

广西某地金属冶炼废水外溢对农田土壤的污染特征

袁永强^{1,2}, 刘丛强^{1*}

(1. 中科院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:通过对冶炼厂附近受外溢废水污染农田土壤中 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Pb、U 及 As 的含量分析, 研究揭示了金属冶炼废水外溢这一突发性污染事件对农田土壤的污染状况及其污染特征. 结果表明, 污染土壤中 Zn、Mn、As、Pb、Cd、Sb 等金属浓度分别为 113.28 ~ 212.22、251.67 ~ 2429.29、34.44 ~ 130.28、50.63 ~ 544.74、63.44 ~ 317.33、39.41 ~ 551.17 mg/kg, 远高于背景值, 土壤不仅受到 As 污染, 还有 Zn、Mn、Pb、Cd、Sb 等重金属的严重污染; 相关性分析表明, 污染程度与当地有色金属矿产开发冶炼活动密切相关, 且污染物有相似的来源或相近的释放规律; 剖面分析表明, 表层土壤的 pH 值较低, 土壤酸化明显, 部分金属如 Zn、Cr、Cd 等表现出先升高后降低变化趋势. 本研究揭示了冶炼废水外溢造成的突发性环境污染事故引起的土壤重金属污染特征, 并为开展污染治理提供了理论依据.

关键词:冶炼废水; 外溢; 土壤; 重金属; 污染特征

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)11-3312-06

Pollution of Agricultural Soils by a Wastewater Outflow from a Metal Smelter in Guangxi Zhuang Autonomous Region

YUAN Yong-qiang^{1,2}, LIU Cong-qiang¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Pollution characteristics of heavy metals in the farmland soil nearby a metal smelter were studied. Soil samples were collected and the contents of elements V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Rb, Sr, Mo, Cd, Sn, Sb, Pb, U and As in the bulk samples of soil profiles were measured, with the objectives to identify the pollution status and pollution characteristics of the farmland soil that were suffered from smelter effluents flooding, an acute pollution accident. The results indicate that the concentrations of heavy metals Zn, Mn, As, Pb, Cd, Sb in the soil were 113.28-212.22, 251.67-2429.29, 34.44-130.28, 50.63-544.74, 63.44-317.33, 39.41-551.17 mg/kg, respectively, higher than the background level. These polluted soils not only have high concentrations of As, but also of the Zn, Mn, Pb, Cd and Sb. According to correlation analysis, pollution level is closely with local nonferrous metal exploitation, and principal pollutants have the same source. Some trace metals, such as Zn, Cr, Cd, show increasing concentration first and then decreasing trend in the soil profile. Soil acidification appears in the topsoil. This study has characterized the metal pollution in soils flooded by sudden smelting effluents spilling, and provided a theory base for pollution treatment.

Key words: smelting effluents; outflow; soil; heavy metal; pollution characteristics

金属矿物开采、冶炼等活动引起土壤金属污染是世界普遍存在的问题, 而且开采和冶炼活动对土壤和水体等造成的环境污染通常是不可逆的^[1]. 目前大多学者对矿山废弃物在表生过程中有害物质的释放, 尤其是酸性废水^[2-4]、尾砂坝^[5-8]及其危害性的研究比较深入^[9-11], 随着认识的深入金属冶炼厂的环境问题逐渐成为研究热点. 与矿山尾砂不同的是, 金属冶炼不仅产生废渣, 而且烟尘与废水的更易迁移、扩散其危害性更直接和更广. 关于矿冶活动引起的重金属污染问题多有报道^[12-14].

广西壮族自治区矿产资源丰富, 有有色金属之乡之称, 位于桂西北的河池市有色金属矿产在广西、全国都占很大比重, 矿业是经济的支柱产业之一, 但在矿产资源开发促进经济发展同时, 产生一系列环

境问题^[15-17]. 2008 年 9 月 25 日, 河池市地区受台风影响, 普降大雨 (降雨量达 39.2 mm), 大雨冲刷地处河池市加辽社区附近的金海冶金化工公司污水处理池和含砷物料, 致使含砷废水外泄进入周边江叶屯水塘, 并最终污染地下水. 造成涉及 2 个村庄、600 多名村民受害的重大污染事件. 废水流经之地庄稼枯死、作物绝收, 短期危害很难消除, 可见突发性污染事件产生的危害之大. 近年来国内对突发性环境污染事故的研究, 偏重于时空格局及其影响和应急监测方面^[18,19], 在这些污染事故中, 大气与水

