

某矿区土壤和地下水重金属 污染调查与评价

雷鸣¹ 曾敏^{1*} 廖柏寒¹ 周航² 许秋瑾³ 郑丙辉³

(1. 中南林业科技大学林学院,长沙 410004; 2. 湖南农业大学资源与环境学院,长沙 410128;
3. 中国环境科学研究院,北京 100012)

摘要 为了解湖南某矿区土壤和地下水重金属污染状况,对该矿区东河流域附近重金属污染源进行了调查,同时,对地下水和土壤样品进行了采样分析,结果表明:(1)该矿区东河流域附近的主要污染源有18个,其中有色金属选矿厂、尾矿库、采矿场和冶炼厂是排放重金属较多的污染源;(2)20个采样点中土壤重金属Pb、Cd、Zn、As和Hg大部分超过国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995),综合污染指数 $P_{综} > 1$,该矿区主要的重金属污染元素为Cd、As和Hg,且土壤中Cd、Zn和As的含量两两之间存在着极显著的正线性相关关系;(3)重金属元素在土壤中的纵向迁移不明显,该矿区附近20个采样点的地下水并未受到污染,综合污染指数 $P_{综} < 1$ 。20个采样点地下水Pb、Cd、Zn、As、Hg浓度均能达到地下水质量标准(GB/T14848-9)中的III类标准。

关键词 矿区 土壤 地下水 重金属 评价

中图分类号 X820 文献标识码 A 文章编号 1673-9108(2012)12-4687-07

Investigation and evaluation on heavy metal contamination in soils and groundwater of a mine zone

Lei Ming¹ Zeng Min¹ Liao Bohan¹ Zhou Hang² Xu Qiujin³ Zheng Binghui³

(1. College of Forestry, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. China Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract In order to know the situation of heavy metal contaminated soil and groundwater near the mine zone in south of Hunan Province. An investigation of heavy metal sources of this area was carried out. At the same time, we sampled soils and groundwater around the East River basin in this area and analyzed the contents of heavy metals in soils and groundwater. The results showed that there were eighteen main pollution sources around the mine zone of the East River basin, including metal choose factory, tailing pond, mining field and smelter, which released more heavy metals. The contents of Pb, Cd, Zn, As and Hg in most of the 20 sampling points exceeded those of the soil environmental quality standard in China (GB 15618-1995). All of integrated pollution index of soil samples exceeded 1 ($P > 1$). Cd, As and Hg were the major elements of heavy metal pollution in soils of this mine zone. Highly significant positive linear relations were found between any two contents of Cd, Zn and As in soils. There was not obviously vertical migration of heavy metals in the soils and the groundwater of the 20 sampling points around this mine zone was not polluted by heavy metals. All of integrated pollution index of groundwater samples were far less than 1 ($P < 1$). The contents of Pb, Cd, Zn, As and Hg in the groundwater of all 20 sampling points were lower than those of the groundwater environmental quality standard in China(GB/T14848-9).

Key words mine zone; soil; groundwater; heavy metals; evaluation

随着社会经济的发展,重金属污染问题引起了人们的广泛关注,尤其是频频发生的“血铅事件”、“镉米风波”,更让人们深刻地认识到重金属污染对人体的极大危害。湖南矿产资源丰富,享有“有色金属之乡”之称,但矿产资源的开采,也带来了严重的重金属污染问题,湘南某矿区有色金属蕴藏量十分丰富,由于采矿冶

基金项目:国家环保公益性行业科研专项(200909054);国家环保公益性行业科研专项(201009047);湖南省教育厅科学研究重点项目(09A104);湖南省重点学科建设项目(2006180)

收稿日期:2012-05-27; **修订日期:**2012-08-04

作者简介:雷鸣(1987~),男,硕士研究生,主要从事土壤污染与防治研究。E-mail: 794649117@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: emailzm@163.com

