李三中,徐华勤,陈建安,等.某矿区砷碱渣堆场周边土壤重金属污染评价及潜在生态风险分析[J].农业环境科学学报,2017,36(6):1141-1148. LI San-zhong, XU Hua-qin, CHEN Jian-an, et al. Pollutions and potential ecological risk of heavy metals in soils around waste arsenic-containing alkaline sites[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6): 1141-1148.

# 某矿区砷碱渣堆场周边土壤重金属污染评价 及潜在生态风险分析

李三中<sup>1,3</sup>,徐华勤<sup>2\*</sup>,陈建安<sup>1</sup>,李建胜<sup>1</sup>,代枝兴<sup>1</sup>,刘光明<sup>1</sup>,杨 晶<sup>1</sup>,赵俊龙<sup>1</sup>,王 勇<sup>1</sup> (1.冷水江市环境保护局,湖南 冷水江 417500; 2.湖南农业大学农学院,长沙 410128; 3.冷水江市环境保护监测站,湖南 冷水江 417500)

**摘 要:**为了解湘中某矿区砷碱渣堆场周边土壤的重金属污染特征,对堆场周边土壤中 Hg、As、Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 7 种重金属含量进行采样,分析其污染特征和来源,并对潜在生态风险进行评价。结果表明:堆场周边土壤中 Hg、As、Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 7 种重金属含量进行采样,分析其污染特征和来源,并对潜在生态风险进行评价。结果表明:堆场周边土壤中 Hg、As、Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 平均质量分数分别为 2.61、209、41.3、209、3.49、4.34、45.7 mg·kg<sup>-1</sup>,其中 Hg、As、Pb、Zn、Cd 平均含量分别是背景值的 22.5、13.3、1.39、2.21、27.7 倍。地累积指数评价结果显示,Hg、As、Cd 单项 *I<sub>go</sub>*达到严重累积污染级别的比例分别为 25%、6.25%、18.8%。多种重金属潜在生态风险评价表明,区域内所有点位的潜在生态风险指数均在"强"及以上风险等级,其中 62.5%的点位为"很强"等级,区域总体处于"很强"风险等级。多元统计表明,Hg、As、Pb、Cu、Zn、Cd 主要来源于矿山开采、冶炼和交通运输,Cr 来源于成土母质。 **关键词**:土壤重金属;污染评价;砷碱渣堆场;生态风险

中图分类号:X820.4 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)06-1141-08 doi:10.11654/jaes.2016-1678

#### Pollutions and potential ecological risk of heavy metals in soils around waste arsenic-containing alkaline sites

LI San-zhong<sup>1,3</sup>, XU Hua-qin<sup>2\*</sup>, CHEN Jian-an<sup>1</sup>, LI Jian-sheng<sup>1</sup>, DAI Zhi-xing<sup>1</sup>, LIU Guang-ming<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>1</sup>, ZHAO Jun-long<sup>1</sup>, WANG Yong<sup>1</sup>

(1.Lengshuijiang Municipal Environmental Protection Bureau, Lengshuijiang 417500, China; 2.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3.Lengshuijiang City Environmental Protection Monitoring Station, Lengshuijiang 417500, China)

Abstract: It is important to control the spatial distribution and pollution of heavy metals in soil environment, Although the potential ecological risk index method has already been widely applied on the assessment of heavy metals pollution in different types of industrial areas, there are few concerned about heavy metal contents in the surrounding soils of mixed smelting slag(arsenic residue and slag). In this study, arsenic residue in the middle of Hunan Province was sampled and the contents of Hg, As, Pb, Zn, Cd, Cu and Cr of the soil and the soil characteristics were analyzed. The results showed that the average mass fraction of Hg, As, Pb, Zn, Cd, Cu and Cr in the soil were 2.61, 209, 41.3, 209, 3.49, 4.34, 45.7 mg·kg<sup>-1</sup>. The average contents of Hg, As, Pb, Zn and Cd were 22.5, 13.3, 1.39, 2.21 and 27.7 times than the background value, respectively. The pollution extent of heavy metals in soils by geo-accumulation index ( $I_{gro}$ ) showed that the average potential ecological risk index of all the samples is above the conderable ecological risk level, of which 62.5% is very high ecological risk, and the area is in very high ecological risk graded. The results also showed that Hg, As, Pb, Cu, Zn and Cd are mainly derived from mining, smelting and transportation. While Cr is derived from soil parent material.