收稿日期: 2010-12-24; 修订日期: 2011-04-05

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目 (09CJ015000); 国家基金委创新研究群体项目 (41021062)

作者简介: 袁永强 (1982 ~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为环境地球化学, E-mail: huayang1202@sohu.com

* 通讯联系人, E-mail: liucongqiang@vip.gyig.ac.cn

占绝大多数,而突发性污染事件造成的土壤污染研究仅有少量报道,如刘晓海等^[20]做了污染评价.土壤污染具有滞后性、长期性和隐蔽性,更应当引起重视.因此,研究冶炼废水外溢造成的突发性环境污染事故引发的土壤重金属污染具有重要意义.本研究以该污染事件为例,主要讨论了冶炼废水外溢对毗邻农田土壤的污染特征,以期土壤污染控制和污染农田修复提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域与样品采集

研究区域河池市金城江区地理位置介于东经 107°33′~108°13′、北纬 22°22′~24°55′之间,地势西北高东南低,属于典型岩溶地区.污染源——金海冶金化工冶炼厂位于该区的东江镇加辽社区东北部附近,以生产铅、镉等贵金属产品为主,其中污水池位于厂区西侧,厂外即为农田,紧邻污水池为弃耕地(稻田弃耕多年),弃耕地以西为玉米地、菜地,玉米地以北紧邻山脚为荒草地、菜地前方为一村庄.

样品于 2009 年 10 月下旬采集,为研究冶炼废水外溢对毗邻土壤污染情况,根据该区域的污染分布、地形地貌等情况,在研究区域采用土地使用类型设置了 4 个采样点[被冶炼废水淹没的弃耕地(记为 PS)、毗邻菜地(记为 VS)、玉米地(记为 CS),山脚荒地地势较高未受水淹作为对照点(记为 UPS)]如图 1 所示.在 VS、CS 处采表层(0~20 cm)土壤,土壤样品采用四分法取混合样.同时为探索重金属的垂直分布规律,在 PS、UPS 处分别采集 2 个土壤剖面样(按照 0~5、5~10、10~15、15~20、20~25、25~35、35~45、45~55、55~65 cm 厚度分层取样),并密封于干净的自封袋内.除去土壤中的植物根系和石块,土壤样品在室温下自然风干,风干土样用玛瑙研钵磨细,分别过 10 目和 100 目尼龙

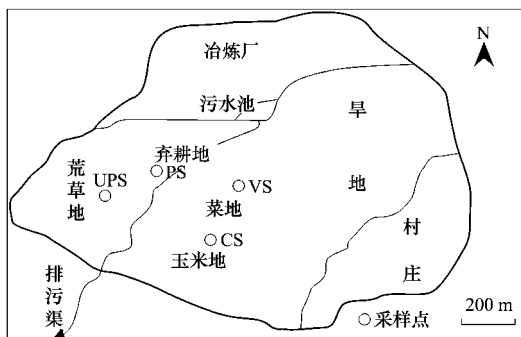


图 1 采样点分布示意

Fig. 1 Location of sampling sites

筛,保存待测.

1.2 测试项目及分析方法

将过 100 目的土壤样品用于土壤金属元素总量分析:HNO₃-HF-HClO₄ 混合酸法^[21],Cd、Pb 采用原子吸收分光光度法(AAS)测定,其他元素用 ICP-MS 测定(Platform ICP, Micromass Instruments Corporation),采用国家土壤标准样品 GBW-07401 作为分析质量控制,其分析误差在允许范围内.土壤 pH 值:根据国标 GB 7859-87 法(水土比 2.5:1).

数据统计采用 SPSS 16.0、EXCEL 处理.

2 结果与讨论

2.1 土壤金属含量分析及污染判断

为判断土壤污染状况,本研究分析了采样点表层土壤的 15 种金属,包括 V、Cr、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Rb、Sr、Mo、Cd、Sn、Sb、Pb、U 及 As.对土壤样品的测定结果进行统计分析,数据呈现正态分布或对数正态分布,并与广西土壤背景值^[22]和中国土壤环境背景值^[23]进行对比,同时土壤的重金属污染采用地质累积指数判断^[24-26],所得结果列于表 1.

