农田土壤 Cd、Pb 分布特征及风险评价

邹小冷, 祖艳群\*, 李元, 湛方栋

(云南农业大学资源与环境学院, 昆明 650201)

**摘要:**通过大田调查云南省某铅锌矿区周边农田的土壤及农作物(马铃薯和玉米)中重金属 Cd、Pb 含量,对该区域重金属污染现状进行评价,结果表明:该区域内土壤中 Cd 和 Pb 平均含量分别为 12.93、2 246.48 mg·kg<sup>-1</sup>,总体污染程度属于重污染;马铃薯内 Cd、Pb 含量分别为 1.41、11.45 mg·kg<sup>-1</sup>,玉米籽粒中 Cd、Pb 含量分别为 1.18、12.50 mg·kg<sup>-1</sup>。土壤重金属和土壤理化性质间的关系复杂,Cd 与 Pb 之间呈极显著正关系,有效态 Cd 与总 P、速效 P 呈极显著正相关关系;当 pH≤6.5 时,全量 Cd 和全量 Pb 与总 P、速效 P 呈极显著正相关关系。该区域的土壤和食用作物已对当地居民的健康构成威胁。

**关键词:**重金属;土壤;农作物;污染现状;健康风险

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)11-2143-06 doi:10.11654/jaes.2014.11.011

## Pollution and Health Risk Assessment of Cadmium and Lead in Cultivated Soils and Crops Surrounding a Lead-Zinc Mine in Yunnan Province

ZOU Xiao-leng, ZU Yan-qun\*, LI Yuan, ZHAN Fang-dong

(College of Resources and Environment, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China)

**Abstract:** Mining activities have contaminated the surrounding soils and crops. A field investigation was conducted in a lead-zinc mine in Yunnan Province to determine concentrations of Cd and Pb in cultivated soils and crops (potato and maize) and to evaluate their health risk. The average contents of Cd and Pb in soils were 12.93 mg·kg<sup>-1</sup> and 2 246.48 mg·kg<sup>-1</sup>, respectively, belonging to heavy pollution. The contents of Cd and Pb in plants were respectively 1.41 mg·kg<sup>-1</sup> and 11.45 mg·kg<sup>-1</sup> in potato and 1.18 mg·kg<sup>-1</sup> and 12.50 mg·kg<sup>-1</sup> in maize. Significant positive relationship was observed between soil Cd and soil Pb contents, and between soil available Cd and soil total P content and available P contents. At soil pH≤6.5, total Cd and Pb were significantly positively correlated with total P and available P. The present results indicate that soil and crop contamination by heavy metals from mining has threatened the health of local residents.

**Keywords:** heavy metal; soil; crop; pollution; health risks

重金属污染会导致农田土壤退化,农作物减产,且会通过食物链影响人体的健康和安全。因此,采矿企业周边耕地的重金属污染问题也受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>,特别是与粮食生产关联的土壤重金属污染更是受到普遍重视<sup>[4-5]</sup>。研究区域农田土壤重金属含量的空间差异与污染源之间的关系、评估及预测区域土壤重金属污染风险,对于农田土壤重金属的污染治理、

污染风险分区以及作物种植的重金属污染规避等均具有重要的意义<sup>[6]</sup>。

云南省是著名的有色金属王国,对于各大铅锌矿区附近的土壤重金属调查已有研究报道<sup>[7]</sup>,但大多局限于单独对土壤或农作物的评价。本研究旨在从云南省某铅锌矿区周边农田土壤及农作物中重金属 Cd、Pb 含量、土壤理化性质,土壤重金属分布特征三个方面分析该区域农田重金属污染状况,进一步了解当地土壤受重金属污染的程度,并以国家土壤环境质量标准结合单因子污染指数和内梅罗综合污染指数法对该区域土壤重金属污染进行评价,为揭示矿区周边农田重金属污染特征和污染治理提供科学依据。