Keywords: soil heavy metals; pollutions assessment; waste arsenic-containing alkaline site; ecological risk

收稿日期:2016-12-30

作者简介:李三中(1970—),环保工程师,主要从事土壤修复和评价。E-mail:lsz123456789000@163.com

<sup>\*</sup> 通信作者:徐华勤 E-mail:xu7541@163.com

基金项目:国家自然科学基金项目(31100382)

Project supported : The National Natural Science Foundation of China (31100382)

农业环境科学学报 第36卷第6期

土壤是人类赖以生存的重要资源,其健康状况 直接影响农产品的品质和安全,并威胁人类健康及 生态安全<sup>[1]</sup>。人类活动的过度干扰,致使土壤污染日 益凸显,尤其是重金属污染,已引起社会的高度关 注<sup>[2-3]</sup>。掌握土壤环境中重金属的空间分布与污染程 度,对治理土壤重金属污染以及预防重金属污染事件 有着重要作用。

国内外对土壤重金属的来源分析、分布特征以及 污染程度等都有初步研究<sup>[4-5]</sup>。自 Häkanson<sup>[6]</sup>于 1980 年提出潜在生态风险指数评价方法以来,虽然有学者 将潜在生态风险指数法运用于不同类型工业区周边 土壤重金属研究<sup>[7-9]</sup>,但是少有专门对矿山开采和混合 冶炼废渣(砷碱渣和炉渣)堆放场地周边土壤的重金 属含量、来源、污染状况进行研究。冷水江锡矿山是我 国锑冶炼最集中的地区,在火法炼锑时加入纯碱或烧 碱对粗锑进行精炼过程中产生了大量砷碱渣,其中的 砷及其化合物有剧毒且易溶于水,砷碱渣与一般固体 废物(炉渣和建筑垃圾)一起被遗弃野外(称为野外混 合渣)。经过近120年的开采、冶炼,使得土壤中重金 属不断积累、富集,造成大面积土壤污染和潜在生态 风险,对周边人群健康产生极大威胁,并曾引发附近 居民重金属中毒事件<sup>10]</sup>。据统计,锡矿山地区受重金 属污染耕地面积共有2054.9 hm<sup>2</sup>,其中已不再适合作 为耕地利用的重度污染面积1112.3 hm<sup>2</sup>,基本不适合 耕种的中度污染土壤面积 782.7 hm², 土壤轻度污染 的面积 129.7 hm<sup>2</sup>;石漠化面积达 5 333.3 hm<sup>2</sup>,森林覆 盖率仅为8%。为了解野外混合渣对环境的影响,探 讨历史遗留环境问题,以锑冶炼核心区野外混合渣堆 场周边土壤为研究对象,用单因子污染指数法、地累 积指数法、潜在生态风险指数法进行污染特征和环境 生态风险评价,并用多元统计方法判别污染来源,为 混合渣堆场周边土壤重金属污染治理和生态修复提 供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

冷水江市位于北纬 27°30′49″~27°50′38″, 东经 111°18′57″~111°36′40″之间, 市域面积 439 km², 辖 10 个乡镇(办)和1个经济开发区,总人口 38万, 是一座 典型的资源型工矿城市, 属湘江保护与治理五大重点 实施区域之一, 是全国 138个重金属污染重点防控区 之一。地势南北高、中部低, 呈不对称马鞍形, 境内北 部与南部均为山地, 属于亚热带大陆性季风气候, 光 照充足,四季分明,年均气温 16.5 ℃,年均降水量 1648 mm。

锡矿山地区位于冷水江市西北部,总面积 116 km<sup>2</sup>,总人口 6.3万,是世界最大的锑产品生产、贸易、 研发基地;锑探明储量超过 200万 t,居世界首位,为 全国储量的三分之二,锑产量占全球的 60%。污染核 心区主要集中在锡矿山街道办事处,涉及 11 个村 (居)的 6410人,并影响到资江冷水江段和下游新化、 安化及洞庭湖区的饮用水安全。锡矿山地区历史遗留 野外混合渣主要分布于青丰河和涟溪河流域,矿山乡 谭家村和锡矿山街道办事处辖区陶塘、光荣、长龙界、 七星、七里江、艳山红、飞水岩、双木等居委会境内。遗 留渣场总占地面积为 281 500 m<sup>2</sup>。