表 1 中地质累积指数计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{c_n}{1.5 B_n} \quad (1)$$

式中, c_n 为样品中元素 n 的浓度; B_n 为元素 n 的地球化学背景浓度;1.5 为常数,是考虑到成岩作用可能会引起背景值的变动.

此外,地质累积指数只给出量的大小,判断污染程度还需对其进行定性分析,按照常用的地质累积指数如 Förstner 等^[27]的七级分级标准,上述样点表层金属污染程度见表 2.

通过分析可以看出,Sr、Pb 存在中-强度的污染,经过 1 a 的自然流失,仍具有污染的风险;而 Cr、Ni、Co 等污染强度不大表现出轻微污染;Rb、Mo 虽然表现出中度污染,但这 2 种金属及 Sr 均不在中国环境优先污染物黑名单之列^[28],对其的关注较小,而 Mn、Zn 表现出的中度污染则不能忽视;Cd、Sb 为主要的污染物质,呈现极强污染,是突发性事件当中忽视的对象.综合判断该区域为多种重金属超标的复合型污染,按地累积指数顺序为 Cd (11.19) > Sb (7.20) > Pb (2.80) > Sr (2.23) > As (2.10) > Mn (1.67) > Zn (1.12).

为探讨土壤重金属复合污染特征,对土壤中重金属的含量进行了相关分析.根据统计分析(表 3)表层土壤主要污染金属元素相关性表明,Cd 与 Pb、

表 1 冶炼厂附近菜地与玉米地表层土壤金属元素分析结果

Table 1 Analytic results of heavy metal contents in the upper layer of vegetable and corn fields nearby the smelter

元素	含量分布/mg·kg ⁻¹	平均值 ± 标准偏差 ¹⁾	中值	背景值	测定值/背景值	<i>I</i> _{geo}
V	29.49 ~ 101.26	86.08 ± 42.29	92.43	82.40 ³⁾	1.04	-0.53
Cr	93.92 ~ 133.08	118.94 ± 17.25	124.37	56.25 ²⁾	2.11	0.49
Mn	251.67 ~ 2 429.29	828.40 ± 1 068.15	316.32	172.57 ²⁾	4.80	1.67
Co	20.57 ~ 22.95	21.83 ± 1.08	21.89	12.70 ³⁾	1.72	0.20
Ni	59.12 ~ 67.37	63.25 ± 3.79	63.25	26.60 ²⁾	2.37	0.66
Cu	15.67 ~ 32.81	23.08 ± 7.25	21.93	20.79 ²⁾	1.11	-0.43
Zn	113.28 ~ 212.22	151.37 ± 44.55	139.99	46.43 ²⁾	3.26	1.12
As	34.44 ~ 130.28	72.20 ± 44.26	62.03	20.50 ²⁾	3.52	1.23
Rb	297.92 ~ 388.00	336.50 ± 43.30	330.04	111.00 ³⁾	3.03	1.01
Sr	619.55 ~ 2 183.69	1 176.02 ± 690.14	950.43	167.00 ³⁾	7.04	2.23
Mo	6.51 ~ 7.45	6.96 ± 0.39	6.93	2.00 ³⁾	3.48	1.21
Cd	63.44 ~ 317.33	217.23 ± 108.25	244.07	0.062 ²⁾	3 503.71	11.19
Sn	1.16 ~ 2.03	1.45 ± 0.41	1.30	2.60 ²⁾	0.56	-1.42
Sb	39.41 ~ 551.17	266.27 ± 211.68	237.24	1.21 ³⁾	220.06	7.20
Pb	50.63 ~ 544.74	196.28 ± 233.72	94.87	18.82 ²⁾	10.43	2.80
U	4.28 ~ 4.76	4.51 ± 0.22	4.49	3.03 ³⁾	1.49	-0.01

1) $n=4$; 2) 背景值均为算术平均值,广西土壤背景值参考文献[22]; 3) 背景值均为算术平均值,中国土壤背景值参考文献[23]