收稿日期:2014-03-25

基金项目:国家自然科学基金-云南省联合基金(U1202236)

作者简介:邹小冷(1988—),男,安徽滁州人,硕士研究生,主要从事重金属空间分布和污染评价研究。E-mail:zouxiaoleng@gmail.com

\*通信作者:祖艳群 E-mail:zuyanqun@ynau.edu.cn

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区 (26°34′~27°38′N, 103°36′~103°42′E) 位于会泽县城东南 40 km, 平均海拔 2216 m, 相对高差 312 m, 采样范围覆盖城郊玛色卡村到铅锌矿区及冶炼厂间公路周边农田, 当地农民种植的主要农作物为玉米 (*Zea mays* L.)、马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 和水稻 (*Oryza sativa*), 其次为大豆 (*Glycine max*) 和荞麦 (*Fagopyrum tataricum*) 等<sup>[8]</sup>。

### 1.2 样品布点及采集

在研究区的主要农田区域内每隔 500 m 左右布点 (排除受人为干扰严重的点位, 如村庄、企业等), 并在每个点位沿公路两侧垂直方向并种植作物的位置间隔 100 m 左右布点, 在冶炼厂处考虑冶炼过程中烟囱排放气体沉降污染的影响采用网格布点法, 在玛色卡村耕地内按间距 50 m 左右采用网格布点法采样 (图 1)。采集作物时, 每点选取 3~5 株作物的果实合成一个混合样。采样期间, 使用 GPS (Dakota 20 型) 确定并记录该点具体坐标, 同时采集作物生长位置表层 0~20 cm 土壤样品 1 kg, 使用洁净的聚乙烯塑料袋装样备用。土壤样品和作物样品各采集 48 个。

### 1.3 样品处理及测定方法

用自来水和 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 稀盐酸洗净植物样品, 用去离子水淋洗 2~3 次, 于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 70 °C 烘箱中烘干 2 d。使用 DFY-300 型不锈钢粉碎机粉碎烘干样品, 过筛保存备用。土壤样品避光自然风干, 充分搅拌混匀后过 1 mm 筛用于测定土样中重金属有效态含量, 过 0.25 mm 筛用于测定土样中重金属全量。植物样品的 Cd、Pb 含量测定用浓 HNO<sub>3</sub> 加热完全消解后利用火焰原子吸收分光光度法。土壤样品的 Cd、Pb 有效态分析测定采用 DTPA-TEA 浸提法<sup>[9]</sup>。土壤样品的 Cd、Pb 全量分析采用先经 HF-HClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub> 消煮<sup>[10]</sup>, 然后用 SpectraAA-220Z 型石墨炉原子吸收分光光度计测定 Cd 元素含量, 用 TAS-986 型原子吸收分光光度计测定 Pb 元素含量。土壤样品 pH 值 (水土比 2.5:1) 用 pH 计测定, 其有机质、总磷、速效磷、CEC、粒径分析分别用重铬酸钾容量法、NaOH 熔融-钼锑抗比色法、浸提剂-钼锑抗分光光度法、BaCl<sub>2</sub>-MgSO<sub>4</sub> (强迫交换法)、比重计法测定。

### 1.4 数据计算及统计

#### 1.4.1 土壤重金属污染现状评价方法

单因子污染指数法:

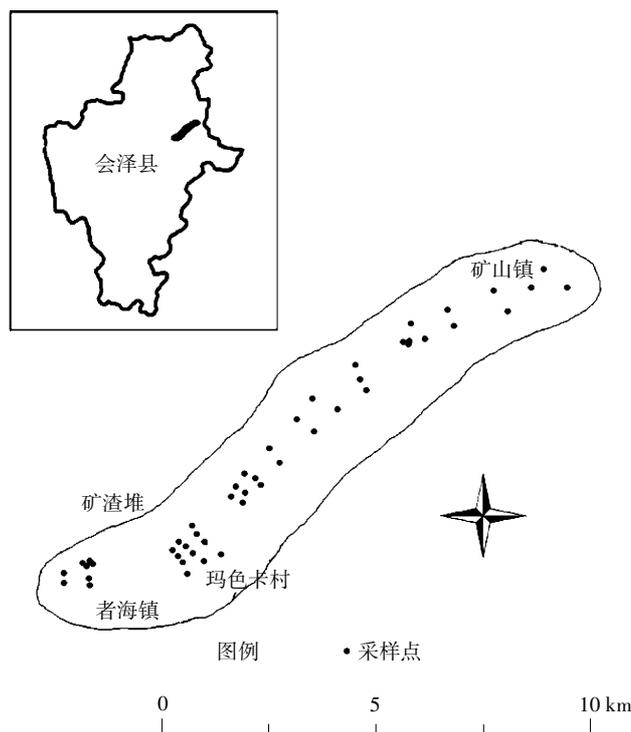


图 1 调查采样点分布

Figure 1 Distribution of sampling sites

$$P_i = C_i/S_i$$

式中:  $P_i$  为计算出的污染物的单项重金属污染指数;  $C_i$  为  $i$  污染物的重金属含量实测值;  $S_i$  为  $i$  污染物的重金属含量评价标准值 (GB 15618—1995)。

内梅罗综合污染指数法<sup>[11]</sup>:

$$P_n = \{ [(C_n/S_n)_{\max}]^2 + (C_n/S_n)_{\text{ave}}^2 \}^{1/2}$$

式中:  $P_n$  为计算出的污染物的内梅罗综合污染指数;  $(C_n/S_n)_{\max}$  为污染物单因子指数中的最大值;  $(C_n/S_n)_{\text{ave}}$  为污染物单因子指数的平均值。

依据单因子指数法和内梅罗综合污染指数法可将土壤重金属污染划分为 5 个等级, 如表 1 所示。

#### 1.4.2 采样区域 Cd、Pb 分布作图与分析

用 SPSS 11.5 进行指标的描述性分析, 用 ArcGIS 8.3 的地统计模型模块进行 Kriging 内插, 作重金属空间分布图。

#### 1.4.3 粮食作物重金属生态风险评价

依据国家粮食卫生标准 (GB 2715—2012) 进行作物重金属生态风险评价。

该标准明确规定粮食作物中污染物限量指标为: Cd (镉) 的含量不得高于 0.1 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb (铅) 的含量不得高于 0.2 mg·kg<sup>-1</sup>。

表 1 土壤重金属污染等级标准

Table 1 Criteria for classification of soil heavy metal pollution

等级划分	单项污染指数	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_i \leq 0.7$	$P_n \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_n \leq 1.0$	警戒限	尚清洁
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_n \leq 2.0$	轻污染	土壤开始受到污染
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_n \leq 3.0$	中污染	土壤受中度污染
5	$P_i > 3.0$	$P_n > 3.0$	重污染	土壤受污染已相当严重

