

云南金顶铅锌矿区水系沉积物中镉的地球化学分布及其环境质量

李航^{1,2}, 肖唐付^{2*}, 双燕¹, 何立斌^{2,3}, 宁增平^{2,3}, 李大华¹, 朱长生¹

(1. 重庆地质矿产研究院, 重庆 400042; 2. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 云南金顶超大型矿区长期矿业活动对矿区水系沉积物造成了严重的镉污染。北大沟河流沉积物中 Cd 含量低于南大沟; 泚江不同河段沉积物中 Cd 含量差异较大, 矿区上游泚江段沉积物中镉含量较低(平均值低于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 泚江下游污染段沉积物中 Cd 含量显著增加(平均值为 $266 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。沉积物中 Cd 污染系数最大(R 为 $21.9 \sim 45.2$), 高于 Zn(R 为 $4.9 \sim 9.7$)和 Pb(R 为 $2.7 \sim 4.6$)。地累积指数法分析结果显示, 矿区水系沉积物污染元素按污染强度分为: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$ 。南大沟和泚江矿区下游段部分沉积物达到严重污染, 北大沟大部分河段沉积物为重污染, 少数河段沉积物为偏重污染或中度污染, 泚江金顶段上游河段沉积物为轻度污染或无污染。从南大沟汇入泚江口段到下游温庄村段沉积物中重金属污染有增强的趋势。

关键词: 河流沉积物; 地累积指数; 镉污染; 金顶铅锌矿床

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)10-2894-05

Geochemical Distribution and Environmental Quality of Cadmium in River Sediment Around the Jinding Pb-Zn Mine Area in Yunnan

LI Hang^{1,2}, XIAO Tang-fu², SHUANG Yan¹, HE Li-bin^{2,3}, NING Zeng-ping^{2,3}, LI Da-hua¹, ZHU Chang-sheng¹

(1. Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A long-term mining activity of Jinding Pb-Zn mine area in Yunnan has caused the serious cadmium pollution to the river sediments of the ambient area. The Cd contents of Beidagou river sediments (mean value $< 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) are lower than those of Nandagou river sediments (mean value = $266 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The Cd contents of river sediments in different section of Bijiang river occur distinct difference. The Cd contents are rather lower in upstream sediments of Bijiang river, and increase substantially along downstream contaminated section of Bijiang river. The Cd pollution coefficient is higher ($R = 21.9 \sim 45.2$) than Zn ($R = 4.9 \sim 9.7$) and Pb ($R = 2.7 \sim 4.6$). The degree of pollution is estimated by the geoaccumulation index, which indicates the following rank of pollution elements: $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{Pb}$. The river sediments are extremely contaminated in Nandagou river and downstream section of Bijiang river from Nandagou, strongly contaminated in most part of Beidagou river, moderately to strongly contaminated in few river section of Nandagou river, uncontaminated or moderately contaminated in upstream of Bijiang river from Jinding. The heavy metals pollution of river sediments presents increasing trend from Nandagou outlet to Wenzhuang section of Bijiang river.

Key words: river sediment; geoaccumulation index; cadmium pollution; Jinding Pb-Zn deposit

镉(Cd)是典型的有毒有害重金属元素,是世界上公认的 13 种优先考虑的金属污染物元素之一^[1]。至 20 世纪 60 年代日本发生震惊世界的“痛痛病”中毒事件以后,镉的环境污染问题引起了世人的普遍关注^[2]。20 世纪 80 年代以来,我国已有矿山附近土壤中镉污染的报道^[3, 4],此外,北美、北欧和东亚等国相继出现了因铅锌矿山的合理开采造成的镉生态环境污染问题,再次引起了各国科学工作者对镉污染的重视^[5-7]。

