

邓琴,吴迪,秦樊鑫,等.岩溶铅锌矿区土壤重金属污染特征[J].中国岩溶,2016,36(2):248-254.
DOI:10.11932/karst20170213

岩溶铅锌矿区土壤重金属污染特征

邓琴,吴迪,秦樊鑫,杨珍,贾亚琪,程志飞,刘品祯

(贵州师范大学贵州省山地环境重点实验室,贵阳 550001)

摘要:以 DX、DW 铅锌矿区土壤为研究对象,利用原子吸收光谱法(AA800)、原子荧光光谱法(AF-640)测定土壤中铅、镉、镉、铜、锌、镍、汞和砷等重金属的含量,利用单因子污染指数法、N. L. Nemerow 综合污染指数法对比分析土壤中重金属的污染特征,采用 PCC 统计学方法分析矿区土壤中重金属之间的相关性。结果表明:两矿区土壤中除 Cu、Cr 外,其余重金属均已对土壤造成单一或复合污染,其中 Cd 污染最为严重,对综合污染贡献最大。DX、DW 矿区土壤重金属的 Nemerow 指数分别为 27.61、63.54,均达到极强污染水平,且 DW 矿区污染较为严重。DX 矿区,除 Ni 外,Pb、Cr 等 7 种重金属元素之间存相关性;DW 矿区,除 Cr 外,Pb、Ni 等 7 种重金属元素之间存相关性,这可能与二矿区均属多金属伴生、共生矿床有关;土壤中各重金属总含量与 pH 值没有显著的相关性。研究结果将为合理制定矿区土壤污染的修复和治理措施提供依据。

关键词:铅锌矿区;土壤;重金属;污染特征;相关性

中图分类号:X53;X758

文献标识码:A

文章编号:1001-4810(2017)02-0248-07

0 引言

铅锌矿是贵州省主要矿产之一,多数矿床为多种重金属伴生矿床,且分布较广。矿业开发、选冶等生产活动使地表植被破坏严重,扰动了地球表面系统的平衡,引起自然灾害和环境污染的机率大幅提高,这种扰动将造成局部生态系统的崩溃、自然生产能力的锐减^[1-2],尤其是与铅、锌矿伴生的重金属矿物,由于受物理、化学和生物等作用,极易发生风化、流失,它们通过各种途径,在自然界中迁移、积累、释放,从而严重破坏生态环境平衡^[3-5]。重金属是具有潜在危害的重要污染物,与其他污染物不同,其威胁在于它不能被微生物所分解,相反它可在生物体内富集,成为持久性污染物。如果重金属在人体内积累量大,会对人体健康造成威胁,导致癌症等重大疾病发生率大幅上升、甚至发生基因突变^[6-7]。如长期接触一定剂

量的镉会造成肾脏损害,进而导致骨质疏松和软化^[8-10]。1931年日本富山县的“痛痛病”就是镉中毒的典型案列。2009年,国务院办公厅转发了《关于加强重金属污染防治工作指导意见的通知》,将铅、汞、镉、砷、铬等重金属污染防治作为防控重点,一直备受广大学者关注的重金属在土壤、大气、水、植物中的积累、污染、迁移等过程列入民生问题。本研究旨在通过对贵州省 DX、DW 铅锌矿区土壤环境中重金属的污染特征及相关性进行分析,为矿区种植农作物、合理规划利用土地资源提供理论指导,为贵州喀斯特山区发展农业经济、土壤环境保护和重金属防控提供科学依据。

1 研究区域概况

DX、DW 铅锌矿区位于黔东铅锌成矿带南端,东

基金项目:贵州省社会发展攻关项目“贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染防治关键技术与修复示范”[黔科合 SY(2010)3013 号];贵州省自然科学基金项目“贵州铅锌矿区土壤中重金属铅锌污染特征及铅锌富集植物筛选研究”[黔科合 J 字[2010]2031 号]