### 1.2 样品采集和处理

依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166-2004)<sup>四</sup>的规定及国家标准分析方法的要求,按照企 业和堆场位置分布依地形在现有混合渣堆场周边土 壤设 16 个采样点位,采集 0~20 cm 土壤样品 48 份, 每个采样点采集3个样品,每个样品由2~4个分样组 成,各分样充分混合后以四分法取1000g土样于阴 凉处风干,剔除杂物,研磨后过100目筛备用。采样点 位布设位置见图 1。称量 0.1000g 备用样品,以体积 比 3:1:1:1 的盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸混合消解,加 热冒烟直至蒸干,冷却后用1%的硝酸浸取定容至10 mL。以原子吸收分光光度计(北京普析,TAS-990F) 测定Zn、Cu、Cr,以石墨炉原子吸收光谱仪(德国耶 拿, AASZeenit600/650)测定 Cd、Pb,采用原子荧光光 度计(北京海光, AFS230)测定 Hg、As。分析测试试剂 均为优级纯,分析方法准确度和精密度采用国家一级 土壤标准物质 GBW07349 和平行样品进行控制,回 收率在 95%~105%之间,相对误差在-5%~+5%。

- 1.3 评价方法
- 1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数计算公式如下[12]:

$$P_{i} = \frac{C_{i}}{S_{i}}$$
$$P_{k} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} P_{i}$$

式中: $P_i$ 为重金属 i 的单因子污染指数; $C_i$ 为样品中 重金属实测质量分数,mg·kg<sup>-1</sup>; $S_i$ 为重金属 i 的标准 值,mg·kg<sup>-1</sup>,本文取《土壤环境质量标准》(GB 15618— 1995)<sup>[13]</sup>三级标准; $P_i$ 为各点位单因子污染指数平均 值。



通过将土壤污染物分担率按大小排序,可以评价 确定土壤的主要污染项目,土壤污染物分担率(%)= 单项污染物指数/各项污染物指数和×100<sup>[4]</sup>。

# 1.3.2 地累积指数法

2017年6月

采用德国科学家 Müller 于 1969 年提出来的地 累积指数(*I*goo)法<sup>[15]</sup>,定量评价土壤中重金属污染累积 程度,*I*goo分级见表 3<sup>[17-18]</sup>。计算公式如下:

 $I_{\text{geo}} = \log_2[C_i/(1.5B_i)]$ 

式中:*C<sub>i</sub>*为样品中元素*i*的实测质量分数,mg·kg<sup>-1</sup>;*B<sub>i</sub>*为参比值,即元素*i*的地球化学背景值,mg·kg<sup>-1</sup>,本研究取湖南省土壤背景值<sup>10</sup>(表 2);1.5 为各地岩石差异可能会引起背景值变动的系数。

为比较各个点位的重金属综合污染程度,本研究引用均方根综合指数(*R*<sub>MS</sub>)<sup>119</sup>进行分析。计算公式为:

$$R_{\text{MS}} = \sqrt{\sum \left[ (I_{\text{geo}})_i \right]^2 / n}$$

1.3.3 潜在生态风险指数法

采用瑞典科学家 Häkanson<sup>16</sup>于 1980 年提出的方法计算潜在生态风险指数(*RI*),计算公式如下:

$$RI = \sum E_i = \sum \left( T_i \times C_i^f \right) = \sum \left[ T_i \times \left( \frac{C_i}{C_i^s} \right) \right]$$

式中: $C_i$ 为表层沉积物中重金属i的实测质量分数; $C_i$ 为重金属i的参比值,本研究采用湖南省土壤元素背景值<sup>[16]</sup>; $C_i$ 为重金属i的污染系数; $T_i$ 为重金属i的毒性响应系数(Hg 40、Cd 30、As 10、Pb 5、Cu 5、Cr 2、Zn 1),主要反映重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度<sup>[6]</sup>; $E_i$ 为重金属i的潜在生态风险系数。

 $E_i$ 和 RI 分级标准见表 1。

表1 生态风险系数、指数和风险程度分级

Table 1 Ecological risk coefficient, risk index and classification of risk intensity

of fish intenerty						
$E_i$	生态风险程度	RI	生态风险程度			
$E_i \leq 40$	低	$RI \leq 150$	轻微			
$40 \le E_i < 80$	中	$150 \leq RI < 300$	中等			
$80 \le E_i < 160$	较重	$300 \leq RI < 600$	强			
$160 \le E_i < 320$	重	$600 \leq RI$	很强			
$320 \leq E_i$	严重					

