

冶炼厂综合堆渣场围坝下水田重金属污染特征与评价

梁家妮^{1,2}, 周 静^{2,3}, 马友华¹, 崔 键³, 徐 笠¹

(1.安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2.中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 3.中国科学院红壤生态实验站, 江西 鹰潭 335211)

摘 要 通过对某冶炼厂综合堆渣场围坝下水田土壤环境及生物的调查与采样,采用单因子污染指数与综合污染指数法对该区域土壤和水稻植株中的重金属含量进行了评价。结果表明,该区土壤重金属污染主要来源于综合堆渣场渗漏污水,且处于重度污染状态,其中 Cu 和 Cd 为主要污染元素,其超标率达 100%,最高含量分别达到 415.54 mg·kg⁻¹ 和 6.87 mg·kg⁻¹。其次是 As 和 Zn,其超标率分别为 55% 和 18%,最高含量也分别达 71.99 mg·kg⁻¹ 和 503.31 mg·kg⁻¹。Pb 没超标。土壤重金属的污染引起了水稻产量和稻米品质的下降,其中产量与对照区相比,减产幅度为 35%~70%,稻米中 Cu、Cd 和 As 的含量均已经超过国家制定的食品卫生限量标准。

关键词 综合堆渣场 重金属 污染特征 评价

中图分类号 X825 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2009)05-0877-06

Status and Assessment of Heavy Metals Pollution in Paddy Soil Around the Spoil Area of Smeltery

LIANG Jia-ni^{1,2}, ZHOU Jing^{2,3}, MA You-hua¹, CUI Jian³, XU Li¹

(1.College of Resource and Environment Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2.Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3.Red soil ecological experiment station, Chinese Academy of Sciences, Yingtan 335211, China)

Abstract The contents for heavy metals of soil and paddy tissue were studied by the soils and the paddy rice of samples were collected and assessed with grade II criterion of GB 15618—1995 as benchmarks by the single pollution index and the integration pollution index in paddy field with sewage irrigation of the spoil area of the smeltery. The results showed that the source of the heavy metals pollution in paddy soil originated mainly from irrigating the sewage of the spoil area and the paddy soil was on the heavy pollution level. Cu and Cd were the uppermost pollution elements, its over-standard rates reached 100% and its maximum contents were 415.54 mg·kg⁻¹ and 6.87 mg·kg⁻¹, respectively. The over-standard rates for As and Zn were 55% and 18% and its maximum contents were 71.99 mg·kg⁻¹ and 503.31 mg·kg⁻¹ apart. However, Pb was not over-standard. The rice yield was reduced by 35%~70% while the rice quality was declined. And the heavy metal contents both Cu, Cd and As in rice were all over the limiting criterion of standard for healthful food.

Keywords spoil area; heavy metal; pollution characteristic; assessment

重金属污染已成为一个危害全球环境质量的主要问题^[1]。微量重金属元素如 Co、Cu、Cr、Mn、Zn 等虽为动植物的必需元素,但同时它们也是环境中潜在的危险因素^[2]。重金属污染不仅降低土壤、水和大气环境质量,而且影响作物生长和质量,通过食物链危害人体健康。目前,我国受 Cd、As、Cr、Pb 等重金属污染的耕地面积近 2.0×10⁸ hm²,约占全国总耕地面积的 1/5,

其中工业“三废”污染耕地面积 1.0×10⁸ hm²,污水灌溉农田面积达 3.3×10⁷ hm²,每年受重金属污染粮食达 1.2×10⁸ t,直接经济损失超过 200 亿元^[3]。

本文调查的冶炼厂是目前国内规模最大、技术最先进的闪速炼铜工厂。该厂位于江西省贵溪市境内,年产废渣(包括水淬渣、中和渣和尾矿)量约 2.0×10⁵ t,并就近堆放形成综合堆渣场(又称渣库),废渣中主要含有重金属元素 Cu、Cd、As 和 Pb 等,由于该地区雨水丰富,大量的 Cu、Cd、As、Pb 等重金属元素从渣库里溢出,并随雨水形成污水流入周边的农田或水域。有人在早年对这一区域部分的农田进行相关研究,但是对于综合渣场下农田土壤重金属污染状况及其分

收稿日期 2008-08-04

基金项目 国家 973 计划项目课题(2007CB936604) 国家 863 计划项目课题(2006AA06Z356)