第一作者简介:邓琴(1978-),女,助理研究员,从事的环境分析化学研究。E-mail:wudi77@126.com。

通信作者:吴迪(1977-),男,副教授,从事环境分析化学教学。E-mail:wudi97@tom.com。

收稿日期:2016-02-26

经 $107^{\circ}38.64' \sim 107^{\circ}39.48'$, 北纬 $26^{\circ}12.98' \sim 26^{\circ}13.924'$, 地处贵州高原东南斜坡, 地势北西高, 南东低。早侏罗断裂为矿区的主要断裂, 呈 NE 向贯穿整个矿区。矿床是以锌、铅、镉为主的多金属伴生矿床。铅锌矿石中镉含量异常高, 除镉、锌外, 锗含量也达到工业要求, 矿石矿物主要由闪锌矿, 其次为方铅矿、黄铁矿、白铁矿和菱锌矿, 还有少量的异极矿、褐铁矿、毒砂、辉锑矿和雄黄等, 偶见自然银、硫镉矿和待定镉的独立矿物。脉石矿物主要是白云石, 还有少量的方解石和粘土矿物等^[11]。DX 矿区正在开采, DW 矿区已废弃。

2 材料与方法

2.1 供试材料

采用全球卫星定位系统 GPS 定位, 结合矿山占地面积、生产能力等因素确定采样区域。DX 矿区采集土壤样品 20 个, DW 矿区采集土壤样品 21 个, 属旱地土壤^[11]。土壤样品按照《农田土壤环境质量监测技术规范》(NY/T395—2000) 要求, 采用梅花形布设采样点, 样品采集深度为 0~20 cm, 除去杂质, 四分法取样, 采样重量约 1 kg, 带回实验室, 自然风干, 粉碎研细, 备用。

2.2 样品处理

土壤采用四酸(HCl-HNO₃-HF-HClO₄)混合消解。Cu、Zn 采用火焰原子吸收光谱法测定, Cd、Pb、Cr 采用石墨炉原子吸收光谱法测定, Hg、As 采用原子荧光光谱法测定。所有试剂均为优级纯, 分析用水均为超纯水, 土壤的 pH 值利用酸度计测定, 水土比(V:m)为 2.5:1^[12-13]。上机测试采用平行双

样, 同时做空白, 以土壤国家标准物质 SI、SII 对样品进行质量控制。

3 评价方法及标准

为能够客观地反映铅锌矿区土壤中重金属污染程度, 本文选用单因子污染指数法(P_i)和 N. L. Nemerow 综合污染指数法($P_{\text{综}}$)^[14-17]对矿区土壤重金属的污染程度进行评价。

3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法计算公式如下:

$$P_i = x_i / y_i \quad (1)$$

式中: x_i 表示样品中污染物 i 测量值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); y_i 表示污染物 i 的标准限值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

P_i 主要反应某污染物超标倍数和污染程度, 表示样品中污染物 i 单因子污染指数。

当 $P_i > 1$ 时, 表示样品已被污染, P_i 的值越大, 说明样品受污染越程度越严重; 当 $P_i \leq 1$ 时, 表示样品是清洁的, 未受到污染。

3.2 N. L. Nemerow 综合污染指数法

N. L. Nemerow 综合污染指数法是用来评价某一研究点样品中的多种重金属综合污染水平, 是表示多种重金属复合污染。计算公式如下:

$$P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{imax}}^2}{2}}$$

式中: $P_{\text{综}}$ 表示 N. L. Nemerow 内梅罗综合指数; P_{imax} 表示某采样点样品单因子污染指数的最大值; P_{ave} 为某样点样品单因子污染指数的平均值。综合评价分级标准见表 1。

表 1 综合评价分级标准

Table 1 Classification standards for comprehensive evaluation

等级	综合污染指数	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
3	$1.0 < P_{\text{综}} \leq 2.0$	轻度污染	土壤污染物超出标准视为轻度污染作物开始污染
4	$2.0 < P_{\text{综}} \leq 3.0$	中度污染	土壤、作物中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3.0$	重污染	土壤、作物受污染已相当严重

3.3 PCC方法

PCC方法即为 Pearson Correlation Coefficient 的简称^[18]方法,是一种统计学方法,可以定量地衡量变量之间的相关性。当对一个样本进行计算时, Pearson 相关系数的大小由 r 值决定,它反映了两个变量线性相关的程度, $-1 < r < +1$ 。当相关系数为 $+1$ 时,表示变量之间是完美的正线性相关,当相关系数为 -1 时,表示变量之间是完美的负线性相关。当相关系数为 0 时,表示两个变量之间没有线性相关性。