炼中的废渣,废水处理不当,导致严重的土壤污染^[1-3]。据曾清如等^[4]报道,1985年8月的特大山洪将该矿区120万t尾砂矿坝冲垮,造成该区域东河上游土壤严重污染。而近年来,一些学者对于该矿区重金属污染也进行了一些调查。周航等^[5]调查结果显示,该矿区土壤中Pb、Cd、Zn含量超过土壤环境质量3级标准,且大部分采样点属于Pb、Cd复合污染。该矿区重金属污染得到了广大环境学者的重视,然而大部分的调查仅仅是针对土壤污染状况的调查评价,对于污染源以及地下水重金属污染的情况未见报道。由于该矿区面积较大,采矿选矿企业较多,情况复杂。当土壤中重金属严重污染时极有可能会引起地下水的污染,地下水一旦污染,治理难度就很大,即使可以修复和治理,也需要

花费很长的时间和巨额费用^[6]。因此,笔者通过对该矿区东河流域附近一些主要的污染源进行初步调查,同时对土壤和地下水进行采样分析,了解土壤和地下水污染状况,旨在为当地的环境整治工作提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

分别在枯水期(2010年11月)和丰水期(2011年7月)对湘南某矿区东河流域进行了耕地土壤和地下水(井水)的采样调查,具体污染源和地下水(井水)采样点分布情况见图1。以东河流域沿线村镇的20个水井作为地下水采样点,20个水井均为浅层地下水水井,平均井深小于3m。