作者简介 梁家妮(1981—),女,广西南宁人,在读硕士,主研方向为土壤生态。E-mail ljn01001@163.com

通讯作者 周 静 E-mail zhousijing@issas.ac.cn

布特征研究未见有报道。为探明该区域农田土壤和水稻受综合渣场重金属等污染程度和污染的空间分布特征,作者于 2006—2007 年对该区域水田土壤和水稻样品进行重金属元素调查和污染评价,旨在为在现有生态环境条件下大型铜冶炼厂综合渣场的改造和被其污染的农田治理方法提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集和分析方法

1.1.1 研究区样点设置

设置典型样区作为调查研究和评价基本单元。调查评价区位于冶炼厂综合堆渣场下受废渣场渣坝渗漏污水污染的滨江乡苏门村小组所属的水田。样点设置方法:(1)污染控制区典型样区设置 沿综合堆渣场渣坝下水沟流向每 50 m 设 1 个典型样区,每典型样区内设一个 100 m² 采样区,共设 11 个典型样区,其采样分布见图 1。(2)对照区典型样区设置 在距污染控制区东南 2 km 处河潭镇龙口村周家组同地形区水田同设置 1 个 100 m² 对照典型样区。

1.1.2 土壤样品采集

在每个典型采样区内用不锈钢铲按 S 形布点,采集表土层 0~20 cm 土壤 8~10 个点组成混合样,混合后用四分法取舍,保留 1 kg 左右土样,装入塑料袋。将采集的土壤样品拣除异物后,在晾土室内摊放在干净的木制托盘上风干,用木棍碾压,过 10 目尼龙筛,再用玛瑙碾钵研细,过 100 目尼龙筛,装瓶并贴上标签,供分析测定用。

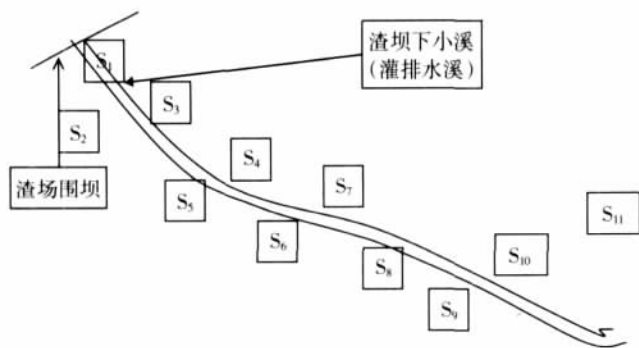


图 1 采样区示意

Figure 1 Distribution of sampling sites

1.1.3 水稻植株样采集

在 S₂ 和 S₆~S₁₁ 土壤典型样区的同片农田,在 100 m² 的小区内,按 S 形,采 3~5 穴水稻植株,并按“根、茎叶、稻谷”分部位采样,其对应的植株样品编号为 S₂、S₆、S₇、S₈、S₉、S₁₀ 和 S₁₁,同时在对照区也采集样品,样

品田间采集后,用去离子水清洗干净,于烘箱 105 ℃ 杀青 30 min,再 60~80 ℃ 烘干后粉碎,装瓶并贴上标签备用。

1.1.4 样品分析方法

样品前处理:土壤样品中全量 Cu、Zn、Pb、Cd 元素测定用去离子水湿润,经浓硝酸-氢氟酸-高氯酸加热消化,冷却后再用稀盐酸溶解定容;测定全量 As 元素采用去离子水湿润,加浓盐酸-硝酸在水浴锅加热 2 h,冷却后用去离子水定容^[4]。水稻植株(籽粒、茎叶和根系)样品中全量 Cu、Cd、As 元素用浓硝酸低温消化溶解,加高氯酸消化近干后再加稀盐酸溶解定容^[5]。

元素分析方法 经消解处理后的土壤和水稻样品溶液,用(ICP-AES)单道扫描型高频电感耦合等离子直读光谱仪(法国 JOINYNON 公司)测定全量 Cu、Zn、Pb、Cd 元素含量;As 元素用 AFS-230E 双道原子荧光光度计测定全量^[4-5]。