3.4 土壤环境质量标准

为正确评价矿区土壤环境质量,本文采用旱地土壤环境质量标准^[19](GB15618-1995)为评价标准(表2)。

3.5 数据统计

运用 Systat SigmaPlot1 1.0 进行绘图;数据统计主要利用 EXCEL 2003 和 SPSS1 8.0 进行数据统计、分析。

4 结果及讨论

4.1 矿区土壤环境质量及污染特征分析

表2 土壤环境质量标准极限(二级)

Table 2 Environmental quality standard limit value for soil(II class)

元素	土壤极限(GB15618-1995)		
	pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
镉 ≤	0.30	0.60	1.0
汞 ≤	0.30	0.50	1.0
砷 水田 ≤	30	25	20
砷 旱地 ≤	40	30	25
铜 农田等 ≤	50	100	100
铅 ≤	250	300	350
铬 水田 ≤	250	300	350
铬 旱地 ≤	150	200	250
锌 ≤	200	250	300
镍 ≤	40	50	60

4.1.1 矿区土壤重金属含量

土壤中锌、汞、砷等重金属的含量及土壤的 pH 值测定结果见表3。

表3 DX、DW 矿区土壤重金属含量($\times 10^{-6}$)

Table 3 Content of heavy metals in soil of DX and DW mining areas

项目	pH 值	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	As	
DX	背景值	64.67	0.82	7.56	7.89	36.85	986.36	0.46	16.56	
	最小值		194.07	10.36	38.37	22.61	40.64	4 187.44	0.94	20.71
	最大值	7.02	675.27	45.26	112.55	70.87	254.43	9 574.40	4.78	61.64
	平均值		410.04	21.79	64.66	41.82	91.22	6 219.34	2.61	39.69
	标准差		139.52	9.46	16.54	10.92	49.56	1 542.45	0.91	10.98
DW	背景值		23.43	1.34	7.89	52.34	38.56	1 224.23	0.25	8.54
	最小值		345.83	19.19	23.48	35.65	29.99	5 202.50	1.54	27.40
	最大值	6.89	737.35	82.06	102.37	55.24	114.44	11 824.04	8.46	68.51
	平均值		499.47	51.55	63.88	44.10	54.20	8 061.23	4.25	41.86
	标准差		105.43	18.85	22.52	4.86	21.00	1 969.17	1.84	10.79
GB15618-1995		300.0	0.60	200.0	100.0	50.0	250.0	0.50	30.0	

从表3可知,研究区域土壤 pH 值为 7.02、6.89,介于 6.5~7.5 之间,故采用土壤环境质量标准极限 GB15618-1995(二级)为评价标准,DX 矿区土壤中锌含量最高 $9 574.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铅次之 $675.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,DW 矿区土壤中锌含量最高 $11 824.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,铅次之 $737.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。两矿区的土壤中重金属铅、锌、镉、汞的最低含量均超过土壤环境质量标

准相应的含量。

4.1.2 矿区土壤环境质量评价

对于多种重金属复合污染的土壤,通常采用 Nemero 指数来评价,结合表1和表3,DX、DW 矿区土壤重金属的单一污染指数(P_i)、综合污染指数($P_{\text{综}}$)计算结果见表4。

表 4 DX、DW 矿区土壤重金属的单因子污染指数 (P_i) 和综合污染指数 ($P_{综}$)

Table 4 Single-factor pollution and Nemerow index of soil in DX and DW mining areas

项目	pH 值	P_i								$P_{综}$	
		Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	As		
DX	最小值	0.65	17.27	0.19	0.23	0.81	16.75	1.88	0.69	13.37	
	最大值	7.02	2.25	75.43	0.56	0.71	5.09	38.30	9.56	2.05	56.60
	平均值		1.37	36.32	0.32	0.42	1.82	24.88	5.22	1.32	27.61
DW	最小值	1.15	31.98	0.12	0.36	0.60	20.81	3.08	0.91	24.10	
	最大值	6.89	2.46	136.77	0.51	0.55	47.30	16.92	2.28	101.13	
	平均值		1.66	85.92	0.32	0.44	1.08	32.24	8.50	1.40	63.54
GB15618-1995		300.00	0.60	200.00	100.00	50.00	250.00	0.50	30.00		

