

青藏高原典型金属矿山河流重金属污染对比

刘瑞平^{1,2,3,4}, 徐友宁^{1,2,3,4}, 张江华^{1,2,3,4}, 陈华清^{1,2,3,4}, 何 芳^{1,2,3,4}, 乔 冈^{1,2,3,4},
柯海玲^{1,2,3,4}, 史宇飞^{1,2,3,4}

LIU Ruiping^{1,2,3,4}, XU Youning^{1,2,3,4}, ZHANG Jianghua^{1,2,3,4}, CHEN Huaqing^{1,2,3,4}, HE Fang^{1,2,3,4},
QIAO Gang^{1,2,3,4}, KE Hailing^{1,2,3,4}, SHI Yufei^{1,2,3,4}

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;
2. 自然资源部矿山地质环境陕西潼关野外科学观测基地, 陕西 潼关 714300;
3. 中国地质调查局干旱半干旱区地下水与生态重点实验室, 陕西 西安 710054;
4. 自然资源部黄土地质灾害重点实验室, 陕西 西安 710054

1. Xi'an Center of Geological Survey, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
2. Shaanxi Tongguan Field Scientific Surveys Base of Mine Geological Environment, MNR, Tongguan 714300, Shaanxi, China;
3. Key Laboratory for Groundwater and Ecology in Arid and Semi-arid Area, CGS, Xi'an 710054, Shaanxi, China;
4. Key Laboratory for Geo-hazards in Loess Area, MNR, Xi'an 710054, Shaanxi, China

摘要:为研究青藏高原金属矿山勘探、开采、闭坑阶段不同开发阶段河流重金属污染的严重程度,通过野外调查,室内测试分析,对比 5 个金属矿山河流重金属元素含量、污染指数沿程变化,得出以下结果:①勘探阶段和闭坑后河流水质污染较小,开采阶段矿业活动对河水水质污染较大。②As、Pb、Cd、Cu 和 Zn 五种元素是金属矿山的特征污染物。开采矿区中德尔尼铜矿区、下柳沟铅锌矿、甲玛矿区河流均有重金属元素污染,微碱性环境中德尔尼铜矿区,主要污染物为 As, 单项污染指数为 0~10.6;下柳沟铅锌矿 Pb、Cd、Cu 和 Zn 元素单项污染指数分别为 0.2~2.1、0~55、0.4~24、0.3~1550;偏酸性环境中甲玛矿区的特征污染物主要为 Cu、Cd。其中 Cu、Cd 单项污染指数为 0~4174、0~4;勘探矿区大场金矿、闭坑矿区罗布莎铬铁矿区河流未出现污染元素。③青藏高原 5 处典型的高海拔山地矿山河流由于稀释作用重金属流经 2km 后达到安全水平,研究结果可为青藏高原矿山开采中河流环境保护提供参考依据。

关键词:青藏高原;金属矿山;河流;重金属污染

中图分类号:P641;X141 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2018)12-2154-15

Liu R P, Xu Y N, Zhang J H, Chen H Q, He F, Qiao G, Ke H L, Shi Y F. A comparative study of the content of heavy metals in typical metallic mine rivers of the Tibetan Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12):2154-2168

Abstract: In order to study the severity of heavy metal pollution in the exploration, exploitation and closure of metal mines in the Tibetan Plateau, the authors made a comparative study of the heavy metal content and pollution index variation along the rivers in five metal mines. The results show that the water quality of the river is relatively insignificantly affected during the exploration stage and the closure of the pit, whereas the mining activities cause more pollution to the river water quality. (2)As, Pb, Cd, Cu and Zn are the characteristic pollutants of metal mines. Rivers in Deerni copper mine, Xialiugou lead-zinc mine and Jiamia mine show heavy metals pollution; in the slightly alkaline environment of Deerni copper mining area, the main pollutant is As, with single pollution index be-

收稿日期:2018-01-10;**修订日期:**2018-06-20

资助项目:中国地质调查局项目《青海矿业开发地质环境效应调查》(编号:1212011220224)、《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号:DD20160336)及自然资源部行业科研专项《矿集区地球化学环境累积效应及预警研究》(编号:20111020)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目《金矿区水气界面发生交换作用下的河流汞迁移转化规律研究》(编号:2015JM4129)和中央高校科研业务费基础研究计划项目(开放基金)《金矿区不同转化类型潜流带中挥发性 Hg 的运移关键参数测定与影响因素研究》(编号:310829161128)

作者简介:刘瑞平(1979-),女,硕士,高级工程师,从事矿山环境研究。E-mail: lrp1331@163.com

ing 0~10.6; the single pollution indexes of Pb, Cd, Cu and Zn elements of Xialiugou lead and zinc deposit are 0.2~2.1, 0~55, 0.4~24, and 0.3~1550 respectively. The characteristic pollutants of the Jiama mining area in an acidic environment are Cu and Cd. The single pollution indexes of Cu and Cd are 0~4174 and 0~4 respectively. There is no pollution element in the river of Rolosa chromium iron ore mining area. (3)The heavy metals of five typical high altitude mountain mine rivers in the Tibetan Plateau reach the safety level after the rivers flow a distance of 2km. The results obtained by the authors provide a reference basis for water environmental protection.