## 2 结果与讨论

## 2.1 土壤重金属含量特征

土壤中 Hg、As、Pb、Zn、Cd、Cu、Cr 平均含量分别 为 2.61、209、41.3、209、3.49、4.34、45.7 mg·kg<sup>-1</sup>。其中 Hg、As、Pb、Zn、Cd平均含量分别是背景值的22.5、 13.3、1.39、2.21、27.7 倍, Cu、Cr 平均含量分别比背景 值低 10.8%和 38.4%。As、Cd 和 Hg 污染最明显。变异 系数(CV)能够反映不同采样点之间数据的离散程度, 一般认为 CV≤10%为弱变异,10%<CV<100%为中等 变异,CV≥100%为强变异<sup>[20-21]</sup>。除Cu(53%)、Cr(24%) 外,其余重金属质量分数变异系数范围为110%~ 217%,属强变异类型,说明各点位重金属含量的空间 分布差异很大。所有重金属(除 Cr 外)都不同程度地 出现了极端值,各点位差异明显。Cd在S1、S2的质量 分数最大,可能与锡矿山闪星锑业南炼厂的铟、镉生 产线(已停产)有关。S1、S2位于研究区域南面,相距 锡矿山闪星锑业南炼厂的铟、镉生产线直线距离约 1.4 km,该铟、镉生产线排入大气的含镉烟粉尘受风 向影响并沉降,造成该区域采样点土壤中镉含量较 高。重金属描述性统计结果见表 2。

与《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)三级标准相比:所有点位 Pb、Zn、Cr 没有超过标准;As的超标率为 75%,其中最大超标倍数为 35.3倍;Cd、Hg

表 2 土壤重金属含量的描述性统计结果(mg·kg <sup>-1</sup> )
Table 2 Descriptive statistical parameters of heavy metals in soils
$(\mathbf{m}\boldsymbol{\sigma}\cdot\mathbf{k}\boldsymbol{\sigma}^{-1})$

项目	Hg	As	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr
最小值	0.19	10.23	8.25	14.7	49.7	0.007	26.2
最大值	8.38	1060	213	70.4	949	31.6	64.6
中位数	1.16	116	29.2	19.7	101	0.72	45.8
平均值	2.61	209	41.3	24.3	209	3.49	45.7
背景值	0.116	15.7	29.7	27.3	94.4	0.126	74.1
标准值	1.50	30	500	400	500	1.00	300
标准差	2.96	269.83	47.40	13.26	240.44	7.83	11.22

超标率分别为 43.75%和 37.5%,最大超标倍数分别 为30.6 倍和 4.59 倍。单因子污染指数平均值 *P*<sub>k</sub> 从大 到小排列为As(6.95)>Cd(3.49)>Hg(1.74)>Zn(0.50)> Cr(0.15)>Pb(0.08)>Cu(0.06),污染物分担率主次与 单因子污染指数平均值 *P*<sub>k</sub> 排序相同(图 2),主要污染 因子为 As,其次是 Cd、Hg。





## 2.2 地累积指数评价

表3给出了不同采样点土壤的地累积指数分级和频数。所有样品中,土壤Cr属于无污染;Cu除S5外,也属于无污染;土壤Pb属于无污染和轻度污染的比例分别为81.3%和12.5%;土壤Zn属于无污染、轻度污染和偏中度污染分别占56.3%、25%和12.5%。总体上该区域Pb(-0.52)、Cu(-0.89)、Zn(-0.02)、Cr(-1.33)的I<sub>geo</sub>处于无污染水平。Hg(3.04)、As(2.07)、Cd(1.32)是研究区域污染水平较高的元素,三者中度及以上污染分别占81.3%、56.3%、50%,其中25%、6.25%、18.8%的比例达到严重累积污染级别,说明大部分点位受到Hg、As、Cd严重污染。从空间分布来看,S5(4.27)的土壤综合污染均方根指数(R<sub>MS</sub>)最高, 其累积污染程度是重污染。中等污染点位的R<sub>MS</sub>大小 农业环境科学学报 第36卷第6期