由表 2、4 可知, Cr 和 Cu 的单因子指数均小于 1.00, 表明两矿区 Cr、Cu 均为未产生污染; Zn、Hg、Cd 单因子指数均表现为 $P_i > 3.0$, 表明两矿区已受到 Zn、Hg、Cd 等重金属的严重污染; Pb、Ni、As 的单因子指数均表现为 $1.0 < P_i \leq 3.0$, 表明两矿区已受到 Pb、Ni、As 等重金属的中度污染。对综合污染指数贡献大小顺序均为: $Cd > Zn > Pb > Hg > As > Ni > Cu > Cr$, 本研究结果与杨刚等^[20]对西南山地铅锌矿区耕地土壤重金属的研究结果基本一致。

由 Nemerow 指数评价结果表明, DX、DW 矿区土壤 Nemerow 指数分别为 27.61、63.54, 两矿区土壤已受到重金属严重复合污染, 达到极强污染程度, 土壤环境质量较差, 其中 Zn、Cd 对 $P_{综}$ 值的贡献最大, DW 矿区土壤环境综合污染更为严重。

4.1.3 DX 和 DW 矿区土壤中重金属污染特征比较分析

DX、DW 矿区虽然是多种重金属伴生、共生矿床, 但受土壤有机质、气候、pH 值、粒度等因素以及不同重金属的毒性差异及环境对重金属污染的敏感程度的影响, 土壤重金属污染在一定时期内并不会表现出对环境的危害, 但当其累积量超过土壤承受能力、或当土壤环境条件发生变化时, 重金属污染元素就可能被活化, 导致严重的生态危害, 被称为“化学定时炸弹”^[21-22]。研究表明, DX、DW 铅锌矿区土壤已受 Pb、Cd、Cu、Zn、Hg、As 等重金属单一或复合污染, 其中 Cd 元素污染对综合污染贡献最大。这可能与矿山在开采、选冶过程中产生的废弃物(如尾矿、矸石等)露天堆置, 经风吹、日晒、雨淋, 使得其中含有的酸、碱、毒物、重金属等成分, 通过大气飘尘或雨水淋滤、渗透进入地表水体, 导致堆置场原有生态系统遭到破坏, 污染周边土地, 污染影响甚至超过废弃物堆置场的地域和空间^[23-24]。图 1、图 2 为 DX 与 DW

矿区土壤中重金属污染特征对比分析图。

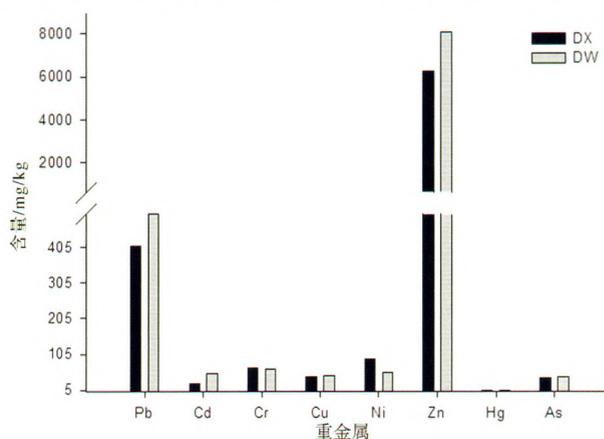


图 1 DX 矿区与 DW 矿区土壤中重金属平均含量比较
Fig. 1 Comparison of average heavy metal content in DX and DW mining areas

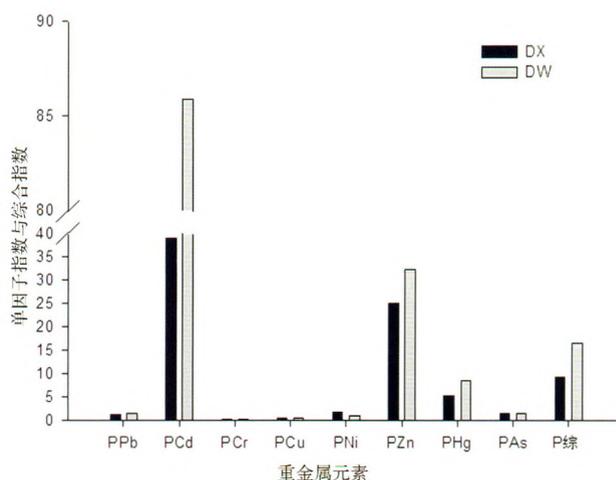


图 2 DX 矿区与 DW 矿区土壤中重金属平均单因子指数及综合指数比较

Fig. 2 Comparison of average single-factor pollution and Nemerow indexes in DX and DW areas