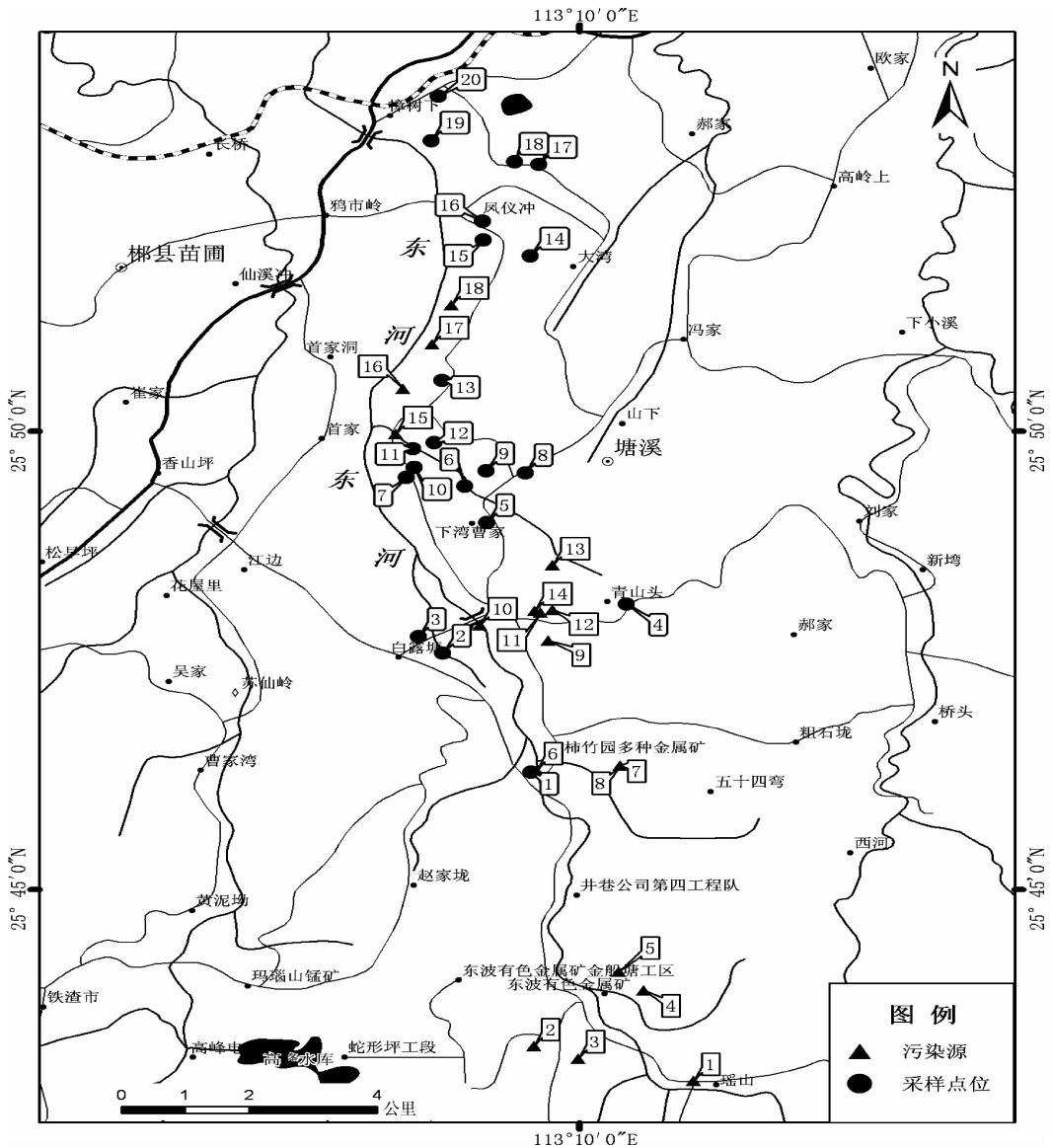


图1 污染源和地下水采样点分布情况

Fig. 1 Sampling point distribution of pollution sources and groundwater

露天井采集水样时,先用水泵充分抽汲后再用水样采集器进行采样,手压泵井和抽水井采集水样时,先将停滞在管路中的水汲出,充分冲洗后再采样。水样采集后立即加浓硝酸至 1% 后用聚乙烯瓶保存。以水井为中心,采集附近区域土壤样品,土壤样品采集使用非系统布点法,按照 X 型的线段布置采样点,每个采样点从耕作层(0~20 cm)采集等量的土壤,然后进行混合,共采集 20 个土壤样品。

1.2 样品的处理与分析

采集后的水样在 24 h 内带回实验室,用 0.45 μm 的微孔滤膜过滤后,在 4℃ 下用聚乙烯瓶保存待测。土壤样品采回后,自然风干,去除杂物,用非金属器具磨碎后过 0.149 mm 尼龙筛,混合均匀,保存待测。

水样中的 Pb、Cd、Zn、As、Hg 用 ICP-MS(Thermo Electron, XII) 进行测定。土壤样品中重金属 Pb、Cd、Zn 采用国家土壤质量标准(GB15618-1995)中的方法进行消解,用原子吸收分光光度计(日立 Z-2000)测定。As、Hg 采用国家土壤质量标准(GB/T 22105-2008)中的方法水浴消煮,用原子荧光光度计(东西公司 AFS-7500)测定。

1.3 评价标准与方法

1.3.1 评价标准

土壤中的重金属污染状况采用土壤环境质量标准(GB 15618-1995)中的 II 类标准来判断,该标准是维护人体健康,保障农业生产的土壤限制值。以人体健康基准值为依据,生活饮用水水源采用地下水质量标准(GB/T 14848-9)中的 III 类标准。

1.3.2 评价方法

采用综合污染指数法(内梅罗污染指数法)对采样点土壤中 Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 污染进行综合评价。综合污染指数法评价模式为:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\overline{P_i})^2 + (P_{\text{max}})^2}{2}} \quad (1)$$

式中: $P_{\text{综}}$ 为某测定土壤综合污染指数。 P_{max} 为污染物中数值最大的单项污染指数, $\overline{P_i}$ 为污染物中单项污染指数的平均值。其计算式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (2)$$

$$\overline{P_i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (3)$$

式中: P_i 为土壤中各重金属的单项污染指数, C_i 为

各采样点土壤中 Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 的实测数值, S_i 为国家土壤环境质量标准(GB 15618-1995)II 级标准中 Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 的最低限值, n 为评价污染物质的个数。综合污染物指数分级标准共 5 个等级,分别为 $P_{\text{综}} \leq 0.7$ 为清洁(安全级), $0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$ 为警戒线, $1 < P_{\text{综}} \leq 2$ 为轻度污染, $2 < P_{\text{综}} \leq 3$ 为中度污染, $P_{\text{综}} > 3$ 重度污染。