表 3 重金属地积累指数分级频率分布

Table 3 Frequencies of  $I_{geo}$  of heavy metal in soils

八年 I		污染程度	污染频数						
万级 Igeo	Hg		As	Pb	Cu	Zn	Cd	Cr	
0	$I_{\rm geo} \leq 0$	清洁	0	2	13	15	9	4	16
1	$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度污染	1	4	2	1	4	1	
2	$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度污染	2	1			2	3	
3	$2 < I_{geo} \leq 3$	中度污染	7	3	1		1	3	
4	$3 < I_{geo} \le 4$	偏重污染	2	4				2	
5	$4 < I_{geo} \leq 5$	重污染	0	1					
6	$5 < I_{\text{geo}}$	严重污染	4	1				3	

依次为 S7(3.04)>S15(2.68)>S13(2.63)>S8(2.50)> S1(2.46)>S2(2.38)>S4(2.35)>S11(2.27)>S14(2.24)> S16(2.18)。可能由于这些点位与原精锑冶炼企业及 其堆渣场距离较近,粗锑精炼过程产生的砷碱渣随同 炉渣就近倾倒于渣场,砷碱渣中重金属经雨水淋溶进 入土壤,导致重金属在土壤中富集。R<sub>MS</sub>较低的点位所 处位置大多为锑氧粉生产企业所在地及周边区域,锑 氧粉生产过程中产生的炉渣为一般工业固体废物,因 锑氧粉生产企业曾经生产精锑,所以这些企业的堆渣 场中砷碱渣含量相对较少,造成的污染略轻。

#### 2.3 重金属污染的可能来源

土壤重金属元素之间的相关性,可反映元素之间 的关联情况和地球化学性质,并推测可能的来源<sup>[22]</sup>。 利用 SPSS 22.0 对重金属含量进行 Spearman 相关性 分析。结果表明 Pb 和 Cu、Zn、Cd,Cd 和 Zn、Cu 呈现极 其显著的相关性,Cd 和 Cu 之间显著相关,其中 Cu、 Cd、Pb 是亲硫元素,在土壤中能够与硫形成溶解度很 低的硫化物,也能被铁锰氧化物或氢氧化物吸附<sup>[23]</sup>。

Hg、As 和其他土壤重金属的相关性均不显著, Hg、As 的平均质量分数分别超过背景值 21.5、12.3 倍,且 Hg(110%)和 As(125%)的变异系数达到强变 异程度,表明 Hg、As 来自人为污染源。地球上 6~8 成 的 Hg 由人类排放<sup>[24]</sup>,在一定的大气条件下可在大气 中存在 0.5~2 年之久<sup>[25]</sup>,通常以干、湿沉降途径进入土 壤<sup>[26]</sup>。据统计,冷水江 2015 年全市生产原煤 338.5 万 t,发电 64.61 亿 kWh,水泥 239.1 万 t,锑品 5.49 万 t, 煤炭燃烧和金属冶炼是 Hg、As 的主要来源<sup>[27]</sup>。研究区 周边曾长期存在的上百家土法冶炼企业,可能造成了 土壤中 Hg 和 As 的累积。

用 SPSS 22.0 对重金属质量分数进行因子分析, KMO 效度检验值为 0.619,Bartlett 球形度检验的 P 值小于显著性水平 0.05,表明标准化后的数据适合用

作因子分析[28]。根据特征值大于1的原则提取旋转后 的2个主成分,方差累计贡献率为80.7%。第一主成 分表现在 Hg、As、Pb、Cu、Zn、Cd 上有较高的正载荷 (表4),方差贡献率为65.4%。Hg、As、Pb是锑矿开采 和冶炼过程中产生的伴生污染物,同时 Pb 又是机动 车污染的标志性元素[29-30],机动车在燃油燃烧和轮胎 磨损过程中会释放 Cu、Zn、Cd 等元素<sup>[3]</sup>,所以第一主 成分反映的是矿山开采、冶炼和交通运输对该区域土 壤的污染。第二主成分的方差贡献率为 15.3%, Cr 在 该主成分上有较高的正载荷,且质量分数均低于湖南 省土壤含量背景值,其含量一般受地球化学的影响, 主要为地质来源,受控于成土母质<sup>[32]</sup>。

