

湖南三十六湾甘溪河重金属污染特征及环境风险评估

郭婧琳, 邱波, 刘耀驰*, 杨兆光* (中南大学化学化工学院环境与水资源研究中心, 湖南长沙 410083)

摘要 [目的]调查分析湖南三十六湾地区主要河流甘溪河水体及沉积物中重金属污染情况,旨在为治理矿区河流重金属污染提供依据。[方法]以湖南典型有色金属采选工业区三十六湾为研究对象,选取了甘溪河流域的8个典型断面收集水样及底泥沉积物样品,采用 ICP-OES 测定甘溪河水体及周围沉积物中重金属含量,并采用潜在生态危害指数法对重金属污染进行环境风险评估。[结果]三十六湾地区甘溪河重金属污染程度由强到弱依次为 Zn、As、Pb、Cu、Cr (Cd);底泥沉积物中重金属生态风险由强到弱依次为 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Cr;各采样点断面重金属污染程度从大到小依次为甘溪村、三合乡、杨家田、芹菜村、沙子岭、新桥头、两江口、李家坪。[结论]三十六湾甘溪河重金属污染严重,急需采取综合措施进行治理。
关键词 重金属污染;甘溪河;潜在生态危害指数法;风险评估
中图分类号 S181 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2016)10-085-04

The Heavy Metals Pollution Characteristics and Environment Risk Assessment of Ganxi River, Sanshiliuwan, Hunan Province
GUO Jing-lin, QIU Bo, LIU Yao-chi*, YANG Zhao-guang* (Center for Environment and Water Resources, School of Chemistry & Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083)
Abstract [Objective] The aim was to investigate heavy metal pollution in water and sediments of Ganxi River in Sanshiliuwan Region in Hunan Province, and provide basic reference for heavy metal pollution control in mining area river. [Method] With Sanshiliuwan in Hunan Province as research object, water and sediment samples were collected from 8 typical sections in Ganxi River basin, ICP-OES was adopted to determine heavy metal content, and potential ecological risk index method was adopted to conduct environment risk assessment. [Result] The order of heavy metal pollution degree in Ganxi River was Zn > As > Pb > Cu > Cr (= Cd); the order of heavy metal ecological risk in sediments was Cd > As > Pb > Cu > Zn > Cr; the order of heavy metal pollution degree in each sampling site section was Ganxi Village > Sange Township > Yangjiantian > Qinjia Village > Shaziling > Xinqiaotou > Liangjiakou > Lijiaping. [Conclusion] Heavy metal pollution in Ganxi River in Sanshiliuwan is serious, comprehensive countermeasures should be adopted.
Key words Heavy metals pollution; Ganxi River; Potential ecological risk index; Risk assessment

近年来,有色金属采选工业的发展为我国国民经济做出了巨大贡献。同时,大量技术起点低、设备落后的小型采选企业的发展对有色金属采选区的环境造成了极大影响,其中重金属污染对环境及人体健康的危害最为深远^[1-4]。

湖南素有“有色金属王国”之称,采选矿及冶炼带来的环境污染特别是湘江流域重金属污染问题不容忽视,因此重金属污染与防治刻不容缓^[5-7]。目前,关于湘江流域重金属污染的研究较多^[8-10],大部分集中在长株潭区域,对湘江源头的重金属污染鲜见报道。甘溪河是湘江水系源头之一,位于郴州三十六湾地区。三十六湾是湖南有色金属企业最密集、秩序最混乱、污染最严重、治理难度最大的“重灾区”。目前,甘溪河流域堆积了上百万吨的尾矿尾砂,选矿废水直排入河水,导致河道堵塞,流域内重金属污染严重,对当地及下游区域带来了极大的污染风险^[11-12]。笔者通过收集和分析甘溪河各断面水体及沉积物中重金属含量,进行了环境风险评估,以期为了了解和掌握甘溪河污染状况及防控重金属污染提供科学依据与参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集 采样点分布于甘溪河上游沙子岭至下游新桥头,全长约 30 km,共设置 8 个断面,并对采样点进行标记,分别为沙子岭(S1)、甘溪村(S2)、三合乡(S3)、李家坪(S4)、芹菜村(S5)、两江口(S6)、杨家田(S7)及新桥头(S8),同时