金顶超大型铅锌矿位于横断山脉南端的山谷地带,矿区断裂构造发育,SN 向泚江断裂、NNW 向断裂和 NE 向木里-丽江超壳深大断裂以及 EW 向大断

裂在此交汇^[8]。该矿床已探明 Pb-Zn 控制金属储量 1 500 万 t^[9],其中 Cd 金属储量达 17 万 t,达到大型矿床规模^[10]。长期的矿山开采活动产生大量含 Cd 的矿山废弃物,并在汛期暴雨冲刷下从南大沟和北大沟流入泚江,在表生风化作用下淋滤出 Cd 等微量元素^[11],污染矿区周边及下游水环境^[12],进而迁移到矿区下游土壤中并在植物中富集^[4],导致缓变型地

收稿日期: 2007-09-27; 修订日期: 2007-12-05

基金项目: 重庆市自然科学基金项目(2008); 国家自然科学基金项目(40773072); 中国科学院“西部之光”项目(2006)

作者简介: 李航(1977~),男,博士,主要研究方向为矿山环境地球化学, E-mail: lihangoq@163.com

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

球化学灾害的发生^[13]. 据统计, 金顶铅锌矿从 1987 ~ 1992 年仅 5 a 时间共采矿 31 万 t, 其中损失镉超过 5 000 t(相当于一个大型镉矿床)^[14], 可见这类富镉铅锌矿对周围环境的释放量是相当惊人的^[15]. 前人曾对该矿区沱江不同河段沉积物中 Cd 作了总量及形态分析^[16, 17], 但未深入探讨沱江 Cd 污染成因及沉积物的环境质量, 本研究针对沱江不同河段及矿区两条主要支流沉积物中 Cd 等危害元素作了系统的分析与对比, 阐明了 Cd 的污染成因及矿区沉积物的环境质量, 以期为进一步认识矿山 Cd 的水环境污染与危害以及 Cd 的污染防治具有积极的意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

样品采集过程中采用卫星定位仪(GPS)跟踪布点, 共采集 32 件河流沉积物样品和 3 件水塘沉积物样品. 为了研究矿区两条主要支流(北大沟和南大沟)对沱江污染的影响, 河流沉积物样品分别采于两支流和沱江不同河段, 其中 8 件采于北大沟, 7 件采于南大沟, 12 件采于沱江矿区段至下游河段, 5 件采于研究对照区沱江矿区段的上游主干及支流河段, 另外 3 件水塘沉积物样品采于北厂和架崖山低洼水塘中(图 1). 金顶矿区沱江段上游水系沉积物中沉积物沉积时间较长, 原生沉积物占主导, 而北大沟、南大沟和沱江矿区段下游部分沉积物沉积时间较短, 绝大部分沉积物由近期矿业活动导致的大量废弃矿渣组成.

水系沉积物采集于沉积物表层 0 ~ 20 cm, 装入离心管中带回实验室离心, 取上清液过滤并作适当稀释处理后备用. 离心后的沉积物自然风干后碾磨至 200 目备用. 未及时测定的样品在 0 ~ 5℃ 温度下冷藏保存(下同).

1.2 分析方法

样品分析过程中所用的水为去离子水(18.2 MΩ·cm, Millipore), 所用硝酸、盐酸均由优级纯经亚沸蒸馏纯化, 氢氟酸为优级纯.

1.2.1 沉积物中元素提取方法

沉积物的消解方法如下: ①将 Teflon 坩埚放入大烧瓶煮 5 ~ 8 h, 温度低于 100℃, 以免溅出, 然后取出坩埚加入 2 ~ 3 mL 超纯硝酸, 在加热台上蒸 2 ~ 3 h(坩埚加盖)后用超纯水冲洗 3 遍待用. ②准确称取 0.2 g 样品放入坩埚内, 并对坩埚编号. ③分别加入 4 mL 浓 HF 酸和 1 mL 浓 HClO₄, 放在加热台上蒸干直到白烟冒完, 再加入 1 mL 浓 HClO₄ 赶走多余的