#### 表 4 土壤重金属含量初始和旋转后的主成分载荷矩阵

Table 4 Initial and rotated principal component load matrix of soil heavy metals content

元素 一	初始主席	成分矩阵	旋转后主成分矩阵		
	因子 1	因子 2	因子 1	因子 2	
Hg	0.421	0.045	0.420	0.054	
As	0.826	-0.246	0.830	-0.230	
Pb	0.985	0.041	0.984	0.060	
Cu	0.962	0.149	0.959	0.168	
Zn	0.920	-0.031	0.921	-0.012	
Cd	0.988	-0.020	0.989	0.000	
Cr	0.049	0.991	0.029	0.992	

## 2.4 重金属潜在生态风险评价

所有点位 Pb、Cu、Zn、Cr 的 E<sub>i</sub> 值都不超过 40,4 种元素对该区域的生态环境具有较小的潜在生态风 险。43.8%的采样点中 As 的 Ei 值小于 40, 中-严重等 级占 56.2%,研究区内 As 表现为"较重"生态风险水 平;Hg的Ei值全部达到中等以上,其中62.5%为严重 等级:Cd有75%处于中等到严重等级,其中严重等级 为 31.2%; Hg、Cd 以 900 和 832 的平均生态风险系数 分别贡献了 48%和 44%的风险值, 在区域内处于严 重风险水平。这表明 Hg 和 Cd 是最主要的生态风险 控制因子,As贡献 7%的生态风险值。Hg、Cd和As 的 Ei 结果与污染分担率、地积累指数的主要贡献因 子排序略有区别,与 Hg、Cd 的毒性系数比 As 高有 关,但 Hg、Cd 和 As 的  $E_i$  值与其质量分数、地累积指 数的空间分布基本一致(图 3)。

62.5%点位的潜在生态风险指数(RI)超过了"很 强"风险等级,其他点位则是"强"等级,研究区域综合 RI为1880,整体表现为"很强"等级生态风险。RI值

处于前两位的点位是 S5、S7,可能与 S5 位于已拆除 的七星锑品厂场地,S7位于志荣锑业公司南面下风 向有关。总体上看,三种方法的评价结果均表明 Hg、 Cd、As 是主要污染因子,土壤受 Hg、Cd、As 的污染很 严重。锡矿山地区已集中入库的无责任主体砷碱渣约 10万t,还有67.2万t野外混合渣和超过1400万t其 他二类工业固废裸露堆放,经雨水浸淋产生的渗滤水 以及冶炼过程排放的废气、烟粉尘的干湿沉降是造成 研究区域土壤重金属污染的重要原因。

本研究主要围绕锑冶炼核心区堆场周边土壤重 金属开展,结合多种方法评价了研究区土壤重金属污 染状况。根据现有企业生产情况以及锡矿山锑产业发 展历史,建议在更大范围内进行土壤重金属污染调 查,进一步研究重金属与土壤微生物、矿物质和有机 物之间的相互作用,了解重金属元素赋存形态的改变 及时空迁移变化规律,以评估研究区域重金属形态对 生物有效性的影响,更准确地体现重金属对生物的实 际危害,建立重金属不同化学形态与生物可利用性之 间的相关关系。

## 3 结论

(1)堆场周边土壤重金属中As的污染程度最大, 点位超标率 75%,最大质量分数为标准值的 35.3 倍, Cd、Hg 超标率分别为 43.8%和 37.5%。重金属含量分 布极不均匀,受人类生产活动干扰非常大,主要污染 因子为 As、Cd、Hg。

(2)地累积指数评价结果表明,Hg、As、Cd 污染频 率分别为 100%、87.5%、75%。 对照 Im 综合污染均方 根指数,精锑冶炼企业及其堆渣场附近点位污染程度 很高,点位 S5 的污染程度为重污染,锑氧粉企业附近 堆渣场点位污染程度为中等污染,其余为偏中污染。

(3)因子分析结果显示:第一主成分反映的是矿 山开采、冶炼和交通运输对该区域土壤的污染;第二 主成分反映 Cr 受地球化学的影响,主要为地质来源。

(4)7种重金属平均潜在生态风险系数大小顺序 为Hg(900)>Cd(832)>As(133)>Pb(6.9)>Cu(4.5)>Zn (2.2)>Cr(1.2)。研究区内所有点位 Pb、Cu、Zn、Cr 为 低生态风险,Hg、Cd、As为严重生态风险的点位分别 为 62.5%、37.5%, 6.2%。研究区域重金属综合潜在生 态风险指数(RI)处于"很强"等级。