收集测定了两江口附近另一支流水样,标记为 S9。采样点位置均通过便携式 GPS 导航仪记录(图 1)。加 HNO₃ 将水样酸化至 pH 小于 2,保存于聚乙烯塑料瓶中,于 4 ℃ 保存,存放时间不超过 7 d。对于每个断面底泥沉积物的采集量需大于 500 g,存放于密封袋中。

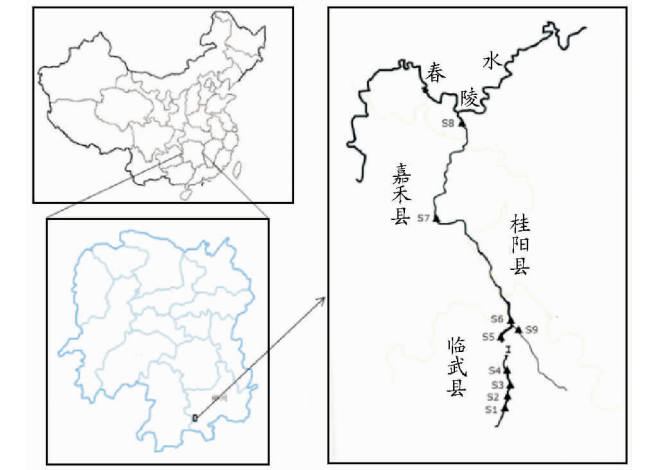


图 1 采样点位置

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 样品分析及测定 样品的分析测定参照以下标准: USEPA-Method 3005a“Acid Digestion of Waters for Total Recoverable or Dissolved Metals for Analysis by FLAA or ICP Spectroscopy”、中国环境保护标准征求意见稿“水质金属总量消解方法硝酸消解”(中国环境保护标准征求意见稿)。采用浓 HNO₃-HCl 酸化消解处理水样,通过电感耦合等离子体发射光谱仪 ICP-OES(Perkin-Optima 8000, USA)对 Pb、Zn、Cu、As、

基金项目 环保公益性行业科研专项(201309052)。
作者简介 郭婧琳(1991-),女,湖南益阳人,硕士研究生,研究方向:环境与水资源评价。*共同通讯作者:刘耀驰,副教授,博士,硕士生导师,从事环境与水资源研究;杨兆光,教授,博士,博士生导师,从事环境与水资源研究。
收稿日期 2016-02-25

Cd、Cr 进行测定。

底泥沉积物重金属的测定:样品于自然条件下风干,通过四分法缩分抽样,再经玛瑙研钵研磨处理,样品过 100 目筛,采用浓 HNO₃ - H₂O₂ 消解法处理,通过 ICP-OES 对 Pb、Zn、Cu、As、Cd、Cr 进行测定。

1.3 环境风险评估 底泥沉积物是水环境中重金属的贮藏库,底泥中重金属浓度可反映水体污染程度,因此常被用作判别水环境质量的重要参考指标^[8,13]。国内外用于沉积物重金属环境风险评估的方法主要有潜在生态危害指数法^[14]、地累积指数法^[15]、回归过量分析法^[16]、沉积物富集系数法^[17]和沉积物质量基准法^[18]等。

潜在生态危害指数(Potential Ecological Risk Index)法^[14]由 Hakanson 提出,该法综合考虑沉积物中重金属浓度、种类、毒性水平影响,能反映多种重金属污染综合影响,定量计算潜在生态风险程度^[11]。甘溪河属于多种重金属复合污染,故选择潜在生态危害指数法评价甘溪河沉积物中重金属污染现状。

$$E_r^i = T_r \times C_f^i$$

(1)

$$RI = \sum E_r^i = \sum (T_r \times C_f^i) = \sum [(T_r \times C_s^i) / C_n^i]$$

(2)