2 结果与讨论

2.1 湘南某矿区东河流域污染源调查结果分析

经初步调查,该矿区东河流域有 18 个污染源(表 1),其中有色金属选厂和尾矿库共 11 个,非金属矿选厂 1 个,采矿场 1 个,冶炼厂 4 个,建材公司 1 个。有色金属选厂、尾矿库、采矿场和冶炼厂都是排放重金属较多的污染源。18 个污染源中选矿厂大多沿东河而建,与东河相距较近(图 1),这些选矿厂成为了污染东河河水的主要污染源。尾矿库有 3 个,以 1[#] 的规模最大,尾矿库 2[#] 规模较小,但其重金属浓度极高,一旦发生事故对土壤和地下水的污染极为严重。据曾清如等^[4] 报道,1985 年 8 月的特大山洪将东坡 120 万 t 尾矿库冲垮,造成该区域土壤严重污染,就是指的尾矿库 2[#]。另外,尾矿库表层含重金属尘土随风飘散,已经成为矿区附近农田土壤污染的一个重要污染原因。采矿场和冶炼厂排放的废水和废气也是污染水源和土壤的重要污染源。

2.2 土壤重金属污染状况与评价

由表 2 可见,20 个土壤样品中 Pb、Cd、Zn、As、Hg 的浓度范围分别为 66.45~4280.61、0.21~12.76、82.11~1465.49、4.88~709.14 和 0.87~12.3 mg/kg,平均值分别为 530.08、2.08、348.10、99.43 和 3.164 mg/kg。Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 的平均值含量分别超过国家土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995)的 1.77、6.93、1.39、3.31 和 6.33 倍。

在 20 个采样点中 1、3、4、7、13、19 号采样点 Pb 含量超标,超标率为 30%,除 14 号采样点以外,其余 19 个采样点 Cd 全部超标,超标率为 95%,5、8、9、10、14、15、16、17、18、20 号采样点 Zn 超标,超标率为 50%,8、9、17、20 号采样点 As 未超标,As 超标率为 80%,Hg 全部超标,超标率为 100%。结合所有采样点平均值超标倍数,可以得出该区域 Cd、As、Hg 污染最为严重。这可能与附近的多个采矿厂、选矿厂和尾砂坝造成的污染有直接的关系。Cd 为生物非必需元素,人体若摄入大量 Cd 会引起肝肾疾病,

表1 该矿区污染源基本情况

Table 1 General situation of pollution sources in the mine zone

编号	污染源	坐标	海拔(m)	备注
1	选矿厂1#	N25°42.917' E113°10.970'	511	规模小
2	选矿厂2#	N25°43.298' E113°9.623'	503	
3	尾矿库1#	N25°43.161' E113°09.997'	584	库容750万m ³ ,二等库
4	选矿厂3#、尾矿库2#	N25°43.906' E113°10.547'	534	尾砂坝库容124.9万m ³
5	采矿场1#	N25°44.108' E113°10.339'	498	
6	选矿厂4#	N25°46.303' E113°09.646'	210	规模小
7	选矿厂5#	N25°46.354' E113°10.349'	266	
8	选矿厂6#	N25°46.354' E113°10.349'	266	
9	冶炼厂1#	N25°47.718' E113°09.743'	171	
10	尾矿库3#	N25°47.888' E113°9.169'	187	库容388万m ³ ,四等库
11	冶炼厂2#	N25°48.028' E113°09.676'	196	
12	冶炼厂3#	N25°48.054' E113°09.781'	216	
13	建材厂	N25°48.054' E113°09.781'	216	生产建筑砖
14	冶炼厂4#	N25°48.046' E113°09.630'	204	
15	选矿厂7#	N25°49.970' E113°08.457'	152	规模小
16	选矿厂8#	N25°50.463' E113°08.519'	141	规模小
17	选矿厂9#	N25°50.949' E113°8.762'	144	
18	选矿厂10#	N25°51.379' E113°08.928'	139	规模小

镉进入人体后可取代骨骼中部分钙,引起骨骼疏松软化而痉挛,严重者引起自然骨折,另外,Cd有致癌和致畸等危害^[7]。As虽然是人和动物所必需的元素之一,但吸收过量的As可致畸、致癌^[8]。汞食入后直接沉入肝脏,对大脑、神经、视力破坏极大。因此,该区域土壤中Cd、Hg、As的污染应引起高度的重视。