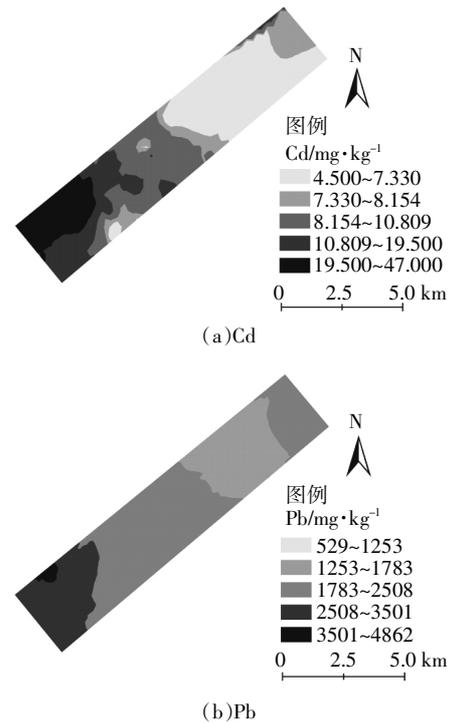


图 2 土壤中 Cd、Pb 总量分布图

Figure 2 Distribution of total Cd and Pb in soils

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤重金属含量及分布特征

土壤与作物中 Cd 和 Pb 含量见表 2。Cd 和 Pb 在研究区土壤中的含量均呈现出在铅锌矿区和铅锌冶炼厂两端较高,而在中间公路地带及玛色卡村落下降趋势,整体呈现出两端大中间小的现象。且对于 Cd 来说,在较开阔的玛色卡村落耕地处,随着沿垂直公路方向公路间距离的加大,Cd 的含量出现明显下降趋势(图 2)。

以铅锌矿区为起始点将所有采样点按等距 2 km 分段分析,土壤中重金属 Cd、Pb 的平均含量随距离的变化趋势见图 3。土壤中 Cd 平均含量的最小值( $5.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )出现在距离铅锌矿区 4 km 处,最大值含量( $32.98 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )出现在距离铅锌矿区 12 km 处(即铅锌冶炼厂所在地附近);Pb 平均含量的最小值( $1402.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )出现在距离铅锌矿区 4 km 处,最大值含量( $3474.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )出现在距离铅锌矿区 12 km 处,且 12 km 处含量显著高于其他点位。

### 2.2 土壤重金属含量的影响因素

土壤的理化性质参见表 3。对土壤理化参数与土壤重金属元素 Cd、Pb 全量及有效态含量进行相关性分析(表 4)表明,土壤中 Cd 与 Pb 表现出极显著的正相关关系,土壤中 Cd 与总 P、速效 P 表现出极显著的正相关关系。当  $\text{pH} \leq 6.5$  时,全量 Cd 与总 P、速效 P 呈极显著正相关关系,全量 Pb 与总 P、速效 P 呈极显

著正相关关系,与 CEC 亦呈显著正相关关系; $6.5 \leq \text{pH} \leq 7.5$  时,全量 Cd 与总 P、速效 P 呈极显著正相关关系,与 pH 呈显著负相关关系。有机质和土壤粒径组成与土壤重金属含量均没有相关性。

### 2.3 土壤 Cd、Pb 污染评价及作物中 Cd、Pb 含量的风险评价

研究区土样 pH 的平均值为 6.46,偏酸性,最大值为 7.30,最小值为 5.09。在 48 个样点中, $\text{pH} \leq 6.5$  的点位有 22 个,对应国家土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995)中  $\text{Cd} \leq 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} \leq 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的标准。 $6.5 \leq \text{pH} < 7.5$  的点位有 26 个,对应国家土壤环境质量二级标准中  $\text{Cd} \leq 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $\text{Pb} \leq 300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的标准。

土地样点中 Cd 含量单因子污染指数  $P_i$  的平均值为 43.10,最大值为 156.27,最小值为 15.58,对比国家土壤环境质量二级标准超标率达 100%,属于重污

表 2 土壤及作物中重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

Table 2 Contents of Cd and Pb in soils and crops

项目	Cd 含量				Pb 含量			
	最大值	最小值	平均值	变异系数	最大值	最小值	平均值	变异系数
土壤全量	46.88	4.68	12.93	81%	4862.19	529.84	2246.48	44%
土壤有效态	13.16	0.47	2.86	124%	324.36	66.27	203.81	30%
玉米	2.05	0.68	1.18	23%	29.48	5.81	12.50	48%
马铃薯	2.75	0.70	1.41	42%	17.25	6.48	11.45	31%