式中,*i* 为重金属;*E_rⁱ* 为生态风险系数(*RI* 为沉积物中多种重金属潜在生态风险系数;*T_rⁱ* 为重金属 *i* 毒性响应系数(参考文献[14]和[19]设定 6 种重金属毒性响应系数从小到大依次为 Zn(1)、Cr(2)、Cu(5)、Pb(5)、As(10)、Cd(30);*C_sⁱ* 为表层沉积物的实测值,mg/kg;*C_nⁱ* 为重金属 *i* 的参比值,mg/kg。采用全球工业化前沉积物中重金属最高背景值可更大程度反映潜在危害程度,且目前没有湖南郴州三十六湾地区沉积物重金属的最高背景值,因此采用全球工业化前沉积物中重金属最高背景值^[14-19],即 Pb 70.000 mg/kg, Zn 175.000

mg/kg, As 15.000 mg/kg, Cu 50.000 mg/kg, Cd 1.000 mg/kg, Cr 90.000 mg/kg。*E_rⁱ* 和 *RI* 对应重金属污染的生态风险等级见表 1。

表 1 *E_rⁱ* 和 *RI* 对应的潜在生态风险程度

Table 1 Potential ecological risk degree corresponding to <i>E_rⁱ</i> , <i>RI</i>		
潜在生态风险程度 Potential ecological risk degree	<i>RI</i>	<i>E_rⁱ</i>
轻度 Light	<i>RI</i> < 150	<i>E_rⁱ</i> < 40
中度 Moderate	150 ≤ <i>RI</i> < 300	40 ≤ <i>E_rⁱ</i> ≤ 80
中强度 Moderate intensity	300 ≤ <i>RI</i> < 600	80 ≤ <i>E_rⁱ</i> ≤ 160
强度 Intensity	<i>RI</i> > 600	160 ≤ <i>E_rⁱ</i> ≤ 320
极强度 Extreme intensity		<i>E_rⁱ</i> ≥ 320

2 结果与分析

2.1 水体中重金属分布特征 由表 2 可知,各采样点重金属 Pb、Zn、Cu、As 的浓度分别为 0.007 ~ 0.129、0.096 ~ 7.608、0.025 ~ 0.045、0.005 ~ 0.622 mg/kg。其中,Pb、Zn、As 变化范围大,Cu 的含量相对稳定。甘溪河水体中重金属含量与地表水环境质量标准(GB 3838—2002)比较,Zn 在 4 个断面超出国家地表水 V 类标准,其中沙子岭超标 3.5 倍,Pb 在 3 个断面超出国家地表水 V 类标准。甘溪河水体中各种重金属的污染程度由强至弱依次为 Zn、As、Pb、Cu、Cr(Cd),水体中 Pb、Zn、As 污染突出。三十六湾地区主要以铅锌矿采选为主,由于选矿废水未经合适处理,导致水体中 Pb、Zn 严重超标。从地域分布来看,从甘溪河上游到下游,污染物分布差异较大,且无明显规律。甘溪河源头沙子岭和甘溪村的水质远超 V 类水标准,属于劣 V 类;三河乡与李家乡水质为 V 类水;到中游芹菜村与两江口电站水质明显好转,有 II 和 III 类水标准;下游水质又逐渐转恶,均为 IV 和 V 类水(表 3)。

表 2 甘溪河各采样点水体中重金属含量分布

Table 2 Contents of heavy metals in water samples of Ganxi River and compared with surface water environment quality standard mg/kg							
采样点 Sampling site	Pb	Zn	As	Cu	Cd	Cr	TN
沙子岭(S1) Shaziling	0.129	7.608	0.088	0.045	ND	ND	7.983
甘溪村(S2) Ganxi Village	0.065	2.816	0.622	0.034	ND	ND	3.612
三合乡(S3) Sanhe Village	0.021	2.404	0.388	0.027	ND	ND	2.914
李家坪(S4) Lijiaping	0.018	3.167	0.451	0.026	ND	ND	3.740
芹菜村(S5) Qincai Village	0.005	0.246	0.020	0.025	ND	ND	0.348
两江口(S6) Liangjiangkou	0.028	1.800	0.202	0.031	ND	ND	2.134
杨家田(S7) Qiaojiatian	0.068	0.470	0.180	0.033	ND	0.017	0.826
新桥头(S8) Xinqiaotou	0.038	0.373	0.094	0.025	ND	ND	0.585
两江口支流(S9) Liangjiangkou tributary	0.007	0.096	0.005	0.033	ND	ND	0.196

注:ND 表示“未检出”,TN 表示“重金属总量”。

Note:ND stands for not detected, TN stands for total amount of heavy metals.