运用内梅罗污染指数法对所有采样点土壤中Pb、Cd、Zn、As和Hg污染进行综合评价,得出所有采样点土壤的综合污染物指数 $P_{综}$ (表2)均大于1,由内罗梅污染指数分级标准来看,在20个采样点中清洁、轻污染、污染、重污染和严重污染分别所占的比例为0%、0%、5%、20%和75%,污染率为100%。说明该矿区附近土壤受到严重的重金属污染。由表中还可以看出,污染较为严重的采样点为1、4、13和19号,其综合污染指数分别为18.59、11.06、17.31和32.79。

2.3 地下水污染状况与评价

20个采样点分布于该矿区3个乡镇,基本上是浅层地下水,取水方式大多数为挑水,其中有10口井由于政府告知污染或者水量不足(附近采矿影响了地下水水量),已处于停用或半停用的状态。表3列出了20个采样点丰水期和枯水期地下水中Pb、Cd、Zn、As、Hg的浓度。以人体健康基准值为依据,

表2 采样点土壤中重金属含量

Table 2 Contents of heavy metals in sampling soils

采样点 编号	土壤样品重金属含量(mg/kg)					综合污染物 指数($P_{综}$)
	Pb	Cd	Zn	As	Hg	
1	719.45	4.03	492.13	121.86	12.30	18.59
2	267.03	1.10	265.23	55.48	2.85	4.44
3	423.44	1.38	375.98	92.45	2.32	3.93
4	4280.61	2.88	386.76	119.15	1.32	11.06
5	155.54	0.96	229.81	48.45	4.61	6.88
6	179.54	1.10	305.48	63.08	2.24	3.60
7	927.45	1.35	370.69	186.2	2.11	5.18
8	104.19	0.89	82.11	23.82	1.48	2.34
9	87.31	0.47	184.44	27.38	0.87	1.44
10	161.18	0.89	211.23	49.87	1.52	2.50
11	232.56	1.35	318.72	49.17	3.35	5.18
12	284.27	3.16	375.11	79.09	2.32	7.98
13	655.65	6.93	929.66	188.96	2.63	17.31
14	66.45	0.12	112.71	31.15	1.81	2.68
15	278.86	0.30	272.36	56.84	1.90	2.96
16	85.99	0.40	176.99	35.12	2.38	3.56
17	70.77	0.47	132.73	4.88	3.71	5.43
18	77.49	0.72	151.06	31.76	2.11	3.22
19	1471.19	12.76	1465.49	709.14	7.72	32.79
20	72.62	0.40	123.26	14.75	3.73	5.46
浓度	66.45 ~	0.12 ~	82.11 ~	4.88 ~	0.87 ~	1.44 ~
范围	4280.61	12.76	1465.49	709.14	12.3	32.79
中值	249.80	2.26	346.92	64.13	2.84	6.58
平均值	530.08	2.08	348.10	99.43	3.164	7.33
II类标准	300	0.30	250	30	0.5	

表 3 采样点地下水中重金属含量
Table 3 Contents of heavy metals in sampling groundwater

(μg/L)