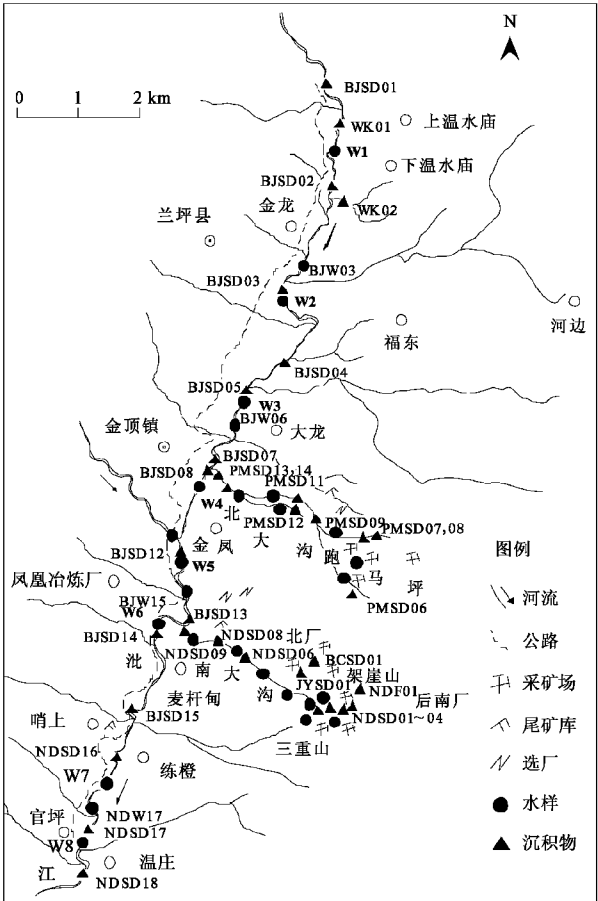


图 1 金顶矿区水及水系沉积物采集位置

Fig.1 Sampling sites of river sediments at Jinding mine area

HF 酸和氟硅酸, 蒸干到不冒白烟为止. ④加入 2 ~ 3 mL 稀硝酸把消解后的样品析出到容量瓶中, 再用超纯水分 3 次涮洗 Teflon 坩埚, 将清洗液移入容量瓶中, 定容到 100 mL 容量瓶待测.

1.2.2 分析仪器

沉积物中 Cd、Pb、Zn 的含量分析测试工作在中国地质科学院国家地质实验测试中心完成, 分析仪器为 ICP-MS(Thermo X-Series).

2 结果与讨论

2.1 沉积物中镉的地球化学分布

沉积物中 Cd、Pb、Zn 的分析测试结果见表 1 和表 2.

北大沟沉积物中 Cd 含量为 12.5 ~ 249.1 mg·kg⁻¹, 平均值为 129.2 mg·kg⁻¹; Pb 含量为 251.8 ~ 3 913 mg·kg⁻¹, 平均值为 1 879 mg·kg⁻¹; Zn 含量为 684 ~ 10 880 mg·kg⁻¹, 平均值为 5 820 mg·kg⁻¹. 南大沟沉积物中 Cd 含量为 94.6 ~ 420.9 mg·kg⁻¹, 平均值为 253.6 mg·kg⁻¹; Pb 含量为 365.8 ~ 7 222