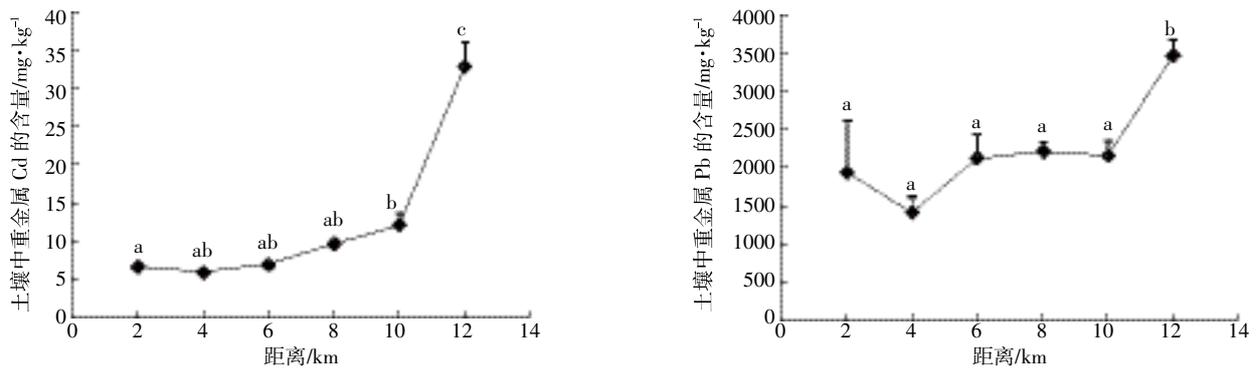


图3 与铅锌矿区不同距离点位重金属含量

Figure 3 Contents of soil heavy metals at different distances from lead-zinc mining

表3 土壤理化性质

Table 3 Physical and chemical properties of soils

统计参数	样品量	最小值	最大值	平均值	中位值	标准差	变异系数
pH	48	5.09	7.30	6.46	6.56	0.50	7%
有机质/g·kg <sup>-1</sup>	48	7.57	41.29	20.71	20.88	8.79	42%
总 P/g·kg <sup>-1</sup>	48	6.25	28.70	13.88	13.51	4.27	31%
速效 P/g·kg <sup>-1</sup>	48	4.21	25.19	10.18	9.50	4.02	39%
CEC/cmole·kg <sup>-1</sup>	48	16.46	38.30	29.08	29.41	4.50	15%
砂粒/%	48	16.51	67.7	38.72	36.43	13.47	35.28
粘粒/%	48	20.87	62.62	36.89	36.05	9.15	25.20
粉粒/%	48	5.69	49.34	24.39	23.72	11.81	48.91

表4 土壤重金属元素与土壤理化指标相关性分析

Table 4 Correlation between heavy metal contents and soil physical and chemical properties

pH 范围	Y	x/mg·kg <sup>-1</sup>	方程	R <sup>2</sup>	F	n	P
5.09~7.30	总量 Pb/mg·kg <sup>-1</sup>	总量 Cd	Y=62.90x+1432	0.44	36.03	22	<0.01
	总 P/g·kg <sup>-1</sup>	有效态 Cd	Y=0.83x+11.51	0.47	41.27	22	<0.01
	速效 P/g·kg <sup>-1</sup>	有效态 Cd	Y=0.68x+8.24	0.36	25.80	22	<0.01
pH≤6.5	总 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Cd	Y=0.31x+10.42	0.60	30.43	22	<0.01
	速效 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Cd	Y=0.27x+5.67	0.48	18.60	22	<0.01
	总 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Pb	Y=0.003 4x+7.66	0.61	30.87	22	<0.01
	速效 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Pb	Y=0.002 5x+4.266	0.35	10.64	22	<0.01
	CEC/cmole·kg <sup>-1</sup>	总量 Pb	Y=0.001 8x+24.03	0.23	5.82	22	<0.05
6.5≤pH≤7.5	总 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Cd	Y=0.28x+9.82	0.46	20.44	22	<0.01
	速效 P/g·kg <sup>-1</sup>	总量 Cd	Y=0.28x+7.48	0.52	26.09	22	<0.01
	pH	总量 Cd	Y=-0.009 9x+6.94	0.16	4.67	22	<0.05