编号	枯水期地下水重金属含量						丰水期地下水重金属含量					
	Pb	Cd	Zn	As	Hg	$P_{\text{综}}$	Pb	Cd	Zn	As	Hg	$P_{\text{综}}$
1	1.25	0.06	53.85	0.99	0.02	0.04	0.79	0.07	37.45	0.59	0.02	0.03
2	2.23	0.05	57.02	0.3	0.02	0.04	1.27	0.06	34.67	0.46	0.02	0.03
3	0.39	0.09	53.83	3.81	0.03	0.06	0.28	0.22	54.34	16.07	0.1	0.24
4	0.76	0.05	58.15	1.21	0.01	0.04	0.7	0.22	34.68	10.38	0.04	0.15
5	1.62	0.03	46.4	0.53	0.01	0.04	2.44	0.03	40.08	0.76	0.02	0.04
6	4.03	0.03	73.74	0.32	0.01	0.06	1.02	0.02	26.46	0.21	0.02	0.02
7	1.77	0.67	208.47	16.09	0.82	0.62	1.24	0.05	23.94	3.99	0.01	0.06
8	2.03	0.03	70.57	0.25	0.14	0.11	0.77	0.23	32.72	2.87	0.02	0.05
9	1.56	0.04	116.87	0.79	0.09	0.09	0.3	0.02	30.2	0.33	0.03	0.02
10	3.95	0.07	100.95	1.04	0.07	0.08	0.71	0.07	50.09	0.5	0.05	0.04
11	0.41	0.45	62.72	0.39	0.05	0.05	0.26	0.45	45.64	2.25	0.07	0.06
12	0.52	0.16	43.22	0.43	0.06	0.05	1.36	0.04	34.62	0.25	0.05	0.04
13	1.57	0.03	66.6	0.26	0.04	0.05	0.76	0.03	33.11	0.55	0.04	0.03
14	3.65	0.03	61.84	0.24	0.02	0.06	0.13	0.04	43.62	0.37	0.03	0.03
15	2.43	0.04	61	2.91	0.03	0.05	0.17	0.05	40.79	3.64	0.07	0.06
16	1.82	0.03	53.91	0.82	0.05	0.04	0.46	0.03	56.18	1.03	0.03	0.04
17	2.2	0.03	76.31	0.46	0.01	0.06	1.49	0.03	31.56	0.43	0.02	0.03
18	1.44	0.03	51.06	0.54	0.01	0.04	0.6	0.02	33.24	0.56	0.01	0.03
19	2.06	0.16	86.41	2.79	0.04	0.07	1.14	0.08	40.17	1.26	0.01	0.03
20	0.38	0.05	59.75	3.04	0.05	0.05	0.89	0.02	41.29	2.48	0.01	0.04
III 类标准	50	10	1 000	50	1		50	10	1 000	50	1	

生活饮用水水源应采用地下水质量标准 (GB/T14848-9) 中的 III 类标准。根据地下水质量标准 III 类标准, 20 个采样点地下水 Pb、Cd、Zn、Hg、As 浓度均未超标。从表 3 还可以看出, 除 3、4、11 号采样点的个别元素外, 枯水期地下水中重金属含量比丰水期地下水重金属含量高, 这与丰水期雨水较枯水期充沛, 对地下水中污染物的稀释作用有关。同时运用内梅罗污染指数法对所有采样点的地下水中 Pb、Cd、Zn、As 和 Hg 污染进行综合评价, 分别得到所有采样点枯水期和丰水期地下水的综合污染指数 $P_{\text{综}}$ (表 3)。从表中可以看出, 除个别采样点以外, 枯水期污染综合指数均显著高于丰水期污染综合指数, 这与枯水期地下水中重金属含量比丰水期地下水重金属含量高相对应。表中所有采样点中综合污染指数 $P_{\text{综}} < 1$, 由内罗梅污染指数分级标准可知, 该矿区附近地下水并未受到污染, 这与土壤中重金属受到严重污染存在很大的差异 (表 2)。其原因可能是土壤对重金属有很强的吸附能力, 加之该矿区土壤 pH 较高 (其值为 6~8.5)^[1,9], 降低了重金属在土壤中的纵向迁

移能力^[10]。另外, 重金属在土壤中的迁移能力与其在土壤中的形态有关, 与其在土壤中的总量没有直接关系^[11-13]。国外的一些研究也发现了这个规律, Barryt 等^[14] 研究发现, 进入土壤的重金属主要在土壤 0~20 cm 表层积累, 其纵向迁移趋势不明显。Koemer 等^[15] 对新墨西哥 Roswell 灌区的研究表明, 经过 33 年的污灌, 灌区中地下水并没有发现污水中所特有的重金属元素。

2.4 土壤重金属之间以及土壤重金属与地下水重金属含量之间的关系

该矿区的污染属于多金属复合型污染, 土壤重金属之间以及土壤重金属与地下水重金属含量之间可能存在某种相似性。为了了解它们之间的相互关系, 我们将采样点土壤中各重金属含量以及重金属在土壤与地下水之间的含量两两进行相关性分析。结果如图 2 所示, 土壤中 Cd 的含量与 Zn、As 之间以及 Zn 的含量与 As 之间存在着极显著的正线性相关关系, 其他重金属之间相关性不明显。20 个采样点的土壤中 Cd 与 Zn 含量之间相关系数 $R = 0.978$, Cd 与 As 含量之间相关系数 R