表 2 用地累积指数对土壤污染的判断

Table 2 Pollution estimation of soil using *I*_{geo}

地质累积指数范围	污染级别	污染强度	本研究土壤样品中的元素
$I_{geo} < 0$	0 级	无污染	V, Cu, Sn, U
$0 \leq I_{geo} < 1$	1 级	无-轻污染	Cr, Co, Ni
$1 \leq I_{geo} < 2$	2 级	中度污染	Mn, Zn, As, Rb, Mo
$2 \leq I_{geo} < 3$	3 级	中-强污染	Sr, Pb
$3 \leq I_{geo} < 4$	4 级	强污染	
$4 \leq I_{geo} < 5$	5 级	强污染-极强污染	
$I_{geo} \geq 5$	6 级	极强污染	Cd, Sb

As、Sb 存在着显著的相关性, Ni 与 Cr、Zn 存在着相关性, 其中 Cd 与 Pb, Pb 与 As 和 Sb, As 与 Sb 及

Ni 与 Zn 存在显著正相关. 据此可将表层土壤污染主要 7 种重金属可分为 3 类, I 类: Cd 与 As、Sb 和 Pb; II 类: Ni 与 Zn; III 类: Cr. 这说明 3 类元素在土壤中可能具有相似的来源或相近的释放规律, 尤其是 As、Sb、Pb、Cd 与 Zn, 这与广西河池地区的矿业活动存在很好的对应关系, 反映其污染与有色金属矿产开发冶炼活动密切相关. 为进一步揭示重金属间的相互关系, 做了主成分分析, 经正交旋转使复杂的因子负荷矩阵变得简洁清晰, 因子 1 包含 As、Sb、Pb 和 Cd, 荷载分别为 0.064、0.866、0.018 和 0.501, 因子 2 包含 Ni、Zn; 因子 3 包含 Cr(图 2). 上述结果进一步支持聚类分析的结果.

表 3 主要污染金属元素相关性分析¹⁾

Table 3 Correlation analysis of principal heavy metals

	Cd	Pb	As	Sb	Cr	Ni	Zn
Cd	1	0.731 *	0.487	0.541	0.277	-0.497	-0.799 **
Pb		1	0.904 **	0.879 **	-0.234	-0.508	-0.599
As			1	0.958 **	-0.383	-0.432	-0.362
Sb				1	-0.383	-0.492	-0.468
Cr					1	0.409	-0.090
Ni						1	0.760 *
Zn							1

1) ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

2.2 土壤 pH 和重金属的剖面分布

对冶炼废水淹没的 PS 和未被淹没的 UPS 样点的土壤剖面分析结果表明, 其土壤酸化集中在土壤表层(0~30 cm), 表层以下的土壤 pH 则并未受明

显的影响, 而且在 0~5 cm 表层, 废水淹没土壤比未淹没土壤的 pH 值要低, 而在 5~15 cm 层, 前者 pH 值又略高[图 3(g)], 推测可能是 UPS 采样点离冶炼厂烟囱较近, 接受的干湿沉降更多的缘故, 鉴于该

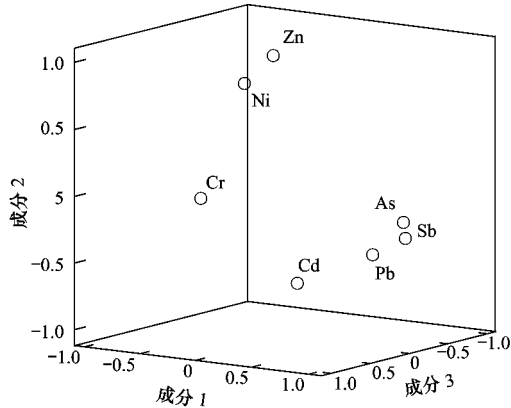


图2 表层土壤重金属旋转后因子荷载图

Fig. 2 Matrix of principal component analysis loadings of heavy metals in topsoil

厂停顿整修,未对干湿沉降样品进行采集.

从图3中各元素的剖面分布可以看出UPS点位的As、Sb、Cd、Pb、Zn、Cr主要分布在0~20cm表层土壤,其下层污染并不明显.这也验证其污染更多来自于干湿沉降.冶炼厂排烟不容忽视,冶炼烟尘排放也导致附近山体植被覆盖率下降(数据未给出).