表 3 地表水环境质量标准

Table 3 Surface water environment quality standard mg/kg							
级别 Level	Pb	Zn	As	Cu	Cd	Cr	TN
I	0.01	0.050	0.050	0.010	0.001	0.010	
II	0.01	1.000	0.050	1.000	0.005	0.010	
III	0.05	1.000	0.050	1.000	0.005	0.050	
IV	0.05	2.000	0.100	1.000	0.005	0.050	
V	0.10	2.000	0.100	1.000	0.010	0.100	
AVG	0.05	2.360	0.260	0.030	ND	0.020	2.770

注:ND 表示“未检出”,TN 表示“重金属总量”,AVG 表示平均含量。

Note:ND stands for not detected, TN stands for total amount of heavy metals; AVG stands for average content.

2.2 底泥沉积物中重金属分布特征 从图 2 可以看出,Pb、Zn、As、Cu、Cd、Cr 的浓度分布范围分别为 707.70~1 825.00、1 728.00~4 341.00、2 660.00~7 933.00、123.60~363.10、10.63~30.79、45.93~155.07 mg/kg。对照土壤环境质量标准(GB 15618—1995),甘溪河各断面底泥沉积物重金属含量均远远超出 III 级标准,重金属污染极为严重。Pb、Zn、As、Cu、Cd、Cr 在甘溪村断面含量达最大值,各重金属平均含量由大到小依次为 As、Zn、Pb、Cu、Cr、Cd;各断面重金属总含量由大到小依次为 S2、S3、S7、S5、S1、S8、S6、S4。

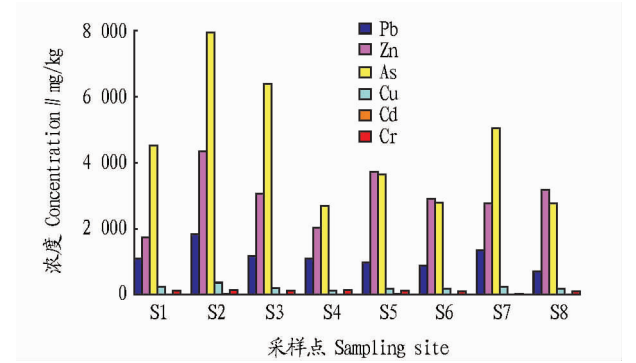


图 2 甘溪河不同采样点表层沉积物中重金属质量分数比较
Fig.2 Comparison of heavy metals concentrations in surface sediments of different sampling sites

2.3 重金属环境风险评价 由表 4 可知,甘溪河 8 个采样点的 RI 值为 5 648.31~12 803.74,平均值为 8 584.63,均远远超过 600.00,这表明研究区重金属生态风险总体极强,各采样点的 RI 值从大到小依次为 S2、S3、S8、S5、S6、S7、S1、S5,最大值出现在采样点甘溪村(S2);而 Cd、As 的 E_i^p 在各采样点均远远超过 320.00,达极强生态风险,Pb 的 E_i^p 为 119.14~307.24,潜在生态风险程度为中强度和强度,Cu 在甘溪村(S2)、沙子岭(S1)为中度,其他采样点为轻度,Zn 在甘溪村(S₂)为中度,在其余采样点均为轻度,Cr 在各采样点为轻度。甘溪河水域表层沉积物生态风险从大到小依次为 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Cr,Cd 和 As 的生态风险贡献率之和大于 95.000%,这表明 Cd 和 As 是甘溪河表层沉积物中重金属的主要风险污染物。