$=0.930$, Zn 与 As 含量之间相关系数 $R=0.934$ 。由此可见,该矿区土壤中 Cd、Zn、As 这 3 种重金属可能是来自同一污染源。而土壤中重金属含量与地下水中重金属含量之间不存在显著的相关性,这与上述关于土壤中重金属纵向迁移能力低的结果相符合。

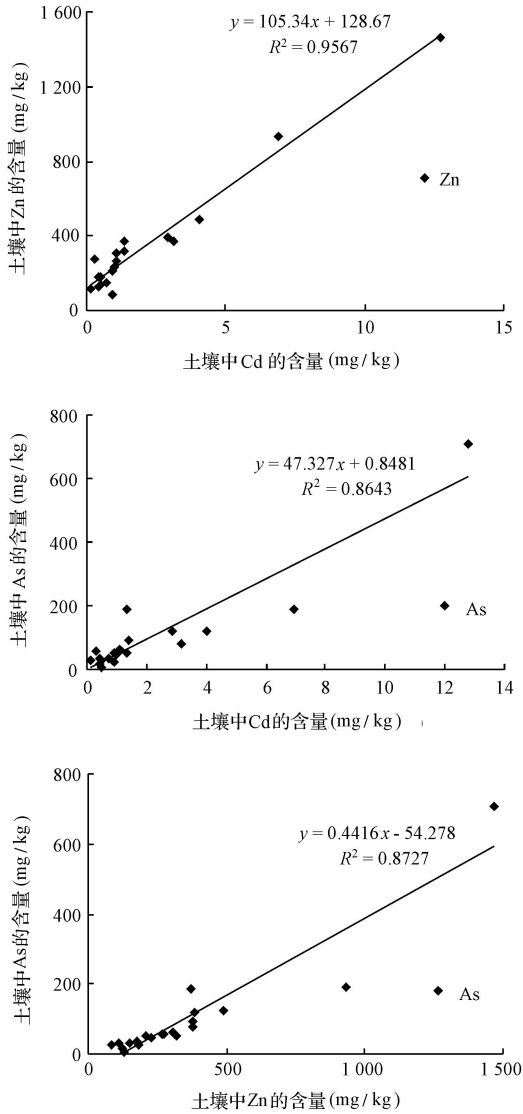


图2 采样点土壤中 Cd、Zn 和 As 含量之间相互关系

Fig. 2 Relationship between contents of Cd, Zn and As in sampling soils

3 结论

(1)对湘南某矿区重金属污染源调查显示,该矿区东河流域有色金属选厂和尾矿库共 11 个,非金属选厂 1 个,采矿场 1 个,冶炼厂 4 个,建材公司 1 个。有色金属选厂、尾矿库、采矿场和冶炼厂是排放重金属较多的污染源。

(2)20 个土壤样品综合污染指数均大于 1,重金属污染率为 100%。污染最严的采样点为 19、1、13 和 4 号采样点,主要的重金属污染元素为 Cd、Hg 和 As。对土壤重金属含量之间的相关性分析结果表明,土壤中 Cd、Zn 和 As 的含量两两之间存在着极显著的正线性相关关系。

(3)重金属元素在土壤中的纵向迁移不明显,该矿区附近 20 个采样点的地下水并未受到污染,综合污染指数 $P_{综} < 1$ 。20 个采样点地下水 Pb、Cd、Zn、As、Hg 浓度均能达到地下水质量标准 (GB/T14848-9) 中的 III 类标准。