Key words: Tibetan Plateau; metal mines; river; heavy metal pollution

金属矿业开发引起地表水体重金属污染风险^[1~6],进入河水的重金属与有机聚合物或粘土矿物发生反应,形成络合物或螯合物,最终沉淀并积聚在沉积物中^[7]。水中的重金属元素更容易在进入食物链的动物体内传播和积累^[8~9]。总体而言,河流重金属元素主要分布在水、沉积物、悬浮物介质中,不断迁移和传输。它们经历了一系列的物理、化学和生物转化,给生物种群带来了风险。

青藏高原作为中国的“水塔”,且地处高寒高海拔生态脆弱区,又为中国的矿产战略储备基地,矿产资源开采不可避免地导致青藏高原河流重金属污染^[10~14],河流上游一旦污染,将对下游村民、牲畜等的安全饮水及各种农作物和经济作物的正常生长产生一定影响,然而针对青藏高原矿产资源开发引发的河流重金属污染鲜有报道^[15~16],本文对比研究 5 个金属矿山河流重金属含量、污染程度沿程变化情况,探讨金属矿山勘探、开采、闭坑阶段不同开发阶段的河流污染严重程度和纳污能力,

为青藏高原矿山开采中地质环境保护提供可参考依据。

1 研究区背景概况

青藏高原近年来发现大量的金属矿床,本文选取上述 5 处典型的高海拔山地矿山(表 1;图 1),土质为高寒草甸土,均在三江源和祁连山自然保护区内。2013 年、2014 年采集 5 个矿区样品 66 组。其中德尔尼河、大场河、下柳沟河、色布浦沟和玛吉沟河水样分别为 9、10、4、9 和 4 组;为研究其矿业活动、背景值、pH 等要素的影响,本次采集德尔尼铜矿、大场金矿、下柳沟铅锌矿、甲玛铜矿区和罗布莎铬铁矿矿石土壤样 4 组、6 组、3 组、5 组和 2 组;采集矿石、围岩、底泥等样品 4 组,分别是大场金矿矿石样 1 组,德尔尼铜矿矿石样 1 组、围岩样 1 组、底泥样 1 组;甲玛铜矿区和罗布莎铬铁矿矿区泉水样分别为 1 组和 2 组;下柳沟铅锌矿和德尔尼铜矿分别采集废水样 1 组和 2 组。各矿区采样位置详见图 2—图 6。

表 1 五个金属矿山环境地质背景概况

Table 1 The environmental geological background of five metal mines

矿山名称	描 述
青海大武镇 德尔尼铜矿	矿区地处高山峡谷地貌,2004 年建矿,目前为露天开采,矿权面积 10.2882km ² 。德尔尼河从境内流过。德尔尼河属常年流水,平均流量 0.81~1.26m ³ /s,水力坡度 0.13,水质较好,矿化度为 0.1~0.4g/L,用于矿区生产和生活用水 ^①
青海大 场金矿	青海省曲麻莱县麻多乡北部的青海大场金矿 20 世纪七八十年代的过采,2003 年以来,这个矿区勘探区内已经探明的金矿储量达 120t ^② 。大场金矿矿区目前共有 10 个探矿权,本次研究重点对大场河源头的青海省曲麻莱县大场金矿普查区开展了研究,矿权面积 62.56km ² 。矿区属高寒干燥地区,年降雨量 300~400mm,每年 6~9 月是主要的降雨季节,占全年降雨量的 70%~80%。地貌类型属青南河源丘状山原盆地,河谷平坦、开阔,地势北西高南东低。矿区位于黄河源头约古宗列曲北岸大场河的中、上游地段,区内海拔 4300~4650m。砂金矿即产于河谷及河漫滩中,以冲洪积砂矿为主,冲积古河道砂矿及冰碛砂矿次之 ^[17] 。大场河属常年流水,平均流量 1.89m ³ /s ^[18] ,水力坡度 0.01,水质较好
下柳沟 铅锌矿	位于西梁山-杂大坂多金属成矿带,北祁连走廊南山南坡,开采时间 10a 以上,前两年停采,目前刚开始重新开采,重新探矿 2~3 年。矿权更替频繁。地表水流量较小,主要来源为矿坑渗水及降雨。水质物理性状较好,清澈,未见浮游生物
西藏甲 玛铜矿	西藏甲玛铜多金属矿为世界级超大型矿床 ^[19] 。位于拉萨市墨竹工卡县扎西岗乡斯布村普朗沟泽日山,1995 年开始露井开采 ^[20] ,至 2006 年共有 10 个开采平洞,阶段高 12~40m,分别位于 4605~4780m,4780m 以上为露天开采。矿权面积 2.24km ² 。色不浦沟平均流量 2.01m ³ /s,水力坡度 0.0085
西藏罗布 莎铬铁矿	中国唯一大型铬矿,位于山南地区曲松县罗布莎镇境内,距山南地区所在地泽当约 85km,地处高寒山区,海拔标高 4000~4500m,北临雅鲁藏布江,海拔标高 3500m,该矿山从 1987 年已设计开采,属于露天与井下结合,目前露天开采停止,主要为井下开采,矿权面积约 90km ² 。玛吉沟平均流量 0.29m ³ /s,水力坡度 0.049