1.2 评价方法

1.2.1 评价因子选择

参照国家标准,结合该区实际,选取了在该区影响较大的 5 种重金属元素(Cu、Zn、Pb、Cd、As)作为影响该区农田土壤环境质量及稻米质量的评价因子。

1.2.2 评价标准选择

本文调查区域属农田生态系统,故采用国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)中的二级标准进行评价,其内涵为:保障农业生产,维护人体健康的土壤限制值。按中国绿色食品发展中心推荐的分级标准进行土壤污染分级(表 1)^[6]。

1.2.3 评价方法选择

采用单因子污染指数(P)和综合污染指数(P)。当 P_i 或 P_i ≤ 1 表示未污染;P_i > 1 或 P_i > 1 表示污染,当 P_i 或 P_i 值越大,则表明污染越严重。

(1) 单因子污染指数(P)是目前国内普遍的方法之一,也是中国绿色食品发展中心推荐的评价方法之一,其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i, \quad (1)$$

式中 P_i 为土壤污染物 i 的环境质量指数;C_i 为污染物 i 的实测值;S_i 为污染物 i 的评价标准;

(2) 综合污染指数(P)按内梅罗综合指数计算,是中国绿色食品发展中心推荐的方法之一,其计算公式为:

$$P_i = [(C_i / S)_{\max}^2 + (C_i / S)_{\text{ave}}^2 / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中:(C_i/S)_{max} 为土壤污染中污染指数的最大值;(C_i/S)_{ave} 为土壤污染中污染指数的平均值^[7-9]。

表 1 土壤重金属污染分级标准

Table 1 Hierarchical standard of soil pollution of heavy metals

等级划分 Grade	综合污染指数 Comprehensive index	单项污染指数 Single pollution grade	污染等级 Pollution division	污染水平 Pollution index
I	$P_i \leq 0.7$	$P_i \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_i \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_i \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超过背景值视为轻度污染
IV	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_i \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物均受到中度污染
V	$P_i > 3.0$	$P_i > 3.0$	重度污染	土壤、作物受污染已相当严重

1.2.4 污染等级划分标准

综合污染指数能全面反映各污染元素对土壤污染的不同程度,同时又突出对土壤环境质量的影响,因此用综合污染指数来评价划分土壤受重金属元素污染程度等级更为客观。本文结合贵溪冶炼厂综合堆渣场坝下水稻田土壤重金属的含量情况按上表的分级标准对该区土壤重金属污染等级进行划分。

2 结果与分析

2.1 综合堆渣场围坝下水田土壤重金属分布特征及评价

2.1.1 水田土壤重金属分布特征

由表 2 看出,冶炼厂综合堆渣场渣坝废水渗漏引起的土壤重金属元素污染已相当严重,特别是 Cu 污染,在堆渣场正下方的 S_1 样区,土壤中 Cu 含量高达 $415.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为背景值的 34.63 倍,在调查样区中是最高的。因土壤的吸附截留作用,Cu 含量沿小溪沟流水方向虽有所降低,但最下游 S_{11} 样区土壤中的 Cu 含量也高达 $206.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,仍高出背景值 17.24 倍。距离废渣厂较近 S_2 样区因地势较高,受废渣场污水的影响较少,其土壤 Cu 的含量最低 ($102.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。Zn、Pb、Cd、As 的分布特征也与 Cu 类似。

在所调查的 11 个样区中,土壤 Cu 的含量范围为 $102.31 \sim 415.54 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,为对照值的 1.3~5.4 倍,均超过了 GB15618—1995 中规定的土壤二级标准;土壤 Cd 的含量范围在 $0.33 \sim 6.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,比对照值也有不同增加,都超过了二级标准;Pb 的含量虽比对照区略有所增加,但都低于国家土壤环境二级标准;而 Zn 的含量除了 S_1 和 S_3 样区外,其他样区低于国家土壤环境二级标准。从本次调查土壤重金属含量的平均值看,除大大超过背景值和对照值外,也比孙华等 2000 年调查的含量均有所增高(孙华调查的 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的平均值分别为:199.02、79.88、160.8、0.83、22.17 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,样本数 $n=6$)^[10],说明渣坝渗漏引

起的水田重金属污染有加重的趋势。另外从表 3 看,水稻田重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cd、As 之间的相关性各有差异,Zn 与 Pb、Cd、As 的相关性极显著,Cu 与 Zn、Cd 相关性一般显著。因此说明该区域水田具备了复合污染的条件。