表 1 金顶超矿区水系沉积物中主要危害元素含量/mg•kg ⁻¹				
Table 1 Main elements contents of river sediments in Jinding mine area/mg•kg ⁻¹				
采集点	样 品	Cd	Pb	Zn
采区水塘	BCSD01	420.9	5 044.1	22 016
	JYSD01	94.6	365.8	11 997
	NDF01	148.4	1 285.7	4 874
	NDSD01	239.9	1 158.4	8 846
南大沟	NDSD02	107.2	767.4	5 058
	NDSD03	276.5	1 751.7	10 716
	NDSD04	213.9	1 430.5	8 581
	NDSD06	246	2 817	9 180
	NDSD08	317.9	3 418.9	11 465
	NDSD09	373.8	7 222.1	12 753
	PMSD06	163.7	1 554.9	7 227
	PMSD07	144.6	2 086.6	6 416
北大沟	PMSD08	249.1	3 913	10 880
	PMSD09	146.3	2 115.1	7 006
	PMSD11	12.5	251.8	684
	PMSD12	152.9	2 365.3	7 205
	PMSD13	96.5	1 744.5	4 659
	PMSD14	67.7	997.5	2 480
	BJSD04	77.2	858.2	4 356
	BJSD05	586.7	4 964	18 782
沱江矿区段 至下游污染段	BJSD07	124.4	1 221.1	5 373
	BJSD08	144.7	1 596.3	6 270
	BJSD10	106.2	1 479.5	4 938
	BJSD12	94.2	1 932.8	3 993
	BJSD13	254.1	2 355.3	13 197
	BJSD14	210.1	2 859.8	9 994
	BJSD15	218.9	3 943.6	1 0274
	BJSD16	496.2	5 172.9	21 749
	BJSD17	241.1	3 200	10 272
	BJSD18	453.7	6 285.1	22 812
对照区(沱江 上游未污染段)	BJSD01	4.9	456.3	794
	BJSD02	9.8	1 479.6	2 359
	BJSD03	3.5	138.3	437
	WK01	6.1	162.7	805
	WK02	5.2	198.1	1 030
流域沉积物背景值		5.9	487	1 085

mg•kg⁻¹,平均值为2 652 mg•kg⁻¹; Zn 含量为4 874 ~ 22 016 mg•kg⁻¹,平均值为9 514 mg•kg⁻¹. 从分析结果可以看出,北大沟中沉积物重金属浓度远低于南大沟,这可能是由两条支流接纳污染物类型的差异造成的,北大沟主要污染物为酸性废水(AMD)和尾矿库尾矿浆,而南大沟接纳污染物主要是重金属含量较高的矿山废渣.

沱江不同河段沉积物中 Cd 等重金属含量差异较大.矿区上游沱江段沉积物中镉含量较低,Cd 含量一般不超过 10 mg•kg⁻¹, Pb 含量低于 1 000 mg•kg⁻¹, Zn 含量低于 2 000 mg•kg⁻¹; 矿区沱江下游污染段沉积物中 Cd 等重金属均大幅度增加,沉积物

中 Cd 含量为 77.2 ~ 587 mg•kg⁻¹,平均值为 266 mg•kg⁻¹, Pb 含量为 858 ~ 6 285 mg•kg⁻¹,平均值为 3 183 mg•kg⁻¹, Zn 含量为3 993 ~ 22 812 mg•kg⁻¹,平均值为11 605 mg•kg⁻¹.

为了查明矿区不同采样点沉积物中重金属的污染程度,本研究选择沱江上游(对照区)水系沉积物中重金属元素含量平均值作为矿区流域沉积物背景值,来计算沉积物中 Cd、Pb、Zn 的污染系数,即 $R = c(\text{实测值})/c(\text{背景值})$. 计算结果表明,矿区各采样点沉积物中污染程度最高的是 Cd, R 值为 21.9 ~ 45.2; 其次是 Zn, R 值为 4.9 ~ 9.7; 最后是 Pb, R 值为 2.7 ~ 4.6. 沉积物中 Cd 的污染最严重的是沱江矿区段下游水体沉积物,这可能是近 50 年的矿业活动造成大量废弃矿渣累积沉淀的结果造成的,其次是南大沟沉积物,北大沟沉积物中 Cd 污染程度最轻(图 2).

沉积物中 Cd、Pb、Zn 重金属含量总体表现为:① 矿区上游对照区沉积物中浓度较低,反应了流域元素背景值特征;② 北大沟和南大沟沉积物中重金属含量显著增高,表明已严重受到矿区尾矿库、选厂和废石堆的影响;③ 矿区流域水系沉积物中最大的污染元素是 Cd. 沱江是金顶铅锌矿区污染元素的唯一受纳水体,其沉积物中重金属异常富集,成为该矿区污染元素最大的“汇”.