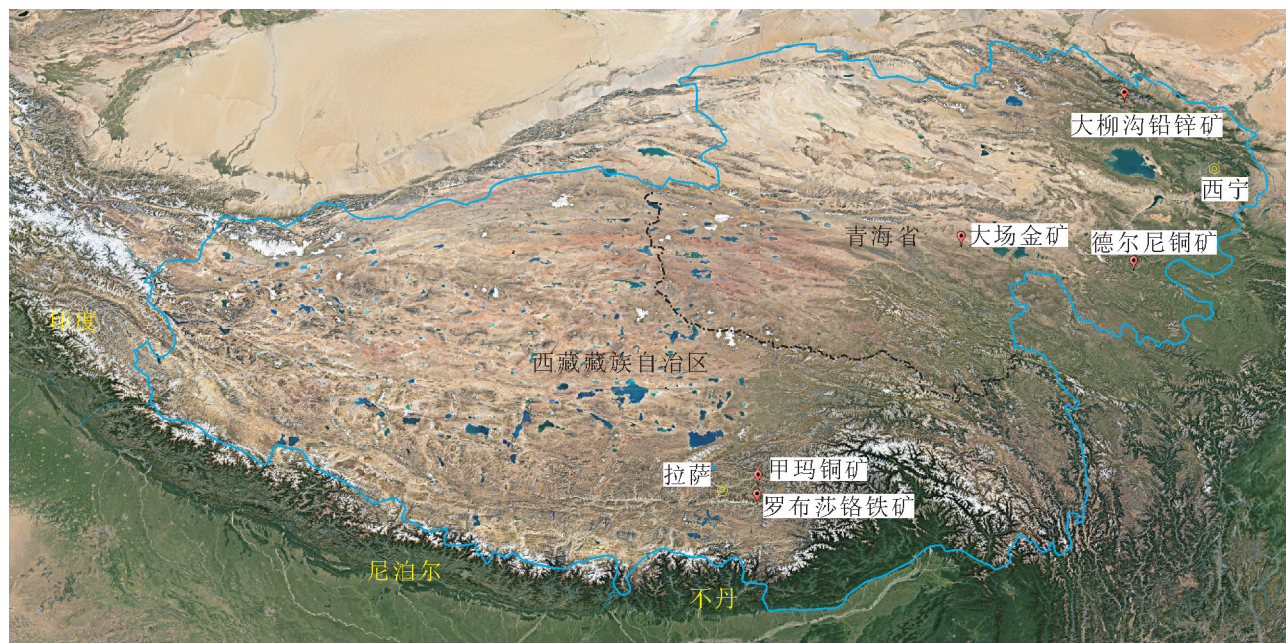


图1 青藏高原典型矿区分布

Fig. 1 The distribution of typical mining areas in the Tibetan Plateau

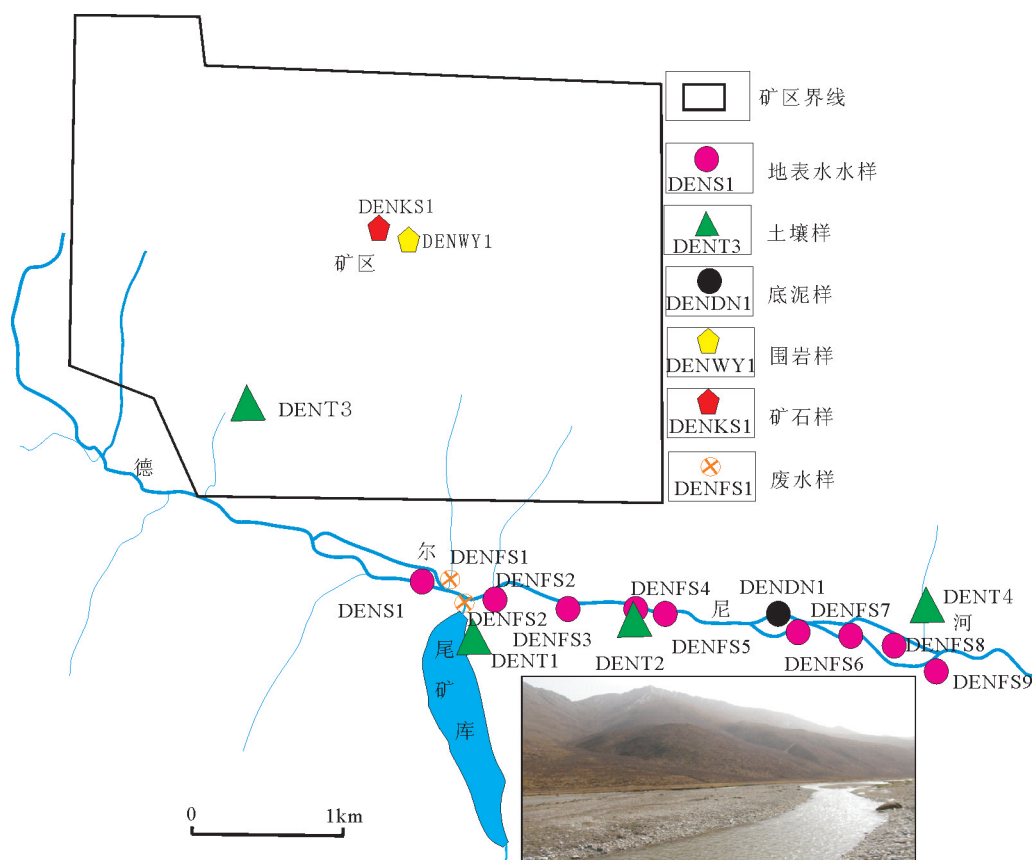


图2 德尔尼铜矿区河流样品分布

Fig. 2 The distribution of river samples in Deerni copper mining area

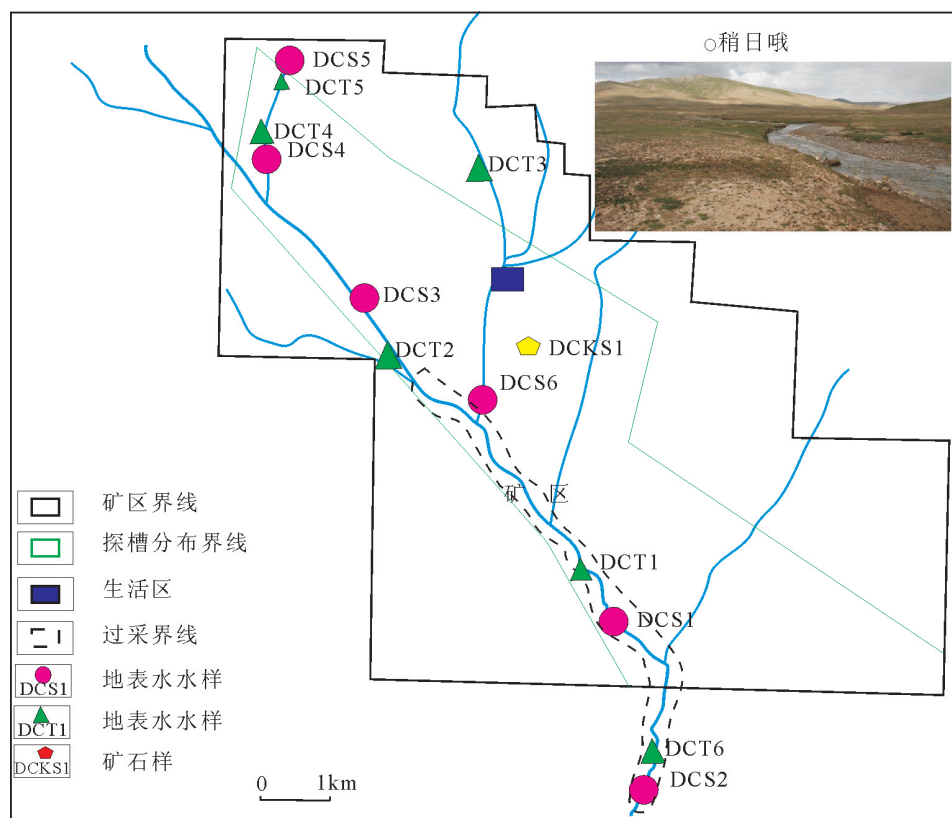


图 3 大场金矿区河流样品分布

Fig. 3 The distribution of river samples in Dachang gold mining area

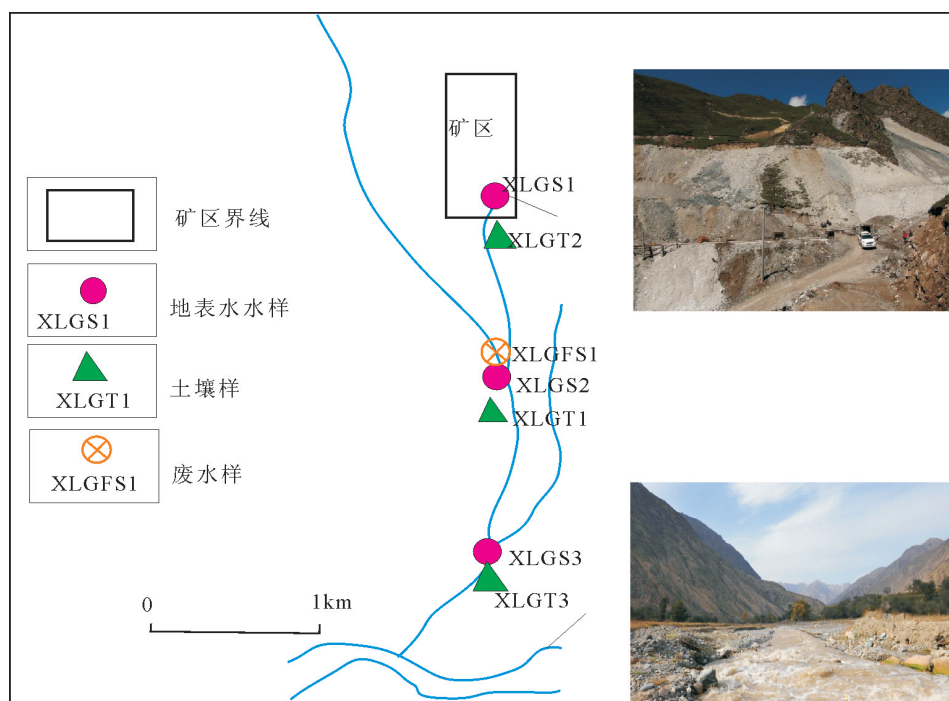


图 4 下柳沟铅锌矿区样品分布