#### 参考文献:

[1] 甘国娟, 刘 伟, 邱亚群, 等. 湘中某冶炼区农田土壤重金属污染及



图 3 土壤  $E_i(Hg) \ E_i(As) \ E_i(Cd)$ 和生态风险指数(*RI*)的空间分布 Figure 3 Spatial distribution of  $E_i(Hg)$ ,  $E_i(As)$ ,  $E_i(Cd)$  and the potential ecological risk index(*RI*) in soils

生态风险评价[J]. 环境化学, 2013, 32(1):132-138.

GAN Guo-juan, LIU Wei, QIU Ya-qun, et al. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils in a smelting area in Central Hunan[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(1):132–138.

- [2] 陈轶楠, 马建华, 张永清, 等. 晋南某钢铁厂及周边土壤重金属污染 与潜在生态风险[J]. 生态环境学报, 2015, 24(9):1540-1546. CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, ZHANG Yong-qing, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of soil heavy metals in and around a steel plant in the south of Shanxi, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(9):1540-1546.
- [3] 孔晓乐,吴重阳,曹 靖,等. 干旱地区设施土壤和蔬菜重金属含量及人体健康风险:以白银市为例 [J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28 (1):92–97.

KONG Xiao-le, WU Chong-yang, CAO jing, et al. A survey of heavy metal concentrations in soils and vegetables in Baiyin green-house production and their health risk[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(1):92–97.

- [4] 高 鹏, 刘 勇, 苏 超. 太原城区周边土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(5):866-873.
  GAO Peng, LIU Yong, SU Chao. Distribution and risk assessment of soil heavy metals in area surrounding Taiyuan City[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(5):866-873.
- [5]姚 娜,彭昆国,刘足根,等.石家庄北郊土壤重金属分布特征及风险评价[J].农业环境科学学报,2014,33(2):313-321. YAO Na, PENG Kun-guo, LIU Zu-gen, et al. Distribution and risk assessment of soil heavy metals in the north suburb of Shijiazhuang City[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(2):313-321.
- [6] Häkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [7] 韩 倩,张丽娟,胡国成,等.中山高平工业园区周边水体沉积物中 重金属污染特征及生态风险评价[J].农业环境科学学报,2015,34 (8):1563-1568.

HAN Qian, ZHANG Li-juan, HU Guo-cheng, et al. Pollution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of water bodies surrounding Gaoping industrial park of Zhongshan City[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(8):1563–1568.

[8] 廖晓勇,陈同斌,武 斌,等.典型矿业城市的土壤重金属分布特征
 与复合污染评价:以"镍都"金昌市为例[J].地理研究,2006,25(5):
 843-852.

LIAO Xiao-yong, CHEN Tong-bin, WU Bin, et al. Mining urban soil pollution: comcentrations and patterns of heavy metals in the soils of Jinchang, China[J]. *Geographical Research*, 2006, 25(5):843–852.

- [9] 刘 巍,杨建军,汪 君,等.准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析[J].环境科学,2016,37(5):1938-1945.
  LIU Wei, YANG Jian-jun, WANG Jun, et al. Contamination assessment and sources analysis of soil heavy metals in opencast mine of east Jung-gar basin in Xinjiang[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(5):1938-1945.
- [10] 童方平, 徐艳平, 龙应忠, 等. 冷水江锑矿区重金属污染林地土壤 环境质量评价[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12):179-183.
   TONG Fang-ping, XU Yan-ping, LONG Ying-zhong, et al. Appraisal

for environmental quality of forestry soil polluted by heavy metals in antimony mine of Lengshuijiang City[J]. *Chinese A gricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12):179–183.

[11] 中国环境保护部. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2005.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ/T 166—2004 The technical specification for soil environmental monitoring[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2005.

- [12] 石占飞,王 力. 神木矿区土壤重金属含量特征及潜在风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(6):1150-1158.
  SHI Zhan-fei, WANG Li. Contents of soil heavy metals and evaluation on the potential pollution risk in Shenmu mining area[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(6):1150-1158.
- [13] 中国环境保护部. GB15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2006.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB 15618—1995 Environmental quality standard for soils[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.