3 结论

- (1) 三十六湾地区甘溪河流域水体中重金属污染严重,与地表水环境质量标准比较,上游、中游为劣 V 及 V 类水标准,下游为 IV 类水标准,水体中污染最为严重的是 Zn、Pb、As,Cu 含量空间差异小,达 II 类水标准。
- (2) 郴州三十六湾甘溪河表层沉积物中 Cd、As 具有极强生态风险,Pb 具有强生态风险,Cu、Zn、Cr 具有轻度生态风险,不同重金属污染物生态风险从大到小依次为 Cd、As、Pb、Cu、Zn、Cr,其中 Cd、As 的影响占主导地位;不同采样点沉积

表 4 甘溪河各断面底泥沉积物重金属潜在生态风险评价结果
Table 4 The evaluation results of potential ecological risk of heavy metals in sediments from Ganxi River

采样点 Sampling site	E_i^p						RI
	Pb	Zn	As	Cu	Cd	Cr	
沙子岭(S1)Shaziling	183.87	18.21	2 871.34	41.23	2 529.76	3.91	5 648.31
甘溪村(S2)Ganxi Village	307.24	45.74	5 052.87	66.52	7 330.95	0.44	12 803.74
三合乡(S3)Sanhe Township	196.81	32.12	4 066.24	37.87	5 497.62	3.83	9 834.41
李家坪(S4)Lijiaping	185.86	21.37	1 694.27	22.64	3 130.95	4.24	5 059.33
芹菜村(S5)Qincai Village	166.82	39.09	2 321.02	35.02	6 483.33	4.17	9 049.43
两江口(S6)Liangjiangkou	147.71	30.61	1 778.34	33.31	6 778.57	3.59	8 772.13
杨家田(S7)Yangjiantian	225.42	29.09	3 213.38	43.02	4 907.14	1.34	8 419.38
新桥头(S8)Xinqiaotou	119.14	33.58	1 771.97	33.59	7 128.57	3.42	9 090.28
平均 Mean	191.61	31.23	2 846.18	39.13	5 473.36	3.12	8 584.63
k_i /%	2.230	0.364	33.150	0.460	63.760	0.036	
潜在生态风险程度 Potential ecological risk degree	强	轻	极强	轻	极强	轻	

物重金属生态风险从大到小为甘溪村、三合乡、新桥头(芹菜村)、两江口、杨家田、沙子岭、李家坪,各采样点 RI 值均远远超过 600.00,研究区域总体生态风险极强,因此区域内的重金属污染及治理应引起高度重视。

(3) 受三十六湾地区长期采选矿的影响,甘溪河重金属污染非常严重,对甘溪河的污染治理应给予高度重视,首先从源头排放加以控制,提高产业技术与清洁生产水平,同时加强实时监测,采取综合手段有效治理。

参考文献

[1] SUN Y,ZHOU Q,XIE X,et al. Spatial, sources and risk assessment of heavy metal contamination of urban soils in typical regions of Shenyang, China[J]. Journal of hazardous materials,2010,174(1):455-462.
[2] KHAN S,CAO Q,ZHENG Y M,et al. Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China [J]. Environmental pollution,2008,152(3):686-692.
[3] HU Y,CHENG H. Application of stochastic models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a