染,土壤受 Cd 污染已相当严重;48 个样点中 Pb 含量  $P_i$  的平均值为 8.15,最大值为 17.84,最小值为 2.12,其中  $2.0 < P_i \leq 3.0$  的点位有 3 个,超标率为 6.3%,属于中度污染, $P_i > 3.0$  的点位有 45 个,超标率为 93.7%,属于重污染,土壤受 Pb 污染已相当严重。根据内梅罗综合污染指数法评价:样点中重金属含量综合污染指数  $P_n$  值为 111.98,达到重污染等级,说明该采样区域土壤都已受到严重污染。

马铃薯内 Cd、Pb 含量分别为 1.41、11.45 mg·kg<sup>-1</sup>,玉米籽粒中 Cd、Pb 含量分别为 1.18、12.50 mg·kg<sup>-1</sup>。对照国家食品卫生标准(GB 2715—2012);研究区域内种植马铃薯中 Cd 含量平均为国家粮食标准的 14.1 倍,Pb 含量平均为国家粮食标准的 57.25 倍;玉米籽粒中 Cd 含量平均为国家粮食标准的 11.8 倍,Pb 含量平均为国家粮食标准的 62.5 倍。

分别对马铃薯与玉米可食部分的 Cd、Pb 含量与

对应采样点土壤中Cd、Pb含量分析可知:马铃薯与玉米可食部分Cd含量与土壤中Cd含量呈极显著正相关关系(图4),而Pb含量关系不显著。马铃薯对土壤中Cd元素的富集系数平均值为18.00%,最大值为25.30%,最小值为14.24%;玉米籽粒对土壤中Cd元素的富集系数平均值为11.29%,最大值为19.21%,最小值为2.77%。可食部分富集土壤中Cd元素的能力马铃薯大于玉米。