表 2 水田土壤重金属含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 2 Contents of heavy metals in paddy soil ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

编号	Cu	Zn	Pb	Cd	As
S_1	415.54	503.31	175.54	6.87	71.99
S_2	102.31	72.63	42.65	0.33	38.21
S_3	301.39	295.99	153.87	2.34	40.91
S_4	296.08	183.35	115.25	1.62	34.64
S_5	169.36	130.26	29.97	1.81	33.82
S_6	263.36	83.88	50.76	2.33	30.15
S_7	252.66	109.32	33.61	0.95	27.22
S_8	266.42	70.86	29.34	0.96	26.13
S_9	336.34	154.94	27.17	1.01	18.09
S_{10}	290.91	60.96	22.45	0.88	17.12
S_{11}	206.86	39.11	19.63	0.39	17.01
平均值	263.75	151.92	61.57	1.77	30.37
对照	76.23	54.77	24.80	0.56	14.01
背景值	12	42	29	—	5.0
二级标准	≤ 50	≤ 200	≤ 250	≤ 0.3	≤ 30

注:背景值数据引自文献:北京师范大学环境科学研究所.江西铜业公司贵溪冶炼厂环境影响评价报告书,1984:11-120.表 4、表 5 背景值同引于此。

表 3 水田土壤重金属元素间的相关性 ($n=11$)Table 3 Correlation (r) among heavy metal in paddy soil ($n=11$)

元素	Cu	Zn	Pb	Cd	As
Cu	1				
Zn	0.694*	1			
Pb	0.583	0.904**	1		
Cd	0.672*	0.916**	0.786*	1	
As	0.368	0.880**	0.835**	0.885**	1

注:**表示相关性极显著,*表示相关性显著。

2.1.2 冶炼厂综合堆渣场坝下水田土壤重金属污染评价

从表 4 看,冶炼厂投产前,该区域土壤重金属综合污染指数仅为 0.25,说明当时的土壤重金属含量很低,综合环境质量很好^[11],但随着废渣场的建立和污水的排放,重金属元素不断积累,特别是近几年来,冶炼厂生产规模的不断扩大,冶炼过程中产生的废渣也越来越多,重金属元素单项污染指数和综合污染指数均较背景值有大幅度提高,在污染最严重的渣坝下污灌沟溪上游,由于 Cd 的污染加重,综合污染指数约增高 67 倍,即使在污染最轻的污染区,综合污染指数也增加了约 5 倍。从单因子污染指数看,在污染区所选的 11 样区及对照区 Cu 和 Cd 的污染指数全部大于 1,说明该区的土壤已经广泛受到 Cu、Cd 的污染;而对照区 Pb、Zn、As 的污染指数都小于 1,尚未受到污染;所选的 11 个样区中,Zn 除了在 S₁ 和 S₃ 与 As 在 S₁~S₆ 的污染指数大于 1 外,其他都小于 1,且与对照相比,Zn (除 S₁₁ 外) 和 As 的污染指数都比对照大,而 Pb 的污染指数均小于 1,说明该污染区的部分样区也受到了 Zn 和 As 的轻微污染,由此可见 Cu 和 Cd 为该区的主要污染元素。

表 4 水田土壤重金属综合污染指数 (*P*) 值

Table 4 Integrated index of pollution (*P*) for heavy metals in paddy soils

样号	<i>P</i> _{Cu}	<i>P</i> _{Zn}	<i>P</i> _{Pb}	<i>P</i> _{Cd}	<i>P</i> _{As}	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>P_t</i>
S ₁	8.31	2.52	0.70	22.90	2.40	7.37	22.90	17.01
S ₂	2.05	0.36	0.17	1.10	1.27	0.99	2.05	1.61
S ₃	6.03	1.48	0.62	7.80	1.36	3.46	7.80	6.03
S ₄	5.92	0.92	0.46	5.40	1.15	2.77	5.92	4.62
S ₅	3.39	0.65	0.12	6.03	1.13	2.26	6.03	4.55
S ₆	5.27	0.42	0.20	7.77	1.01	2.93	7.77	5.87
S ₇	5.05	0.55	0.13	3.17	0.91	1.96	5.05	3.83
S ₈	5.33	0.35	0.12	3.20	0.87	1.97	5.33	4.02
S ₉	6.73	0.77	0.11	3.37	0.60	2.32	6.73	5.03
S ₁₀	5.82	0.30	0.09	2.93	0.57	1.94	5.82	4.34
S ₁₁	4.14	0.20	0.08	1.30	0.57	1.26	4.14	3.06
平均值	5.28	0.76	0.25	5.90	1.01	2.64	5.90	4.57
对照	1.52	0.27	0.10	1.87	0.47	0.85	1.87	1.45
背景值	0.24	0.21	0.12	—	0.17	0.19	0.24	0.25