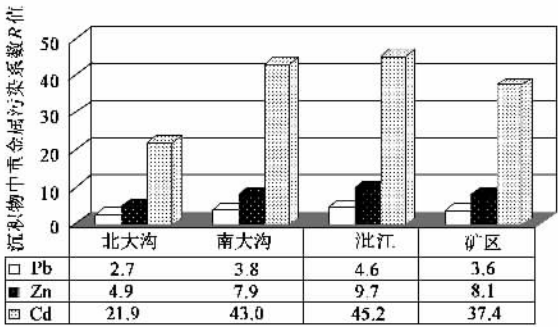


图 2 金顶矿区沉积物中 Cd、Pb、Zn 的污染系数
Fig.2 Cd/Pb/Zn pollution coefficients of river sediments in Jinding mine area

2.2 矿区沉积物的环境质量评价

地累积指数法是德国海德堡大学沉积物研究所学者 Müller 于 1969 年提出的^[18],是在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,尤其是用于研究现代沉积物中重金属污染的评价,是目前较为广泛应用的环境质量评价方法^[19, 20].

地累积指数的计算公式如下:

表 2 沉积物中主要污染元素含量统计/mg•kg⁻¹

Table 2 Statistics of main elements contents in river sediments /mg•kg ⁻¹							
采样点	元素	显著水平参数	标准偏差	样本容量	平均值	置信区间	样本平均值 置信区间
北大沟	Pb	0.05	1 001.3	8	1 878.6	693.8	1 878.6 ± 693.8
	Zn	0.05	2 961.2	8	5 819.6	2 052.0	5 819.6 ± 2 052.0
	Cd	0.05	66.2	8	129.2	45.9	129.2 ± 45.9
南大沟	Pb	0.05	2055.9	7	2 652.3	1 523.0	2 652.3 ± 1 523.0
	Zn	0.05	2 299.8	7	9 514.2	1 703.7	9 514.2 ± 1 703.7
	Cd	0.05	77.8	7	253.6	57.6	253.6 ± 57.6
泮江矿区段至下游污染段	Pb	0.05	1 622.4	12	3 182.8	958.8	3 182.8 ± 958.8
	Zn	0.05	6455.2	12	11 604.9	3 814.7	11 604.9 ± 3 184.7
	Cd	0.05	161.5	12	266.4	95.5	266.4 ± 95.5
矿区河流沉积物	Pb	0.05	1 733.8	32	2 516.8	631.0	2 516.8 ± 613.0
	Zn	0.05	5 590.4	32	9 644.7	2034.7	9 644.7 ± 2 034.7
	Cd	0.05	134.3	32	220.8	48.9	220.8 ± 48.9
对照区(泮江上游段)	Pb	0.05	572.3	5	691.4	647.6	691.4 ± 647.6
	Zn	0.05	834.8	5	1 196.8	944.7	1 196.8 ± 944.7
	Cd	0.05	2.7	5	5.9	3.1	5.9 ± 3.1

$$I_{geo} = \log_2(C_n/kB_n)$$

式中, B_n 为粘土和粉砂粒级细粒沉积物的地球化学背景值, C_n 为细粒沉积物的实测值, k 为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变动而取的系数(一般取值为 1.5)^[18]. 地累积指数一般可分为 7 个级别^[21].

从上述计算公式可看出, 地累积指数法的实质是从现在的金属含量中除去相应的天然含量或背景含量, 从而得到因人为活动所造成的金属的总富集程度. 考虑到金顶矿区重金属污染元素高含量地球化学背景, 选取金顶矿区上游沉积物元素平均值为矿区流域沉积物背景值 B_n , 即: Cd 为 5.9 mg•kg⁻¹, Pb 为 487 mg•kg⁻¹, Zn 为 1 085 mg•kg⁻¹. 同时, 因为背景值的选取中已考虑到区域地质差异可能造成的结果偏差, 所以计算过程中 k 值取 1.5. 此外, 为了分析重金属的复合污染状况, 笔者引入了综合地累积指数 I_{tot} , 并定义 I_{tot} 为一个地区所有重金属地累积指数 I_{geo} 的最大值.