由图1和图2可知,除Cr、Ni外,DW矿区土壤中Pb、Cd、Cu、Zn、Hg、As的含量均大于DX矿区土壤中的含量,而两矿区土壤中Cd、Zn的含量相差不大。DX矿区DW矿区土壤中重金属Cd、Zn和Hg的 P_i 分别为36.32、24.88、27.61和85.92、32.24、63.54,可见DW矿区Cd、Hg的 P_i 是DX矿区的 P_i 的2倍。根据Nemero指数评价结果,DX和DW矿区土壤均存在重度的重金属复合污染,且DW矿区Nemero指数高于DX矿区,这与DW矿区属废弃矿区,而DX矿区为正在开采矿区有一定关系。另外产生污染的另一原因是矿区单一的采矿目标和“掠夺式”的开采。不合理的规划不仅造成资源浪费,也导

致除铅、锌以外其他重金属元素长期暴露于地表,日晒雨淋,经淋滤渗透作用或随地表水进入矿区土壤环境中,成为矿区周围土壤中重金属的主要来源,造成极为严重的土壤环境重金属污染^[25-26]。

4.2 两矿区土壤中重金属之间的相关性分析

研究重金属之间的相关性可以推测重金属的来源是否相同。利用SPSS18.0软件、PPC方法对其土壤中重金属含量之间、与pH之间的相关性进行统计分析,DX矿区(样本数20个)、DW矿区(样本数21个)土壤重金属元素Pb、Cd、Cr、Cu、Ni、Zn、Hg、As以及pH值之间的相关性分析结果见表5。

表5 DX、DW矿区土壤重金属元素之间的相关系数

Table 5 Correlation coefficients of heavy metal contents in soil of DX and DW mining areas

	pH	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Zn	Hg	As	
DX 矿区	pH	1	0.04	0.002	-0.15	-0.005	-0.15	-0.02	0.004	-0.02
	Pb		1	0.18	0.60**	0.67**	0.35	0.44	0.45*	0.76**
	Cd			1	0.11	0.59**	0.01	0.65**	0.16	0.20
	Cr				1	0.52*	0.32	0.55*	0.30	0.76**
	Cu					1	0.23	0.65**	0.54*	0.63**
	Ni						1	0.04	-0.14	0.18
	Zn							1	0.51*	0.66**
	Hg								1	0.59**
	As									1
	DW 矿区	pH	1	-0.25	-0.15	0.08	0.071	-0.31	-0.11	-0.25
Pb			1	0.66**	-0.57**	0.20	0.53*	0.73**	0.42	0.20
Cd				1	-0.72**	0.30	0.61**	0.94**	0.61**	0.14
Cr					1	-0.12	-0.69**	-0.69**	-0.27	-0.02
Cu						1	0.15	0.31	0.49*	0.55**
Ni							1	0.66**	0.33	-0.06
Zn								1	0.46*	0.03
Hg									1	0.57**
As										1

注:2-tailed 检验,DX-n=20,DW-n=21,**p<0.01,*p<0.05。

表5表明,Pb与Cr、Cu、As的相关系数分别为0.60、0.67和0.76,在1%水平上,存在显著正相关性,Pb与Hg的相关系数为0.45,在5%水平上存在显著正相关性;Cd与Cu、Zn的相关系数分别为0.59和0.65,在1%水平上存在极显著正相关性;Cr与Cu、Zn的相关系数分别为0.52和0.55,在5%水平上存在极显著正相关性,Cr与As的相关系数为

0.76,在1%水平上存在极显著正相关性;Cu与Zn、As的相关系数分别为0.65和0.63,在1%水平上存在极显著正相关性,Cu与Hg的相关系数为0.54,在5%水平上存在极显著正相关性;Zn与Hg的相关系数为0.51,在5%水平上存在显著正相关性,Zn与As的相关系数,为0.66,在1%水平上存在极显著正相关性;Hg与As的相关系数为0.59,在1%水平上存在极

显著正相关性。说明 Pb、Cd、Cr、Cu、Zn、Hg、As 等 7 种重金属元素的来源相同;Ni 和其他 7 种元素没有显著的相关性,说明其来源与其它 7 种元素不同。