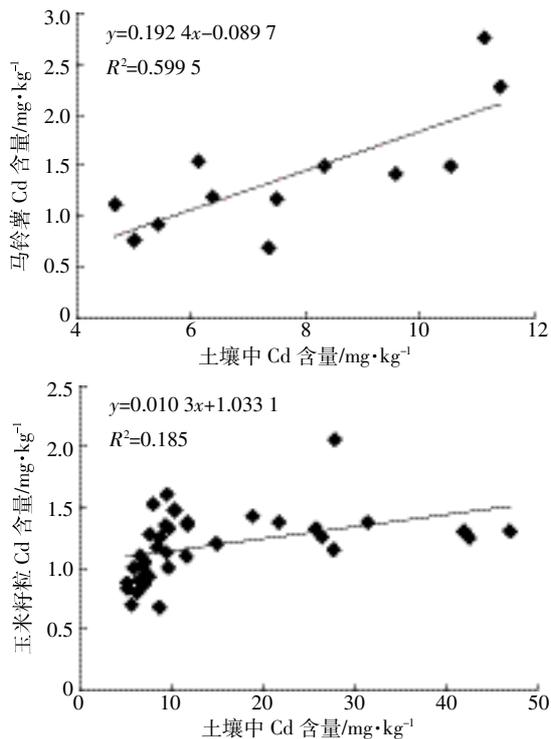


图4 马铃薯及玉米可食部分重金属Cd含量

Figure 4 Cadmium contents in edible parts of potato and maize

### 3 讨论

本研究中土壤Cd的含量(4.68~46.88 mg·kg<sup>-1</sup>)与房辉等对会泽废弃铅锌矿复垦地和撂荒地农田调查结果中Cd的含量(31.53~45.27 mg·kg<sup>-1</sup>)相近<sup>[7]</sup>,Cd与Pb的含量也远高于全国土壤背景值基本统计量(Cd 0.10 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb 26.00 mg·kg<sup>-1</sup>)与云南土壤背景值含量(Cd 0.22 mg·kg<sup>-1</sup>, Pb 40.60 mg·kg<sup>-1</sup>)<sup>[12]</sup>。研究区域农田土壤Cd、Pb含量较高主要的原因可能是长期土法冶炼导致的重金属高度累积,且该区域附近的矿山仍然在运作,人为干扰较大。由于开矿初期选矿技术落后,再加上矿渣堆选择位置不当,使得矿渣堆的渗漏成为后期污染的一个隐患点,大量含矿的粉砂质泥岩、粉砂岩,经选矿的破碎、磨矿工序后成为粉末状,

经浮选后堆积形成矿渣堆,磨碎后的尾矿接触水面积更宽,重金属离子向水体迁移的机会更多,渗出的污染水对土壤的污染程度更严重。尤其在丰水期,大量的污染水通过层面裂隙排泄到下游的大片耕地中,使污染物在耕地中积累并造成污染<sup>[13]</sup>。

随着与铅锌矿区和冶炼厂距离增大,土壤中Cd、Pb含量在铅锌矿区和冶炼厂的中间路段都出现下降的趋势,含量最低的点都出现在离铅锌矿区2 km左右的位置,最高点都出现在矿渣堆附近。矿渣堆位置的重金属含量显著高于铅锌矿区的含量,说明铅锌矿区和矿渣堆都可能是该区域重金属Cd、Pb污染的源头,且矿渣堆对当地Cd、Pb重金属的污染贡献已超过铅锌矿区。同时除去铅锌矿区及矿渣堆两个端点外的整个公路路段中,Cd、Pb含量没有出现明显差异,而靠近公路的Cd、Pb含量超过了远离公路且海拔较低的玛色卡村落,说明公路上运输矿物原料的汽车及丰水期的雨水地表径流可能也是造成污染的主要途径。因此,有关部门要严格管理,让矿渣堆废水废气达标排放并规范公路运输环节,从源头减轻当地重金属污染情况。

马铃薯与玉米可食部分的Cd含量与土壤中Cd含量都表现出了极显著的相关性,可食部分的富集系数分别为18.00%与11.29%,对比国家食品卫生标准,推测当土壤重金属Cd含量达到0.56 mg·kg<sup>-1</sup>的时候,当地种植的马铃薯可食部分内Cd含量可能就会超标;当土壤重金属Cd含量达到1.77 mg·kg<sup>-1</sup>时,种植的玉米籽粒中Cd含量可能也会超标。通过马铃薯与玉米中重金属含量分别与国家食品卫生标准(GB 2715—2012)对比,该地区污染耕地上种植的作物已经超过了安全标准,不适合继续种植和食用。

研究区域内土壤有机质含量及土壤粒径组成与土壤重金属含量均没有表现出显著相关性,可能与人为的土壤改良行为有关,特别是在河谷区常有人为将大量山地土壤混入耕地的现象。

云南当地发现存在着如小花南芥、续断菊等对Cd、Pb等重金属累积能力很强的超累积植物<sup>[14-15]</sup>,在不会造成外来生物入侵的威胁下,加大小花南芥、续断菊等本土植物的种植面积也可以在一定程度上发挥修复重金属污染的作用。

### 4 结论

对比国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中二级标准,调查区农田土壤中Cd属于重度污染,

Pb 属于中度污染或重度污染。土壤中重金属 Cd、Pb 含量与土壤理化性质间的关系复杂。内梅罗综合污染指数法评价该区域土壤受到严重污染,结果显示从整个研究区域来看,总的污染趋势是矿渣堆>铅锌矿区>公路路段>玛色卡村落,矿渣堆处的土壤受重金属污染最严重。当地种植的马铃薯和玉米可食部分中重金属 Cd、Pb 的含量都已超出国家粮食安全标准(GB 2715—2005),均存在健康风险。