注: *X* 为土壤污染指数的平均值, *Y* 为土壤污染物中污染指数最大值。

2.2 冶炼厂综合堆渣场围坝下水稻植株的重金属污染状况及生态效应

2.2.1 水稻植株污染状况

从表 5 看出水稻根部的 Cu、Cd、As 含量明显比

土壤中的高,说明水稻根系能富集此类重金属,而茎叶中的含量比根部有很大的降低,稻米中的含量又比茎叶中的低。调查区内,水稻的根、茎叶,稻米中的 Cu、Cd 都远高于冶炼厂投产前的背景值。按照 GB 1354—1986 《无公害食品大米卫生限量标准》中规定,大米中 Cd、As 允许的最高含量分别为 0.2、0.5 mg·kg⁻¹,调查区水稻可食部分稻米中 Cd、As 含量分别在 0.26~1.40 mg·kg⁻¹ 和 0.61~2.99 mg·kg⁻¹ 范围,都超过了该规定所允许的最高含量,其中 Cd 超标为 0.13~17.0 倍,As 超标为 1.55~6.0 倍,而稻米中 Cu 的含量在 11.63~40.73 mg·kg⁻¹ 之间,超过了国家制定的食品中 Cu 限量标准 (10 mg·kg⁻¹, GB15199—1994),最高超标 4 倍。

表 5 水稻的重金属含量 (mg·kg⁻¹)

Table 5 Contents of heavy metals in rice plant tissue grown in paddy fields irrigated by sewage (mg·kg⁻¹)

样品	Cu			Cd			As		
	根	茎叶	稻米	根	茎叶	稻米	根	茎叶	稻米
S ₂	399.05	200.59	23.54	1.76	0.54	0.26	35.05	4.95	2.89
S ₆	391.64	148.3	23.24	11.63	5.88	1.4	128.70	6.20	2.13
S ₇	224.02	119.08	27.85	7.54	2.26	0.99	163.70	7.64	2.99
S ₈	328.53	147.60	11.63	7.13	2.04	0.34	54.79	5.72	0.61
S ₉	429.33	218.02	40.73	4.50	1.75	0.33	184.20	14.22	0.77
S ₁₀	440.60	202.18	32.91	4.34	1.82	0.37	231.50	12.96	2.40
S ₁₁	422.23	203.39	35.33	2.12	1.11	0.31	240.90	15.08	2.66
对照	145.22	57.28	21.19	1.72	1.30	0.52	168.60	6.47	0.74
背景值	7.04	2.67	1.11	1.27	0.56	0.077	—	—	—

2.2.2 水稻植株中重金属积累与土壤重金属污染的关系

外源重金属进入土壤后,作物可通过根系吸收土壤中的重金属,进入根细胞的重金属,一部分滞留在根中,还有一部分随原生质的流动运移给邻近的细胞,并通过细胞间的运输,横穿过根的中柱鞘输送到导管中,随作物蒸腾作用向地上部分移动,并积累在作物茎叶、籽实中^[12]。为了说明污染元素 Cu、Cd、As 在作物体内的移动趋势,我们计算了重金属元素 Cu、Cd、As 在水稻根、茎叶、稻米的平均吸收富集系数来反映重金属元素在作物体内的行为过程。所谓吸收富集系数指的是重金属元素在水稻植株各个部分的浓度与土壤中对对应元素的浓度之比,吸收富集系数可以表征土壤-水稻系统中重金属元素迁移的难易程度^[13]。

由表 6 可见,水稻植株对重金属 Cd 的平均吸收系数要远远大于 Cu 和 As,这说明 Cd 比 Cu 和 As 更容易由土壤向水稻体内迁移。吴燕玉等研究也表明^[12],当