同理,Pb 与 Cd、Zn 的相关系数分别为 0.66 和 0.73,在 1%水平上存在极显著正相关性,Pb 与 Ni 的相关系数为 0.53,在 5%水平上存在显著正相关性;Pb 与 Cr 的相关系数为-0.57,在 1%水平上存在明显的负相关性;Cd 与 Ni、Zn、Hg 的相关系数分别为 0.61、0.94 和 0.61,在 1%水平上存在极显著正相关性;Cd 与 Cr 的相关系数为-0.72,在 1%水平上存在明显的负相关性;Cr 与 Ni、Zn 的相关系数分别为-0.69 和-0.69,在 1%水平上存在极显著负相关性;Cu 与 As 的相关系数分别为 0.55,在 1%水平上存在极显著正相关性,Cu 与 Hg 的相关系数为 0.49,在 5%水平上存在极显著正相关性;Zn 与 Hg 的相关系数为 0.46,在 5%水平上存在显著正相关性;Hg 与 As 的相关系数为 0.57,在 1%水平上存在极显著正相关性,说明 Pb、Cd、Cu、Ni、Zn、Hg 和 As 等 7 种重金属元素的来源相同。Cr 和其它 7 种元素存在显著的负相关性,说明其来源与其它 7 种元素不同,两矿区均属多种重金属伴生、共生矿床。由表 5 的统计分析可知,pH 值对土壤重金属含量的相关系数很小。DX 矿区中,pH 对 Cr 和 Ni 的相关性较大,但绝对值仅为 0.15 和 0.15,但都为负相关;DW 矿区土壤中重金属与 pH 之间没有明显的相关性,说明 pH 对土壤中重金属总含量的影响不大。

通常治理土壤污染成本较高,难度较大,治理周期较长,而土壤污染问题又具有明显的隐蔽性和滞后性等特点。因此,在矿山设计建设时就应注意对尾矿堆积场的选址及管理,防止因雨水等淋滤渗透形成二次污染,同时合理规划利用矿区土地,禁止在重金属污染严重的土壤中种植农产品,降低矿区污染对人体健康的威胁。

5 结 论

本文有针对性地选择了贵州省典型的废弃铅锌矿区为调查对象,研究了两矿区土壤中的重金属元素的污染特征及相关性,结果表明,两矿区除 Cu 和 Cr 外,其余重金属对土壤已造成单一或复合污染,Cd 污染最为严重,DX、DW 矿区土壤中重金属 Nemerlo 指数已超过最大污染级别,土壤属极强污染水平,Cd、

Zn 对 $P_{综}$ 值贡献最大。DX 矿区:除 Ni 外,Pb、Cr 等 7 种重金属元素之间存相关性;DW 矿区:除 Cr 外,Pb、Ni 等 7 种重金属元素之间存相关性。矿区土壤 pH 值对土壤重金属含量没有显著的相关性,说明 pH 对土壤中重金属总含量的影响不大。研究结果对矿区合理规划种植农作物、合理利用土地资源、合理开发利用矿产资源以及土壤环境重金属污染治理修复都有指导意义,土壤重金属污染应引起地方矿产资源、土地管理部门的高度重视。