从图3(a)看出,土壤As含量明显表现出由表层向下层递减的趋势,最大值达到130 mg/kg,在30cm表层土壤含量在26.72 mg/kg以上,仍高出中国背景值的1倍多^[21],仍存在着潜在的危害.图3(b)中Sb具有与As类似的分布特征,且表层污染严重,这与河池的矿产分布及冶炼有关,应引起重视.

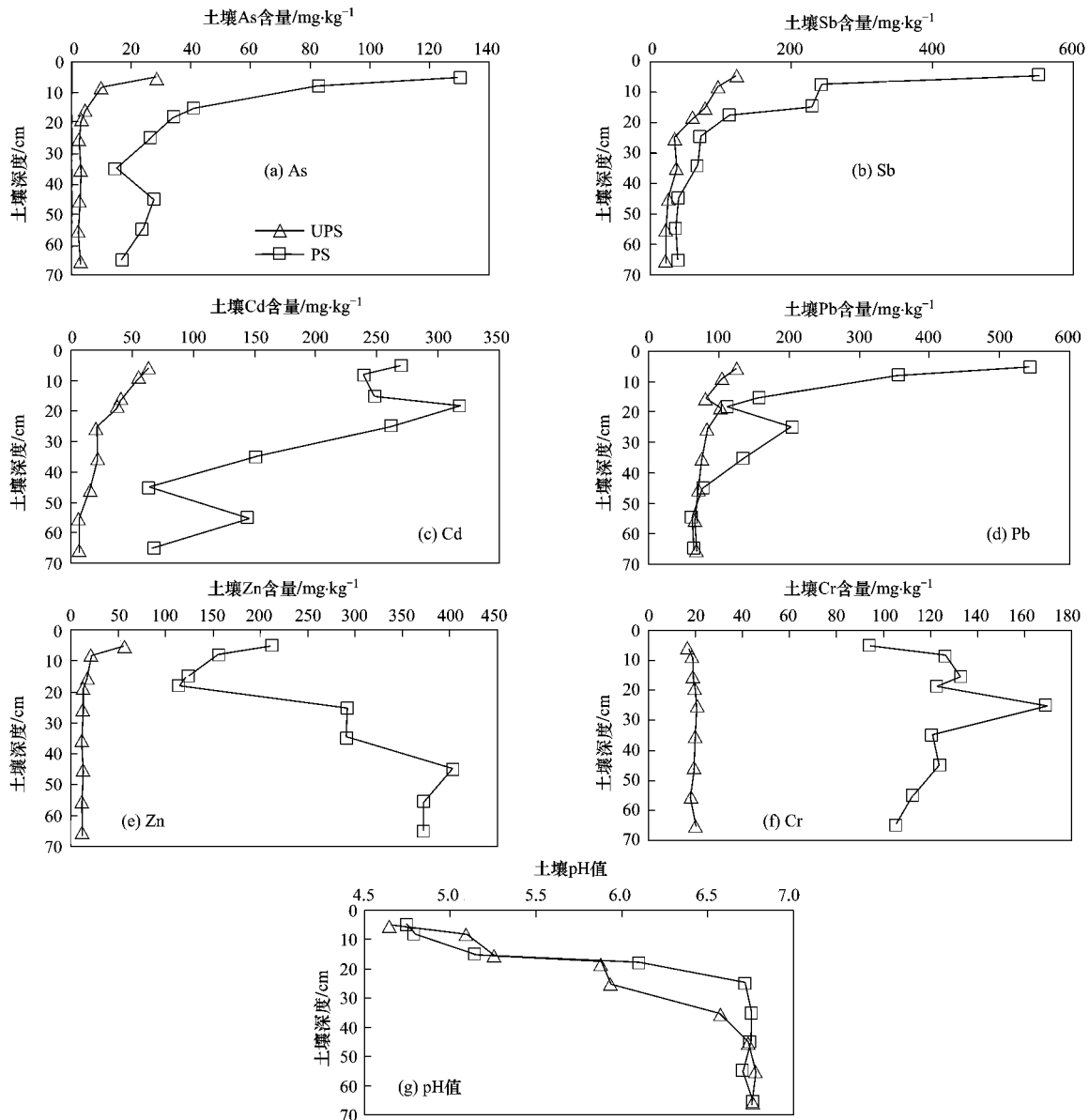


图3 冶炼废水淹没弃耕地与未淹没荒地土壤重金属和pH的剖面分布

Fig. 3 Heavy metals and pH profiles of the soils with wastewater flooding and without affected