表 6 水稻根、茎叶、稻米对重金属 Cu、Cd、As 的吸收富集系数

Table 6 Enrichment coefficients of Cu, Cd and As in rice root, straw and grain

项目	Cu	Cd	As
土壤/mg·kg ⁻¹	245.55	0.98	24.85
根	1.53	5.68	5.97
茎叶	0.72	2.44	0.38
稻米	0.11	0.58	0.08

土壤遭受单一重金属元素污染时,不同元素的吸收富集系数一般顺序为 $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Pb}$,而当土壤遭受重金属复合污染时,不同重金属的共存能提高作物对金属元素的吸收系数,促进这些重金属元素在作物体内的迁移。另外,从表 6 也可以看出,重金属元素 Cu、Cd 和 As 在水稻体内的分布规律是根>茎叶>籽粒,说明进入水稻体内的重金属元素从根向上运输常常受到某种阻碍,也可能是因为有毒元素在土壤溶液中浓度过高时,当其进入水稻根系后,会对根毛表皮细胞产生毒害作用,导致根系元素吸收功能下降,因此茎叶及稻米中的含量低于根系中的含量,其主要积累于水稻的根部,这一结果同王广林的研究结论是一致的^[13]。

2.2.3 土壤重金属污染对水稻产量的影响

Cu、Zn 是农作物生长所必需的营养元素,适量的 Cu 可以刺激和促进作物的生长发育,但当土壤中的 Cu、Zn 含量过高时,又会危害农作物的正常生长,而 Cd 不是植物生长的必需元素,而是一种潜在性有毒且能在生物体内富集的重金属元素,它可在比与 Cu、Zn 等重金属元素更低的浓度时对植物生长产生毒害作用^[10]。本次调查发现,靠近渣坝小溪沟上游的水田,由于重金属污染较严重,水稻已经绝收,而只有在下流的 S₂ 和 S₆~S₁₁ 采样区种植有水稻,而水稻根系不发达,死根严重,并以田块调查方式得知,水田水稻的产量在 2 025~3 750 kg·hm⁻² 之间,平均 3 375 kg·hm⁻²,在 2 km 外的对照区其产量为 5 250 kg·hm⁻²,而贵溪市当年平均产量为 5 494.95 kg·hm⁻²。因此,说明该地区的重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的复合污染,直接影响了水稻生长和产量,其产量与对照相比降低了为 35%~70%。

3 结论

通过对该区域土壤重金属含量及土壤重金属污染对水稻生长、产量和品质的系统调查与研究,得出以下几点结论:

(1) 该冶炼厂综合堆渣场废水渗漏引起水田土壤重金属污染,其 Cu、Zn、Pb、Cd、As 含量分别为 102.31~415.34 mg·kg⁻¹、39.11~503.31 mg·kg⁻¹、19.63~175.54 mg·kg⁻¹、0.33~6.87 mg·kg⁻¹、17.01~71.99 mg·kg⁻¹,其主要污染元素为 Cu 和 Cd。

(2) 用国家土壤二级标准评价可知,从单因子污染指数看,所选样区的土壤样品中 Cu、Cd 污染指数都大于 1,即超标率为 100%;As 除在 S₁~S₆ 样区的土壤的污染指数超过 1 外,其余均小于 1,其超标率为 55%,其次为 Zn 和 Pb,其超标率为 18%和 0%;从综合污染指数看,在污染区所选的 11 个样区除了 S₂ 只受到轻微污染外,其他样区都属于重度污染,其综合污染指数为 3.06~17.0,即使在对照区也受到了轻微的重金属污染,说明该地区已广泛受到重金属的污染。

(3) 冶炼场综合堆渣场废水渗漏已经对渣坝下的水田造成了污染,其污染程度空间分布与渣坝距离成反比,同时也与农田的地势有关,即地势高的比地势低的农田污染程度轻,这与相关研究一致^[14]。

(4) 该区土壤重金属污染已对种植的水稻产量和质量产生了影响,其中水稻的产量与对照区相比,下降幅度为 35%~70%,稻米中 Cu、Cd、As 含量范围分别为 11.63~40.73 mg·kg⁻¹、0.26~1.40 mg·kg⁻¹、0.61~2.99 mg·kg⁻¹,均超过国家制定的食品卫生限量标准,其中 Cd 超标最严重,长期食用会对人体健康造成很大的危害,因此建议停止食用。