- [14] 王成军, 冯 涛, 赵舒婷, 等. 治炼厂周边表层土壤重金属关联特征 及污染评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10(4), 2064-2070.
  WANG Cheng-jun, FENG Tao, ZHAO Shu-ting, et al. Correlation characteristics and pollution evaluation of heavy metals in surface soil around a smelting factory[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 2064-2070.
- [15] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3):108–118.
- [16] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学 出版社, 1990:316-378.

China Environmental Monitoring Center. Chinese soil element background value[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990: 316-378.

- [17] Liu M D, Li Y, Zhang W, et al. Assessment and spatial distribution of zinc pollution in agricultural soils of Chaoyang, China[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, (18):283–289.
- [18] 郎 超, 单保庆, 李思敏, 等. 滏阳河表层沉积物重金属污染现状分析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2016, 36(1):64-73. LANG Chao, SHAN Bao-qing, LI Si-min, et al. Pollution analysis and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Fuyang River[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2016, 36(1):64-73.
- [19] 朱余银, 戴塔根, 吴堑虹. 湘江长株潭段底泥重金属污染现状评价 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(9): 3710-3717. ZHU Yu-yin, DAI Ta-gen, WU Qian-hong. Assessment on heavy metals contamination in sediments of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan sec – tion of Xiangjiang River[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2012, 43(9): 3710-3717.
- [20]齐 鹏,余树全,张 超,等.城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例[J].环境科学,2015,36 (12):4486-4493.

QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, et al. Pollution characteristics and potential ecological risk of heavy metals in urban surface water sediments from Yongkang[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(12):

农业环境科学学报 第36卷第6期

4486-4493.

- [21] Bastami K D, Bagheri H, Kheirabadi V, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along south– east coast of the Caspian Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 81 (1):262–267.
- [22] 程 芳,程金平, 桑恒春,等. 大金山岛土壤重金属污染评价及相关 性分析[J]. 环境科学, 2013, 34(3):1062-1066.
   CHENG Fang, CHENG Jin-ping, SANG Heng-chun, et al. Assessment

and correlation analysis of heavy metals pollution in soil of Dajinshan Island[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1062–1066.

- [23] 陈小敏, 朱保虎, 杨 文, 等. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间 分布、来源及污染评价[J]. 环境化学, 2015, 34(12):2248-2256. CHEN Xiao-min, ZHU Bao-hu, YANG Wen, et al. Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun Reservoir upstream, Beijing, China[J]. Environmental Chemistry, 2015, 34(12):2248-2256.
- [24] Liu R H, Wang Q C, Lu X G, et al. Distribution and speciation of mercury in the peat bog of Xiaoxing' an Mountain, Northeastern China[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 124(1): 39–46.
- [25] Lü J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 261:387–397.
- [26] Lü J S, Liu Y, Zhang Z L, et al. Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju Country(Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J]. *Journal of Soils Sediments*, 2015, 15(1):163–178.
- [27] 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 character-

istic and assessment of soil heavy metal pollution in the iron mining of Baotou in Inner Mongolia[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(10): 3099–3105.

[28] 杜 强, 贾丽艳. SPSS 统计分析从入门到精通[M]. 北京:人民邮电 出版社, 2011:279.

DU Qiang, JIA Li-yan. SPSS statistical analysis from entry to proficiency[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2011:279.

[29] 李 玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物
 中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1):137-141.
 LI Yu, YU Zhi-ming, SONG Xiu-xian, et al. Application of principal

component analysis (PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments [J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1):137–141.

[30] 戴 彬, 吕建树, 战金成, 等. 山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价[J], 环境科学, 2015, 36(2):507-515.

DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, et al. Assessment of sources, spatial distribution and ecological risk of heavy metals in soils in a typical industry-based city of Shandong, Eastern China[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(2):507–515.

- [31] 刘 勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风 险评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6):1285-1293.
  LIU Yong, YUE Ling-ling, LI Jin-chang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6):1285-1293.
- [32] 张一修, 王 济, 秦樊鑫, 等. 贵阳市道路灰尘和土壤重金属来源识别比较[J]. 环境科学学报, 2012, 32(1):204-212. ZHANG Yi-xiu, WANG Ji, QIN Fan-xin, et al. Comparison of sources of metals in road-dust and soil in Guiyang[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(1):204-212.

1148