large-scale region[J]. Environmental science & technology,2013,47(8):3752-3760.
[4] ZHAO H,XIA B,FAN C,et al. Human health risk from soil heavy metal contamination under different land uses near Dabaoshan Mine, Southern China[J]. Science of the total environment,2012,417:45-54.
[5] 刘春早,黄益宗,雷鸣,等. 湘江流域土壤重金属污染及其生态环境风险评价[J]. 环境科学,2012,33(1):260-265.
[6] 刘耀驰,高栗,李志光,等. 湘江重金属污染现状、污染原因分析与对策探讨[J]. 环境保护科学,2010,36(4):26-29.
[7] 雷鸣,秦普丰,铁柏清. 湖南湘江流域重金属污染的现状与分析[J]. 农业环境与发展,2010(2):62-65.
[8] 朱余银,戴塔根,吴玺虹. 湘江长株潭段底泥重金属污染现状评价[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(9):3710-3717.
[9] 张光贵,谢意南,莫永涛. 洞庭湖典型水域表层沉积物中重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价[J]. 环境科学研究,2015(10):1545-1552.
[10] 秦延文,韩超南,张雷,等. 湘江衡阳段重金属在水体、悬浮颗粒物及表层沉积物中的分布特征研究[J]. 环境科学学报,2012,32(11):2836-2844.
[11] 韦振丽,吴湘滨,刘悟辉,等. 三十六湾矿区的水环境问题研究[J]. 湖南有色金属,2008,24(1):53-57.
[12] 蒋杰. 甘溪河没有了眼泪:湖南省郴州市临武县打非工作依然形势严

峻[J]. 湖南安全与防灾, 2008(8):55.

- [13] YI Y, YANG Z, ZHANG S. Ecological risk assessment of heavy metals in sediment and human health risk assessment of heavy metals in fishes in the middle and lower reaches of the Yangtze River basin[J]. Environmental pollution, 2011, 159(10):2575-2585.
- [14] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8):975-1001.
- [15] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of Rhine River[J]. Geography journal, 1969, 2(3):108-118.
- [16] HILTON J. A mathematical model for analysis of sediment coke data; Im-

plications for enrichment factor calculations and trace-metal transport mechanisms[J]. Chemical geology, 1985, 48:281-291.

- [17] BAPTISTA NETO J A, SMITH B J, MCALLISTER J J. Heavy metal concentrations in surface sediments in a nearshore environment, Jurujuba Sound, Southeast Brazil[J]. Environmental pollution, 2000, 109(1):1-9.
- [18] GUERRA-GARCÍA J M, GARCÍA-GÓMEZ J C. Assessing pollution levels in sediments of a harbour with two opposing entrances. Environmental implications[J]. Journal of environmental management, 2005, 77(1):1-11.
- [19] 徐争启, 倪师军, 唐先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2):112-115.

(上接第 65 页)

140.0~215.0 m 段: 绢云母化、硅化、钠黝帘石化、黄铜矿化石英二长斑岩^[8]。该段岩石新鲜, 较破碎, 节理发育, 线率 10~50 条/m, 坑道普遍滴水, 岩石淋失作用较强, 引起放射性 γ 辐射强度降低, 平均为 47.24 $\mu\text{R}/\text{h}$, 较 0~20.0 m 段高出近 1 倍。

215.0~335.0 m 段: 为绢云母化、钾化、黑云母化、硅化、

黄铜矿化石英二长斑岩, 岩石新鲜, 完整、坚硬。 γ 辐射强度平均高达 60.36 $\mu\text{R}/\text{h}$, 为坑道内各类岩石之最。

335.0~397.8 m 段: 为强硅化、黄铜矿化石英闪长玢岩及钾化、黄铜矿化石英二长斑岩^[9]。放射性 γ 辐射强度平均为 58.86 $\mu\text{R}/\text{h}$ 。