#### 参考文献:

- [1] 雷东梅,段昌群,王 明. 云南不同矿区废弃地土壤肥力与重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):612-616.  
LEI Dong-mei, DUAN Chang-qun, WANG Ming. Soil fertility and heavy metal contamination in abandoned regions of different mine tailings in Yunnan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 612-616.
- [2] 郭 伟,赵仁鑫,张 君,等. 内蒙古包头铁矿区土壤重金属污染特征及其评价[J]. 环境科学, 2011, 32(10):3099-3105.  
GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHANG Jun, et al. Distribution characteristic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 3099-3105.
- [3] 尹仁湛,罗亚平,李金城,等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2158-2165.  
YIN Ren-zhan, LUO Ya-ping, LI Jin-cheng, et al. Evaluation of the potential ecological risk of heavy metal pollution in soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in Siding Pb-Zn mine[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6): 2158-2165.
- [4] Douay F, Roussel H, Fourrier H, et al. Investigation of heavy metal concentrations on urban soils, dust and vegetables nearby a former smelter site in Mortagne du Nord, Northern France[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(3): 143-146.
- [5] Tume P, Bech J, Sepulveda B, et al. Concentrations of heavy metals in urban soils of Talcahuano (Chile): A preliminary study[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 140(1-3):91-98.
- [6] 周脚跟,宋变兰,尤冬梅. 土壤重金属污染风险预测研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22):10617-10619, 10622.  
ZHOU Jiao-gen, SONG Bian-lan, YOU Dong-mei. Research progress on prediction of soil heavy metal contamination risk[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(22): 10617-10619, 10622.
- [7] 房 辉,曹 敏. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 2009, 28(7):1277-1283.  
FANG Hui, CAO Ming. Assessment of heavy metals pollution in abandoned lead-zinc mine tailings in Huize of Yunnan Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(7): 1277-1283.
- [8] 王宏宾,文传浩,谭晓勇,等. 云南会泽铅锌矿矿渣废弃地植被重建初探[J]. 云南环境科学, 1998, 17(2):43-46.  
WANG Hong-bin, WEN Chuan-hao, TAN Xiao-yong, et al. An investigation on the pioneer plant community of slag spoils of lead and zinc mine, Huize, Yunnan Province and a primary conception of revegetation[J]. *Yunnan Environmental Science*, 1998, 17(2): 43-46.
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000.  
BAO Shi-dan. Analysis of soil and agrochemicals[M]. Third edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [10] 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, 1999:474-489.  
LU Ru-kun. The chemical analysis methods for soil in agricultural[M]. Chinese Agriculture Science and Technology Press, 1999: 474-489.
- [11] 陈怀满. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社, 2005:522-523.  
CHEN Huai-man. Environmental Soil Science[M]. Beijing: Science Press, 2005: 522-523.
- [12] 赵其国. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:98-367.  
ZHAO Qi-guo. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990: 98-367.
- [13] 程 峰,王星华,莫时雄,等. 金属矿山污染土壤的重金属迁移特性研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2012, 64(3):54-57.  
CHENG Feng, Wang Xing-hua, MO Shi-xiong, et al. Research on migration characteristics of heavy metal in the metal mining contaminated soil[J]. *Nonferrous metals (Mining Section)*, 2012, 64(3): 54-57.
- [14] 湛方栋,何永美,李 元,等. 云南会泽废弃铅锌矿区和非矿区小花南芥根际真菌的耐镉性[J]. 应用与生物环境学报, 2010, 16(4):572-576.  
ZHAN Fang-dong, HE Yong-mei, LI Yuan, et al. Cadmium tolerance of Rhizosphere Fungi of *Arabis alpina* in abandoned lead-zinc mining and non-mining area in Huize, Yunnan, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 16(4): 572-576.
- [15] 秦 丽,祖艳群,湛方栋,等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3):471-477.  
QIN Li, ZU Yan-qun, ZHAN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. HILL. and maize in intercropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 471-477.