Fig. 4 The distribution of river samples in Xialiugou lead-zinc mining area

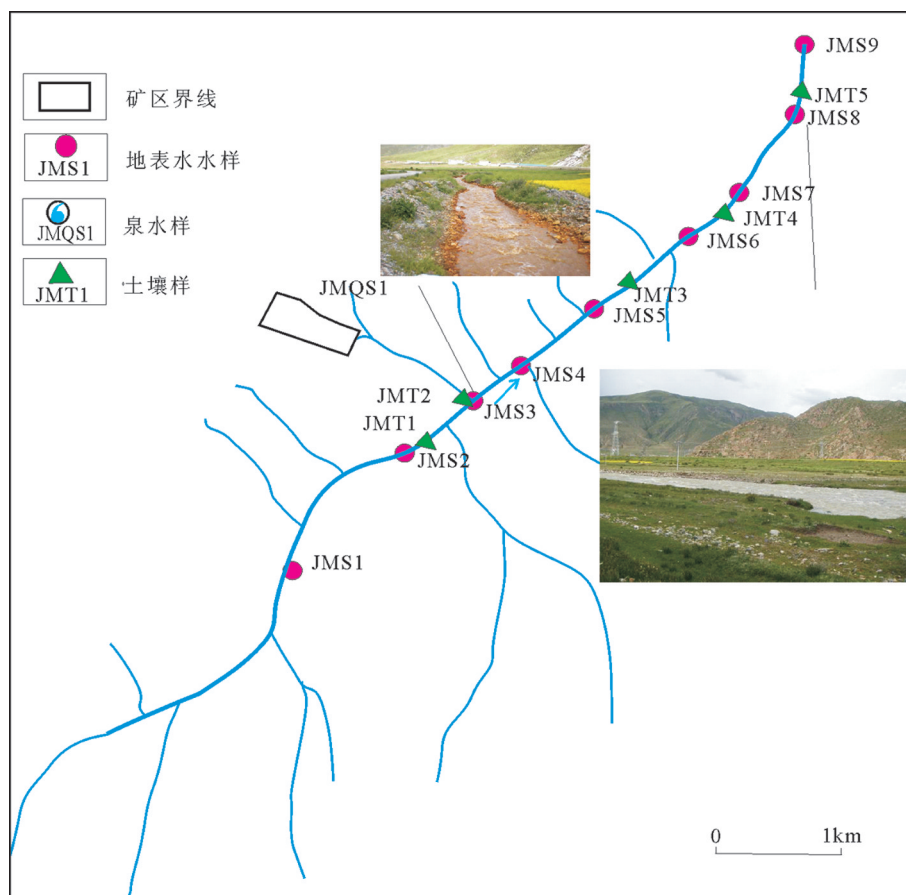


图5 甲玛铜矿区河流样品分布

Fig. 5 The distribution of river samples in Jiama copper mining area

2 评价方法

2.1 样品采集与分析

为研究不同金属矿山开发阶段矿业活动对周边地表水物理化学性质的影响,对有代表性的取样点采集水样,进行水质重金属元素分析。取样点布设遵循“面上控制、局部加密”的原则,同时也兼顾河水背景值和矿业活动点对河水影响点的获取。矿业活动影响的河水包括尾矿库、废渣堆放场、选矿厂、生活区等处排泄的地表水体,对流经的河流上下游主河道采用1/1km布点。

对采水样润洗2~3次,采样完毕后确保瓶内不留气泡并密闭不泄露。河水样在河流中间或其流动部分中采集1L。所有样品在野外就地加硝酸酸化至 $\text{pH}<2$ 。确保4天内将样品送到实验室分析测试;固体样品采集1kg,湿态固体样自然风干后碎