图 3(c)和图 3(d)看出 Cd、Pb 有类似的分布特征,在 0~20 cm 表层土壤含量很高,土壤 Zn 含量在表层(0~20 cm)也表现出由高到低递减的趋势,且其含量都高于 100 mg/kg,仍在背景值之上,存在污染的风险.随着深度的增加,其含量又逐渐增大,可能是表层土壤 pH 值较低,使得 Zn 易于向下迁移的缘故.Cr 也呈现出向下迁移的趋势,这 2 种元素向下迁移的浓度峰值不尽相同,但变化趋势基本上是先升高后降低,这与邓超冰等^[29]的研究具有相似性.

从图 3 中看出,冶炼废水淹没的 PS 位点,无论是 Zn、Cd 还是 Cr,浓度峰值出现在 20~25 cm 深度之间,具有先升高后降低变化趋势,但各元素向下迁移规律略有差异.Sterckeman 等^[30]研究发现重金属在土壤中的垂直迁移受 pH 等因素的影响,可推得在 pH 值较低的环境中,Zn、Cd、Cr 等元素活性较大,在水中溶解度较大,易于向下迁移.随着土壤深度的增加 pH 值逐渐上升,到 20~25 cm 深度 pH 达到最大(6.7),从此层以下,土壤 pH 值趋于稳定,上述几种元素的迁移受到影响.

上述关于重金属剖面分布的研究结果表明,该小区域的土壤重金属污染基本局限于植物根系分布比较密集的表层,且呈现出 pH 较低的特点,鉴于此,可先考虑先通过添加价格低廉的石灰等改良剂,提高酸化土壤的 pH 值、降低某些重金属的可利用性,再可考虑采用植物富集技术进行修复.如陈同斌等^[31]采用具有超富集能力的植物蜈蚣草来修复 As 污染土壤,并取得了良好的效果.对于其他污染金属考虑适当的方法进行土壤修复.

3 结论

(1) 由强降雨导致冶炼废水外溢的突发性污染事件使得毗邻农田土壤受到 As 污染,进而导致人畜突发性 As 中毒.根据土壤元素分析表明,受污染土壤中 As 仍存在中强度污染风险,Pb 也有同样污染风险,而 Cd、Sb 的污染风险更大,达到极强级,综合起来呈现出复合型重金属污染特性.

(2) 土壤剖面分析表明,土壤的表层 pH 值较低,土壤酸化明显;部分金属如 Zn、Cr、Cd 等表现出先升高后降低变化趋势,但各元素向下迁移规律因元素不同而异.

参考文献:

[1] Rybicka E H. Impact of mining and metallurgical industries on the environment in Poland [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, **11**

(1-2): 3-9.