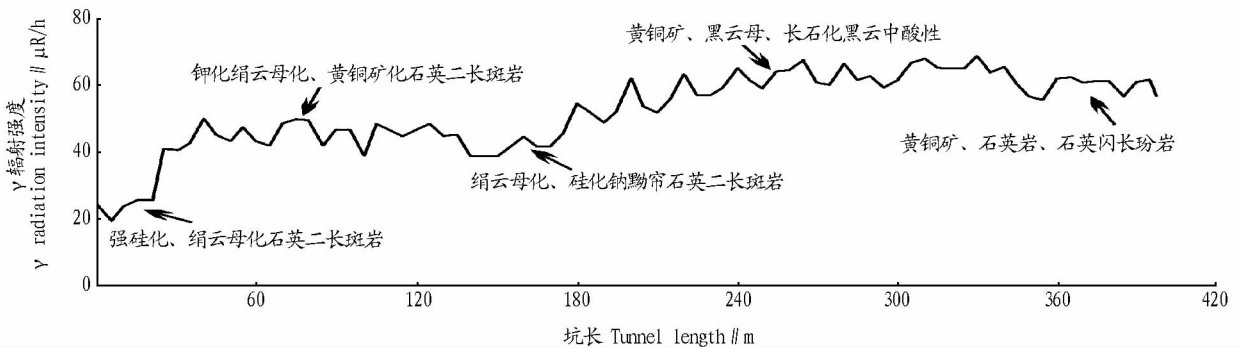


图3 矿区 YD1 坑道 γ 辐射曲线

Fig.3 γ radiation curve of mine YD1 tunnel

综上所述, 坑道内斑岩型铜矿石因含矿岩石不同, 其放射性 γ 辐射性强度亦不同, 同一种岩石因钾化强烈程度不同导致 γ 辐射强度存在差异。坑道放射性 γ 辐射测量地质效果较好, 测量质量可靠, 坑道内未发现超过国家限制剂量的 γ 辐射异常段。按 1974 年卫生部颁发的“放射性防护规定”不需做特殊防护。

2.3.2 矿石有毒有害元素。 矿区中有毒有害元素砷 (As) 含量小于 0.100%, 小于国家限量标准值 (<0.300%); 元素锌 (Zn) 含量为 0.047%, 小于国家限量标准值 (<6.000%); 氧化镁 (MgO) 含量为 2.600%, 小于国家限量标准值 (<5.000%); 元素硫 (S) 含量为 0.950%。这些组分在矿山开采过程对环境有一定影响。

3 结论

(1) 矿区岩性单一, 岩石硬度以坚硬为主; 采用岩体质量系数法和岩体质量指标法, 对硐室围岩稳定性进行评价, 结果可信度较高, 可作为矿山开采设计依据; 采用比拟法对露天采矿坑边坡稳定性进行评价, 当坡长为 570.0 m, 坡度 $\alpha = 33^\circ$, 斜坡表层第四系松散堆积物组成的边坡可维持稳定。采用岩体力学极限平衡法分析可知, 露天边坡的坡角不能和

岩体结构面倾角相差太大, 在侵入岩体中, 推荐开挖边坡角 $\leq 45^\circ$ 。

(2) 矿区附近无污染, 地下 (表) 水水质较好, 矿石中 As 含量 < 0.100%, Zn 为 0.047%, MgO 为 2.600%, S 为 0.950%; 无大型不良地质现象, 有小型崩塌存在, 无放射性危害; 矿区地质环境质量中等。

参考文献

- [1] 苏昌学, 李石磊, 燕永锋, 等. 普朗铜矿的找矿标志与成矿规律探讨[J]. 安徽地质, 2007, 17(4):252-256.
- [2] 郭鹏志, 樊秉鸿, 肖成东, 等. 河北省滦水县安妥岭钼矿含矿岩体与成矿的关系[J]. 地质调查与研究, 2012, 35(3):167-175.
- [3] 郑雷. 基于岩石质量指标的新岩体分类方法研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2009.
- [4] 黄艳丽, 翟忠标. 香格里拉 X 铜矿区成矿规律与深部找矿[J]. 现代矿业, 2012(9):54-56.
- [5] 周龙义. 关于露天矿边坡稳定性计算的研究[J]. 露天采矿技术, 2011(6):49-51.
- [6] 张廷斌. 斑岩铜矿遥感蚀变信息重现性与优选研究: 以西藏自治区典型斑岩铜矿为例[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [7] 牛会良. 内蒙古克什克腾旗黄岗山锡多金属矿床地质特征[D]. 石家庄: 石家庄经济学院, 2013.
- [8] 曾普胜, 莫宣学, 喻学惠, 等. 滇西北中甸斑岩及斑岩铜矿[J]. 矿床地质, 2003, 22(4):393-400.
- [9] 杨帆, 邹国富, 吴静, 等. 中甸春都铜矿区岩体成岩时代及地质意义[J]. 大地构造与成矿学, 2011, 35(2):307-314.