样送到实验室;干态固体样直接送到实验室碎样测试分析。

对 pH 值、温度等易随环境变化而改变的指标,现场用便携式水质分析仪(HACH)当场测试。重金属元素含量由中国地质调查局西安地质调查中心实验测试中心采用全谱直读等离子体光谱仪ICP、等离子体质谱仪ICP-MS、原子荧光光度计AFS-2202E测定,测试依据参照标准DZ/T0223—2001,GB/T 5750.6—2006,DZG20—05。

2.2 评价标准及评价模型

由于5处矿山位于自然保护区范围,笔者依据GB3838—2002地表水Ⅰ类水质标准计算污染物单项污染指数和综合污染指数,用于评价青藏高原金属矿区河流水质中重金属单项和综合污染程度^[21-22]。

计算公式详见公式(1)、(2),地表水的评价等

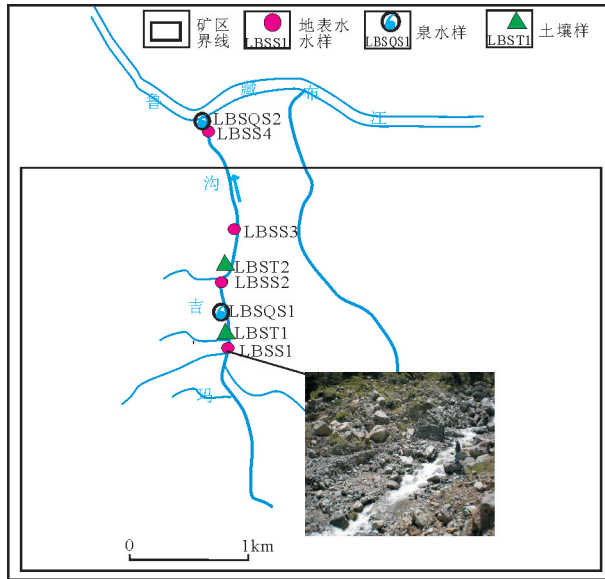


图6 罗布莎铬铁矿样品分布
Fig.6 The distribution of river samples in Luobusha chrome-iron mining area

级见表2、表3。

$$\text{单项污染指数 } P = C_i / C_0 \quad (1)$$

式中： P —单项污染指数； C_i —地表水某点样品中某污染物的实测含量（地下水单位 mg/L，土壤单位 mg/kg）； C_0 —地表水国家标准中某污染物的限值（地下水单位 mg/L，土壤单位 mg/kg）；单项污染指数大于1，表明该污染物超过国家地下水或土壤中相应的污染物限值。其值愈大，表明超标愈严重。

$$\text{综合污染指数 } P_z = \sqrt{\frac{(\bar{p}_i)^2 + (\max p_i)^2}{2}} \quad (2)$$

式中： P_z —地表水中综合污染指数； $\max P_i$ —同一样品中多种污染物中最大的单项污染指数； $\bar{p}_i$ —同一样品中多种污染物中单项污染指数的平均值。