参考文献:

- [1] Purves D. Trace-element, contamination of the environment[M]. The Netherlands: Elsevier, Amsterdam, 1985.
- [2] Bolan N S, Adriano D C, Mani P A, et al. Immobilization and phytoavailability of cadmium in variable charge soils. I. effect of phosphate addition[J]. *Plant and Soil*, 2003, 250: 83-94.
- [3] 孙铁珩. <http://www.china.com.cn/Chinese/huanjing/513603.htm>, 2004. SUN Tie-heng. <http://www.china.com.cn/Chinese/huanjing/513603.htm>, 2004.
- [4] 鲁如坤. 土壤农业化学分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. LU Ru-kun. Soil and agricultural chemical analysis[M]. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000.
- [5] 孙华, 孙波, 张桃林. 江西省贵溪冶炼厂周围蔬菜地重金属污染状况评价研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22 (1): 70-72. SUN Hua, SUN Bo, ZHANG Tao-lin. Assessment of pollution of heavy metals on vegetable field around Guixi smelter. Jiangxi Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22 (1): 70-72.
- [6] GB15168—1995, 土壤环境质量标准[S]. GB15168—1995, Soil Environmental Quality Standard[S].
- [7] 白厚义, 张超兰. 南宁市郊部分菜区土壤和蔬菜重金属污染评价[J].

- 广西农业生物科学, 2001, 20 (3) :186-200.
- BAI Hou-yi, ZHANG Chao-lan. Valuing soil and vegetable polluted by heavy metal in suburb of Nanning[J]. *Journal of Guangxi Agricultural and Biological Science*, 2001, 20 (3) :186-200.
- [8] 李 静, 谢正苗, 徐建明, 等. 杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J]. *生态环境*, 2003, 12 (3) :277-280.
- LI Jing, XIE Zheng-miao, XU Jian-ming. Evaluation on environmental quality in vegetable plantation soils and vegetables in Hangzhou suburb[J]. *Ecology and Environment*, 1998, 15 (3) :13-16.
- [9] 李秋洪, 姜达炳. 无公害农产品基地环境质量评价指标体系与评价方法[J]. *农业环境与发展*, 1998, 15 (3) :13-16.
- LI Qiu-hong, JIANG Da-bing. The quality of the environment evaluation system and method in pollution-free agricultural products base[J]. *Agro-Environment and Development*, 1998, 15 (3) :13-16.
- [10] 孙 华, 张桃林, 孙 波. 江西省贵溪市污灌水田重金属污染状况评价研究[J]. *农业环境保护*, 2001, 20 (6) :405-407.
- SUN Hua, ZHANG Tao-lin, SUN bo. Assessment of heavy metals pollution on paddy field with sewage irrigation in Guixi City, Jiangxi Province[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20 (6) :405-407.
- [11] 江西省环境监测中心站. 江西铜业公司贵溪冶炼厂环境影响评价报告书[R].
- Jiangxi Environmental Quality Monitoring Center Station. Environmental impact assessment report of copper company Guixi smelter[R].
- [12] 吴燕玉, 余国营, 王 新, 等. Cd, Pb, Cu, Zn, As 复合污染对水稻的影响[J]. *农业环境保护*, 1998, 17 (2) :49-54.
- WU Yan-yu, YU Guo-ying, WANG Xin. Effects of compound pollution of Cd, Pb, Cu, Zn and As on the growth of rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1998, 17 (2) :49-54.
- [13] 王广林, 刘登义. 冶炼厂污灌区土壤-水稻系统重金属积累特征的研究[J]. *土壤*, 2005, 37 (3) :299-303.
- WANG Guang-lin, LIU Deng-yi. Characteristics of heavy metals accumulation in soil-rice system in the sewage irrigated area near a smeltery[J]. *Soil Science*, 2005, 37 (3) :299-303.
- [14] 胡宁静, 李泽琴, 黄 朋, 等. 江西贵溪冶炼厂重金属环境污染特性及生态风险评[J]. *地球科学进展*, 2004, 19 (增刊) :467-471.
- HU Ning-jing, LI Ze-qin, HUANG Peng. The virtual distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in agricultural soils near smelter[J]. *Earth Science Progress*, 2004, 19 (Supplement) :467-471.