参考文献

- [1] 雷梅,岳庆玲,陈国斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征. 生态学报, **2005**, 25(5): 1146-1151
Lei Mei, Yue Qingling, Chen Tongbin, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province. *Acta Ecologica Sinica*, **2005**, 25(5): 1146-1151 (in Chinese)
- [2] 曾敏,廖柏寒,曾清如,等. 湖南郴州、石门、冷水江 3 个矿区 As 污染状况的初步调查. 农业环境科学学报, **2006**, 25(2): 418-421
Zeng Min, Liao Bohan, Zeng Qingru, et al. Investigation of arsenic pollution of 3 mining areas in Chenzhou, Shimen, and Lengshuijiang, 3 cities in Hunan. *Journal of Agro-Environment Science*, **2006**, 25(2): 418-421 (in Chinese)
- [3] 谢文安,谢玲琳. 湖南省有色金属矿床概论. 地质与勘探, **1991**, 27(7): 1-6
Xie Wenan, Xie Linglin. An introduction to nonferrous metallic deposits in Hunan Province. *Geology and Prospecting*, **1991**, 27(7): 1-6 (in Chinese)
- [4] 曾清如,杨仁斌,铁柏青,等. 郴县东西河流域重金属污染农田的防治技术和生态利用模式. 农业环境保护, **2002**, 21(5): 428-431
Zeng Qingru, Yang Renbin, Tie Boqing, et al. Control of pollution of heavy metals on farmland by ecological engineering in East and West valley in Chen County. *Agro-Environment Protection*, **2002**, 21(5): 428-431 (in Chinese)
- [5] 周航,曾敏,刘俊,等. 湖南 4 个典型工矿区大豆种植土壤 Pb、Cd、Zn 污染调查与评价. 农业环境科学学报, **2011**, 30(3): 476-481
Zhou Hang, Zeng Min, Liu Jun, et al. Investigation and evaluation of Pb, Cd, Zn contamination in soybean planting soils of 4 typical mine zones in Hunan Province, China. *Journal of Agro-Environment Science*, **2011**, 30(3): 476-

- 481(in Chinese)
- [6] 王昭,杨国华,陈玺,等. 污灌对地下水的污染及防治对策. 水文地质工程地质, **2008**,35(3):99-103
Wang Zhao, Yang Guohua, Chen Xi, et al. Groundwater contamination caused by wastewater irrigation and its controlling countermeasures. Hydrogeology & Engineering Geology, **2008**,35(3):99-103(in Chinese)
- [7] 张德荣,等编译. 金属毒理手册. 成都:四川科技出版社,1985
- [8] 杜心,朱永官,刘文菊,等. 汞、砷复合污染对水稻生长及吸收汞、砷的影响. 生态毒理学报,2006,1(2):160-164
Du Xin, Zhu Yongguan, Liu Wenju, et al. Effects of combined contaminations of mercury and arsenate on growth, Hg and As uptake of rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture. Asian Journal of Ecotoxicology, **2006**,1(2):160-164(in Chinese)
- [9] 周航. 湖南典型工矿区土壤重金属污染评价与土壤化学改良和大豆种植实验研究. 长沙:中南林业科技大学硕士学位论文,2010(in Chinese)
Zhou Hang. Evaluation on heavy metal contamination in some typical mine zone soils in Hunan Province and research on chemical amelioration of heavy metal contaminated soils and soybean planting. Changsha: Master's Degree Thesis of Central South University of Forestry and Technology, **2010**(in Chinese)
- [10] 王国贤,陈宝林,任桂萍,等. 内蒙古东部污灌区土壤重金属迁移规律的研究. 农业环境科学学报,2007,26(s1):30-32
Wang Guoxian, Chen Baolin, Ren Guiping, et al. Migration of heavy metals in soilsreceiving effluent irrigation in eastern Inner-Mongolia. Journal of Agro-Environment Science, **2007**,26(s1):30-32(in Chinese)
- [11] Ahumada I., Mendoza J., Navarrete E., et al. Sequential extraction of heavy metals in soils irrigated with wastewater. Communications in Soil Science and Plant Analysis, **1999**,30(10):1507-1519
- [12] Tsai L. J., Yu K. C., Chen S. F. Partitioning variation of heavy metals in contaminated river sediment via bioleaching; Effect of sulfur added to total solids ratio. Water Research, **2003**,37(19):4623-4630
- [13] Abul Kashem M. D., Singh B. R., Kawai S. Mobility and distribution of cadmium, nickel and zinc in contaminated soil profiles form Bangladesh. Nutrient Cycling in Agroecosystems, **2007**,77(2):187-198
- [14] Barry G. A., Chudek P. J., Best E. Ke, et al. Estimating sludge application rates to land based on heavy metal and phosphorus sorption characteristics of soil. Water Research, **1995**,29(9):2031-2034
- [15] Koemer E. L., Haws D. A. Long-Term Effects of Land Application of Domestic Wastewater: Roswell, New Mexico, Slow Rate Irrigation Site. Washington: United States Environmental Protection Agency, **1979**