表2 地表水重金属污染等级
Table 2 Heavy metal pollution grades of surface water

等级划分	单项污染指数(P_i)	污染等级	污染水平
I	$P_i < 1$	安全级	未受到污染
II	$1 \leq P_i < 2.0$	轻度污染	受到轻度污染
III	$2.0 \leq P_i < 3.0$	中度污染	受到中度污染
IV	$3.0 \leq P_i < 5.0$	重度污染	受到严重污染
V	$P_i \geq 5.0$	极严重污染	受到极严重污染

3 结果与分析

3.1 测试结果

从表4可知，5个矿区河水中重金属均有检出。德尔尼铜矿区河水pH值为8.17~8.75，微碱性环境，检出的重金属元素为Cr、As、Cu、Zn，原始含量范围分别在0.001~0.004mg/L、0.004~0.265mg/L、0.001~0.003mg/L、0.002~0.004 mg/L之间。其中，As元素最高值和平均含量(0.091mg/L)远高于其他4个矿区。

大场金矿流经的大场河pH值为8.03~8.62(同时间段内相邻河流监测的pH值)，检出的重金属元素为Pb、Cr、As、Cu、Zn，原始含量范围分别在0.001~0.002mg/L、0.002~0.0005mg/L、0.002~0.039 mg/L、0.004~0.006mg/L和0.003~0.008mg/L之间。含量较低。

下柳沟铅锌矿流经的下柳沟河主体水质pH值为8.22~8.44(同时间段内相邻河流监测的pH)，河水除Hg元素外，其他重金属均检出，其含量范围分别为0.006~0.014mg/L、0~0.001mg/L、0.004~0.013mg/L、0.002~0.005mg/L、0.004~0.019mg/L、0.006~0.039mg/L。河水中Pb、Cr、Zn含量的最高值在5个矿区中最高。Cu元素最高值仅次于甲玛铜矿。

甲玛铜矿位于色布浦沟一级支流莫古浦源头，在距布浦沟调查点S17.7km处莫古浦汇入色布浦沟S3，此时汇入点(河水pH=3.9)水质浑黄，具有硫磺味，色布浦沟水体pH值为7.5~7.6，检出的重金属元素为Cd、As、Cu，其含量范围分别为0~0.004mg/L、0.001~0.004mg/L、0.01~41.74mg/L。河水中Cu元素最高值和平均值在5个矿区中最高。

罗布莎铬铁矿玛吉沟水质较好，pH值为7.3~7.7，只有As检出，含量较低。

表3 地表水综合污染评价分级
Table 3 Grading of surface water comprehensive pollution evaluation

等级划分	综合污染指数(P_z)	污染等级	污染水平
I	$P_z \leq 0.7$	安全	清洁
II	$0.7 < P_z \leq 1.0$	警戒线	尚清洁
III	$1.0 < P_z \leq 2.0$	轻污染	轻度污染
IV	$2.0 < P_z \leq 3.0$	中污染	受到中度污染
V	$P_z > 3.0$	重污染	污染相当严重

表4 德尔尼矿区河水中重金属元素含量及pH值
Table 4 The heavy metals concentrations and pH of surface water
in Deerni River of typical mining areas