- [2] Hallberg R O, Granhagen J R, Liljemark A. A fly ash/biosludge dry cover for the mitigation of AMD at the falun mine [J]. *Chemie Der Erde-Geochemistry*, 2005, **65**(S1): 43-63.
- [3] Neito J M, Sarmiento A M, Olias M, *et al.* Acid mine drainage pollution in the Tinto and Odiel rivers (Iberian Pyrite Belt, SW Spain) and bioavailability of the transported metals to the Huelva Estuary [J]. *Environment International*, 2007, **33**(4): 445-455.
- [4] Akcil A, Koldas S. Acid Mine Drainage (AMD): Causes, treatment and case studies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, **14**(12-13): 1139-1145.
- [5] Aguilar J, Dorronsoro C, Fernández E. Soil pollution by a pyrite mine spill in Spain: Evolution in time [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **132**(3): 395-401.
- [6] Clemente R, Walker D J, Roig A. Heavy metal bioavailability in a soil affected by mineral sulphides contamination following the mine spillage at Aznalcollar (Spain) [J]. *Biodegradation*, 2003, **14**(3): 199-205.
- [7] Liu H Y, Probst A, Liao B H. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China) [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **339**(1-3): 153-166.
- [8] Simón M, Ortiz I, García I. Pollution of soils by the toxic spill of a pyrite mine (Aznalcollar, Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 1999, **242**(1-3): 105-115.
- [9] Boularbah A, Schwartz C, Bitton G, *et al.* Heavy metal contamination from mining sites in South Morocco: 1. Use of a biotest to assess metal toxicity of tailings and soils [J]. *Chemosphere*, 2006, **63**(5): 802-810.
- [10] Li Y, Wang Y B, Gou X, *et al.* Risk assessment of heavy metals in soils and vegetables around non-ferrous metals mining and smelting sites, Baiyin, China [J]. *Journal of Environmental Sciences-China*, 2006, **18**(6): 1124-1134.
- [11] Das K. Environmental pollution of Udaisagar Lake and impact of phosphate mine, Udaipur, Rajasthan, India [J]. *Environmental Geology*, 1999, **38**(3): 244-248.
- [12] Blake W H, Walsh R P D, Reed J M, *et al.* Impacts of landscape remediation on the heavy metal pollution dynamics of a lake surrounded by non-ferrous smelter waste [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **148**(1): 268-280.
- [13] 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.
- [14] 杨元根, 刘丛强, 张国平, 等. 铅锌矿山开发导致的重金属在环境结合自重的积累 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, **22**(4): 305-309.
- [15] 翟丽梅, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 广西环江铅锡矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征 [J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(6): 1206-1211.
- [16] 王莉霞, 陈同斌, 宋波, 等. 广西环江流域硫污染农田的土壤酸化与酸性土壤分布 [J]. *地理学报*, 2008, **63**(11): 1179-

- 1188.
- [17] 李玲,张国平,刘虹,等. 广西大厂多金属矿区河流中 Sb 和 As 的迁移及环境影响 [J]. 环境科学研究, 2009, **22**(6): 682-687.
- [18] 李静,吕永龙,贺桂珍,等. 我国突发性环境污染事故时空格局及影响研究[J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2684-2688.
- [19] 刘耀龙,陈振楼,毕春娟,等. 中国突发性环境污染事故应急监测研究[J]. 环境科学与技术, 2008, **31**(12): 116-121.
- [20] 刘晓海,赵磊,段刚,等. 云南某地突发性污染事件土壤和作物重金属污染评价[J]. 环境科学与技术, 2009, **32**(3): 181-183.
- [21] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京:中国农业科学出版社, 1999. 13-14.
- [22] 广西环境保护科学研究所. 广西壮族自治区土壤环境背景值图集[M]. 成都:成都地图出版社, 1992. 74-87.
- [23] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等. 中国土壤环境背景值研究 [J]. 环境科学, 1991, **12**(4): 12-19.
- [24] Loska K, Wiechula D, Barska B, *et al.* Assessment of arsenic enrichment of cultivate soils in Southern Poland [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2003, **12**(2): 187-192.
- [25] Miko S, Peh Z, Bukovec D, *et al.* Geochemical baseline mapping and Pb pollution assessment of soils in the karst in Western Croatia [J]. Natura Croatica, 2000, **9**(1): 41.
- [26] 滕彦国,庾先国,倪师军,等. 应用地质累积指数评价攀枝花地区土壤重金属污染[J]. 重庆环境科学, 2002, **24**(4): 25-27,31.
- [27] Förstner U, Müller G. Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in river sediments: geochemical background, man's influence and environmental impact [J]. Geojournal, 1981, **5**(5): 417-432.
- [28] 奚旦立. 环境监测[M]. 北京:高等教育出版社, 2004. 7-8.
- [29] 邓超冰,李丽和,王双飞,等. 典型铅锌矿区水田土壤重金属污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(11): 2297-2301.
- [30] Sterckeman T, Douay F, Proix N, *et al.* Vertical distribution of Cd, Pb and Zn in soils near smelters in North of France [J]. Environmental Pollution, 2000, **107**(3): 377-389.
- [31] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等. 砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J]. 科学通报, 2002, **47**(3): 207-210.