参考文献

- [1] 孙健,铁柏清,秦普丰,等.铅锌矿区土壤和植物重金属污染调查分析[J].植物资源与环境学报,2006,15(2):63-67.
- [2] 陈怀满.土壤中化学物质的行为与环境质量[M].北京:北京大学出版社,2002.
- [3] 杨胜香,李明顺,李艺,等.广西平乐锰矿区土壤、植物重金属污染状况与生态恢复研究[J].矿业安全与环保,2006,3(1):21-23.
- [4] 蔡美芳,党志,文震,等.矿区周围土壤中重金属危害性评估研究[J].生态环境,2004,13(1):6-8.
- [5] 马光,贺旭峰,胡斌,等.焦作博爱农场与中马村矿土壤及玉米重金属污染分析[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):43-46.
- [6] 樊连杰,裴建国,杜毓超,等.广西红水河下游马山地区地下水重金属含量及分布特征[J].中国岩溶,2015,34(4):410-414.
- [7] 任坤,杨平恒,杜伟,等.重庆老龙洞地下河间隙水重金属污染及毒性评估[J].中国岩溶,2014,33(2):231-237.
- [8] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J].农业环境科学学报,2013,32(3):409-417.
- [9] 朱桂芬,张春燕,王建玲,等.新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J].农业环境科学学报,2009,28:263-268.
- [10] 杜毓超,裴建国,卢丽,等.典型岩溶区地下水系统重金属元素分布特征浅析[J].中国岩溶,2015,34(4):348-353.
- [11] 吴迪.贵州典型铅锌矿区土壤-植物体系中重金属污染特征研究[D].贵阳:贵州大学,2010.
- [12] 吴迪,邓琴,秦樊鑫,等.贵州省典型铅锌矿区土壤重金属污染状况评价[J].贵州农业科学,2010,38(1):92-94.
- [13] 劳家桢.土壤农化分析手册[M].北京:中国农业出版社,1988:336-339.
- [14] 王勇.长春市郊区土壤-水稻体系重金属含量及迁移规律[J].吉林农业大学学报,2008,30(5):716-720.
- [15] 邦国璋.泾河流域农业土壤重金属污染调查与评价[J].干旱区研究,2008,25(5):627-629.
- [16] 吴迪,李存雄,邓琴,等.典型铅锌矿区土壤-农作物体系重金属含量及污染特征分析[J].安徽农业科学,2010,38(2):849-851.
- [17] 湛金吾,孙一铭,杨占南,等.三峡库区云阳消落带土壤重金属形态及其在植物中的富集和转移[J].中国岩溶,2012,31(4):

- 415-422.
- [18] 董霁红,卞正富,于敏,等. 矿区充填复垦土壤重金属分布规律及主要农作物污染评价[J]. 中国矿业大学学报,2010,39(3):341.
- [19] 邓琴,吴迪,秦樊鑫,等. 铅锌矿区土壤重金属含量的调查与评价[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版),2010,28(3):34-37.
- [20] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报,2011,31(9):2014-2021.
- [21] 邱海源. 土壤重金属潜在生态危害评价及其同源相关性研究[J]. 资源节约与环保,2011(1):68-70.
- [22] 李锐,高杰,张莉,等. 黔北白云岩红色风化壳元素地球化学特征[J]. 中国岩溶,2014,33(4):396-404.
- [23] 杨刚,沈飞,钟贵江,等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷物产品重金属含量及健康风险评价[J]. 环境科学学报,2011,9(31):2014-2021.
- [24] 张治国. 复垦区土壤重金属污染特征及农田杂草修复潜力研究[D]. 淮南:安徽理工大学,2011.
- [25] 孟忠常,吴迪,邓琴,等. 贵州典型铅锌矿区土壤重金属污染特征与生态危害评价[J]. 贵州农业科学,2012,40(8):218-221.
- [26] 李贵,童方平,刘振华. 衡山水口山铅锌矿区重金属污染现状的分析[J]. 中南林业科技大学学报,2012,32(7):105-109.

Pollution characteristics of heavy metals in soil of lead-zinc mining in karst areas

DENG Qin, WU Di, QIN Fanxin, YANG Zhen, JIA Yaqi, CHENG Zhifei, LIU Pinzhen

(Key Laboratory of Information System of Mountain Area and Protection of Ecological Environment
of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract This study focused on the heavy metals in soil in DX and DW lead-zinc areas. By using the methods of atomic absorption spectrometry (AA800), atomic fluorescence spectrometry (AF-640) and other instruments, we measured the contents of heavy metals, including zinc (as Zn), mercury (as Hg), chromium (as Cr), cadmium (as Cd), copper (Cu), nickel (Ni), lead (Pb) and arsenic (As). By means of the single-factor pollution index and Nemerow index methods, we compared the pollution characteristics in the soil. PPC statistics were used to analyze the correlation of heavy metal pollution in the soil. The results indicate that heavy metals in soil have caused single or complex pollution and the soil was heavily polluted by Cd in the two areas. The Nemerow indexes in these two areas are 27.61 and 63.54, respectively, implying that the soil was highly polluted and such contamination in the DW area was more serious than the DX area. Except for Ni, the other seven heavy metals in the DX are correlated with each other, which is likely related to poly-metallic accompanying and symbiotic deposits in the mining area. The total content of heavy metals and the pH have no significant correlation in the soil. The established models show high fitting precision and the research results can provide evidence for rehabilitating the polluted land in mine areas and setting corresponding management measures.

Key words lead-zinc mining area, soil, heavy metal, pollution characteristics, correction

(编辑 张玲)