地累积指数分析结果表明, 矿区水系沉积物重金属污染强度为 Cd > Zn > Pb(表 3). 南大沟和泮江矿区下游段部分沉积物达到严重污染, 地累积指数分级为 6; 北大沟大部分河段沉积物为重污染, 少数河段沉积物为偏重污染或中度污染; 在对照区河段沉积物为轻度污染或无污染. 从南大沟汇入泮江口段到下游温庄村一带沉积物中重金属污染有增强的趋势(BJSD04 沉积物样品综合累积指数为 3.1, BJSD18 沉积物样品综合累积指数迅速增至 5.7), 这可能因为该部分河段位于泮江矿区段较近(约 6~9

表 3 金顶矿区沉积物中主要污染元素的地累积指数及分级

Table 3 Classification and index of geoaccumulation of main pollution elements in sediments at Jinding mine area						
采集点	样品	I_{geo}			I_{tot}	分级
		Cd	Pb	Zn		
采区水塘	BCSD01	5.6	2.8	3.8	5.6	6
	JYSD01	3.4	-1	2.9	3.4	4
	NDF01	4.1	0.8	1.6	4.1	5
南大沟	NDSD01	4.8	0.7	2.4	4.8	5
	NDSD02	3.6	0.1	1.6	3.6	4
	NDSD03	5	1.3	2.7	5	5
	NDSD04	4.6	1	2.4	4.6	5
	NDSD06	4.8	1.9	2.5	4.8	5
	NDSD08	5.2	2.2	2.8	5.2	6
	NDSD09	5.4	3.3	3	5.4	6
	PMSD06	4.2	1.1	2.2	4.2	5
	PMSD07	4	1.5	2	4	5
北大沟	PMSD08	4.8	2.4	2.7	4.8	5
	PMSD09	4	1.5	2.1	4	5
	PMSD11	0.5	-1.5	-1.2	0.5	1
	PMSD12	4.1	1.7	2.2	4.1	5
	PMSD13	3.4	1.3	1.5	3.4	4
	PMSD14	2.9	0.4	0.6	2.9	3
	BJSD04	3.1	0.2	1	3.1	4
	BJSD05	6.1	2.8	4	6.1	6
泮江矿区段 至下游污染段	BJSD07	3.8	0.7	2	3.8	4
	BJSD08	4	1.1	2	4	5
	BJSD10	3.6	1	2	3.6	4
	BJSD12	3.4	1.4	1	3.4	4
	BJSD13	4.8	1.7	3	4.8	5
	BJSD14	4.6	2	3	4.6	5
	BJSD15	4.6	2.4	3	4.6	5
	BJSD16	5.8	2.8	4	5.8	6
	BJSD17	4.8	2.1	3	4.8	5
	BJSD18	5.7	3.1	4	5.7	6
对照区(泮江) 上游未污染段	BJSD01	-0.9	-0.7	-1	-0.7	0
	BJSD02	0.1	1	1	1	2
	BJSD03	-1.3	-2.4	-2	-1.3	0
	WK01	-0.5	-2.2	-1	-0.5	0
	WK02	-0.8	-1.9	-1	-0.7	0

km)位置,河道较为平缓,大量废弃矿渣沉积所致.

3 结论

(1)北大沟中沉积物重金属浓度低于南大沟;泚江不同河段沉积物中 Cd 等重金属含量差异较大,矿区上游泚江段沉积物中镉含量较低,泚江下游污染段沉积物中 Cd 等重金属均大幅度增加.沉积物主要污染元素中, Cd 污染系数最大(R 为 21.9 ~ 45.2), 高于 Zn(R 为 4.9 ~ 9.7)和 Pb(R 为 2.7 ~ 4.6).

(2)地累积指数法分析结果显示矿区水系沉积物污染元素按污染强度分为: $Cd > Zn > Pb$. 南大沟和泚江矿区下游段部分沉积物达到严重污染, 北大沟大部分河段沉积物为重污染, 少数河段沉积物为偏重污染或中度污染, 在对照区河段中沉积物为轻度污染或无污染. 从南大沟汇入泚江口河段到下游温庄村河段沉积物中重金属污染有增强的趋势.

参考文献:

[1] Keith L H, Telliard W A. Priority pollutants: A perspective view [J]. Environmental Science and Technology, 1979, **13** (14): 416-423.

[2] Azcue J M. Environmental impacts of mining activities: emphasis on mitigation and remedial measures[M]. New York: Springer, 1999.

[3] 廖国礼, 吴超. 矿山不同片区土壤中 Zn、Pb、Cd、Cu 和 As 的污染特征[J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 157-161.

[4] 郑娜, 王起超, 郑冬梅. 锌冶炼厂周围重金属在土壤-蔬菜系统中的迁移特征[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1349-1354.

[5] MacGregor A. Analysis of control methods: mercury and cadmium pollution[J]. Environ Health Perspect, 1975, **12**: 137-148.

[6] Ma W C, van der Voet H. A risk-assessment model for toxic exposure of small mammalian carnivores to cadmium in contaminated natural environments[J]. Science of the Total Environment, 1993, **134** (Supplement II): 1701-1714.

[7] Smolders A J, Lock R A, van der Velde G, *et al.* Effects of mining

activities on heavy metal concentrations in water, sediment, and macroinvertebrates in different reaches of the Pilcomayo River, South America[J]. Arch Environ Contam Toxicol, 2003, **44** (3): 314-323.

[8] 滕彦国, 刘家铎, 张成江. 兰坪盆地深源流体成矿的地质地球化学信息[J]. 地质找矿论丛, 2000, **15** (4): 314-319.

[9] 云南省地质矿产局第三地质大队八分队. 云南省兰坪县金顶铅锌矿详细勘探地质报告(上)[R]. 云南省地质矿产局第三地质大队, 1984. 15-48, 218-220.

[10] 薛春纪, 陈毓川, 杨建民, 等. 金顶铅锌矿床地质-地球化学[J]. 矿床地质, 2002, **21**(3): 245, 270-277.

[11] 李航, 双燕, 朱长生, 等. 金顶铅锌矿区铅锌氧化矿石中镉的风化淋滤实验[J]. 生态环境, 2007, **16**(4): 1121-1124.

[12] 李航, 肖唐付, 双燕, 等. 云南金顶超大型铅锌矿区镉的水地球化学研究[J]. 地球化学, 2007, **36**(6): 612-620.

[13] 陈明, 冯流, Yvon J. 缓变型地球化学灾害: 概念、模型及案例研究[J]. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(增刊 I): 261-266.

[14] 周令治, 邹家炎. 稀散金属近况[J]. 有色金属(冶炼部分), 1994, **12**(1): 42-46.

[15] 叶霖, 潘自平, 李朝阳, 等. 镉的地球化学研究现状及展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, **24**(4): 339-348.

[16] 乔庆霞, 黄小凤. 泚江表层底泥中重金属化学形态的研究[J]. 昆明理工大学学报: 理工版, 1999, **24**(2): 195-198.

[17] 赵明. 兰坪铅锌矿对泚江的污染及对策[J]. 大理科技, 1990, **11** (1): 46-48.

[18] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River [J]. Geojournal, 1969, **2**(3): 108-118.

[19] Chatterjee M, Silva-Filho E V, Sarkar S K, *et al.* Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance [J]. Environment International, 2007, **33**(3): 346-356.

[20] Farkas A, Erratico C, Vigano L. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po[J]. Chemosphere, 2007, **68**(4): 761-768.

[21] Müller G. Schermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seitt, 1971[J]. Umschan, 1979, **79** (3): 778-783.