矿区	样品 编号	采样位置	重金属元素含量/(mg·L ⁻¹)							pH
			Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	
德尔尼 铜矿区	DENS1	矿区水源	<0.00005	<0.001	<0.001	0.004	0.005	0.002	0.003	8.75
	DENS2	正对尾矿库德尔尼河断面	<0.00005	<0.001	<0.001	0.002	<0.001	0.003	0.002	8.17
	DENS3	尾矿库涵洞上游500m断面	<0.00005	<0.001	<0.001	0.003	0.265	0.001	0.002	8.48
	DENS4	尾矿库涵洞排水入德尔尼河后断面	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.002	0.002	8.3
	DENS5	德尔尼河主河道	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	0.004	0.003	0.002	8.27
	DENS6	德尔尼河主河道	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.002	0.004	8.21
	DENS7	德尔尼河主河道	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.002	0.002	8.19
	DENS8	德尔尼河主河道	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.002	0.002	8.24
	DENS9	德尔尼河主河道	<0.00005	<0.001	<0.001	0.001	<0.001	0.003	0.002	8.24
最小值			—	—	—	0.001	0.004	0.001	0.002	8.17
最大值			—	—	—	0.004	0.265	0.003	0.004	8.75
平均值			—	—	—	0.002	0.091	0.002	0.002	8.317
大场金 矿区	DCS6	大场河主河道中游一支流	<0.00005	0.001	<0.001	0.003	0.002	0.006	0.007	/
	DCS5	大场河源头	<0.00005	0.001	<0.001	0.002	0.003	0.004	0.004	/
	DCS4	大场河源头入主河道前	<0.00005	0.001	<0.001	0.003	0.008	0.004	0.003	/
	DCS3	大场河主河道上游	<0.00005	0.001	<0.001	0.004	0.039	0.006	0.005	/
	DCS1	大场河主河道中下游	<0.00005	0.002	<0.001	0.005	0.005	0.006	0.008	/
	DCS2	大场河主河道下游	<0.00005	0.001	<0.001	0.003	0.004	0.004	0.003	/
最小值			—	0.001	—	0.002	0.002	0.004	0.003	/
最大值			—	0.002	—	0.005	0.039	0.006	0.008	/
平均值			—	0.001	—	0.003	0.009	0.005	0.005	/
下柳沟 铅锌矿 区	XLGS1	下柳沟河上游	<0.00005	0.014	<0.001	0.013	0.005	0.016	0.039	/
	XLGS2	下柳沟河中游	<0.00005	0.010	<0.001	0.009	0.004	0.019	0.028	/
	XLGS3	下柳沟河出山口	<0.00005	0.006	0.001	0.004	0.002	0.004	0.006	/
		最小值	—	0.006	—	0.004	0.002	0.004	0.006	—
最大值			—	0.014	0.001	0.013	0.005	0.019	0.039	—
平均值			—	0.010	0.001	0.009	0.004	0.013	0.024	—
甲玛铜 矿区	JMS1	石浦沟河上游	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.001	0.01	<0.05	7.6
	JMS2	石浦沟河上游加错德村	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.002	0.01	<0.05	7.6
	JMS3	甲玛矿区莫古浦河入石浦沟河前	<0.00005	<0.005	0.004	<0.010	0.001	41.74	<0.05	3.9
	JMS4	甲玛矿区石浦沟中游	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.001	0.068	<0.05	7.5
	JMS5	甲玛矿区石浦沟中游卡军果村	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.001	0.051	<0.05	7.6
	JMS6	石浦沟中下游双巴岗村	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.002	0.01	<0.05	7.6
	JMS7	石浦沟中下游卡加村	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.003	0.01	<0.05	7.7
	JMS8	石浦沟下游卡列村	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.004	0.01	<0.05	7.6
	JMS9	石浦沟入墨竹曲河前	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.001	0.01	<0.05	7.6
最小值			—	—	0.004	—	0.001	0.01	—	3.9
最大值			—	—	0.004	—	0.004	41.74	—	7.7
平均值			—	—	0.004	—	0.002	4.658	—	7.2
罗布莎 铬铁矿 区	LBSS1	玛吉沟上游沟水	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	<0.001	<0.01	<0.05	7.7
	LBSS2	玛吉沟中上游水	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	<0.001	<0.01	<0.05	7.3
	LBSS3	玛吉沟中游沟水	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	<0.001	<0.01	<0.05	7.5
	LBSS4	玛吉沟下游沟水	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.003	<0.01	<0.05	7.4
最小值			—	—	—	—	—	—	—	7.3
最大值			—	—	—	—	0.003	—	—	7.7
平均值			—	—	—	—	0.003	—	—	7.5

德尔尼河主要超标元素为 As(图 7),其单项污染指数变化范围在 0~10.6 之间, $P \geq 5.0$ 为极严重污染;其他元素的单项污染指数小于 1,安全。综合污染指数为 0.18~7.76,即在 1.04km 处河流的河水重金属综合污染指数为 7.76,该断面综合污染程度为重污染,河流经过 0.39km 的自净后达到安全级别。

从图 8 可知,大场河重金属元素单项污染指数和综合污染指数均小于 1,水质处于安全级别,但重金属元素 Pb、Cr、As、Cu、Zn 的高值主要出现在 5.5~10km 的大场金矿过采区,但由于防污自净能力可能

下降,增大了地下水的污染机率,对地下水环境造成了严重威胁。

下柳沟河受矿坑废水排放的影响,Pb、Cd、Cu 和 Zn 元素单项污染指数分别为 0.2~2.1、0~55、0.4~24、0.3~1550(图 9),Pb 元素的单项污染程度达到轻度污染,Cd、Cu 和 Zn 元素单项污染程度达到极重度污染;其余重金属元素单项污染指数小于 1,安全。综合污染指数为 0.3~1108.3,即中游河段污染水平达到极严重污染水平。水质在中游地段受矿坑废水排放的影响,经过 1.81km 到达出山口,达到安全水平。

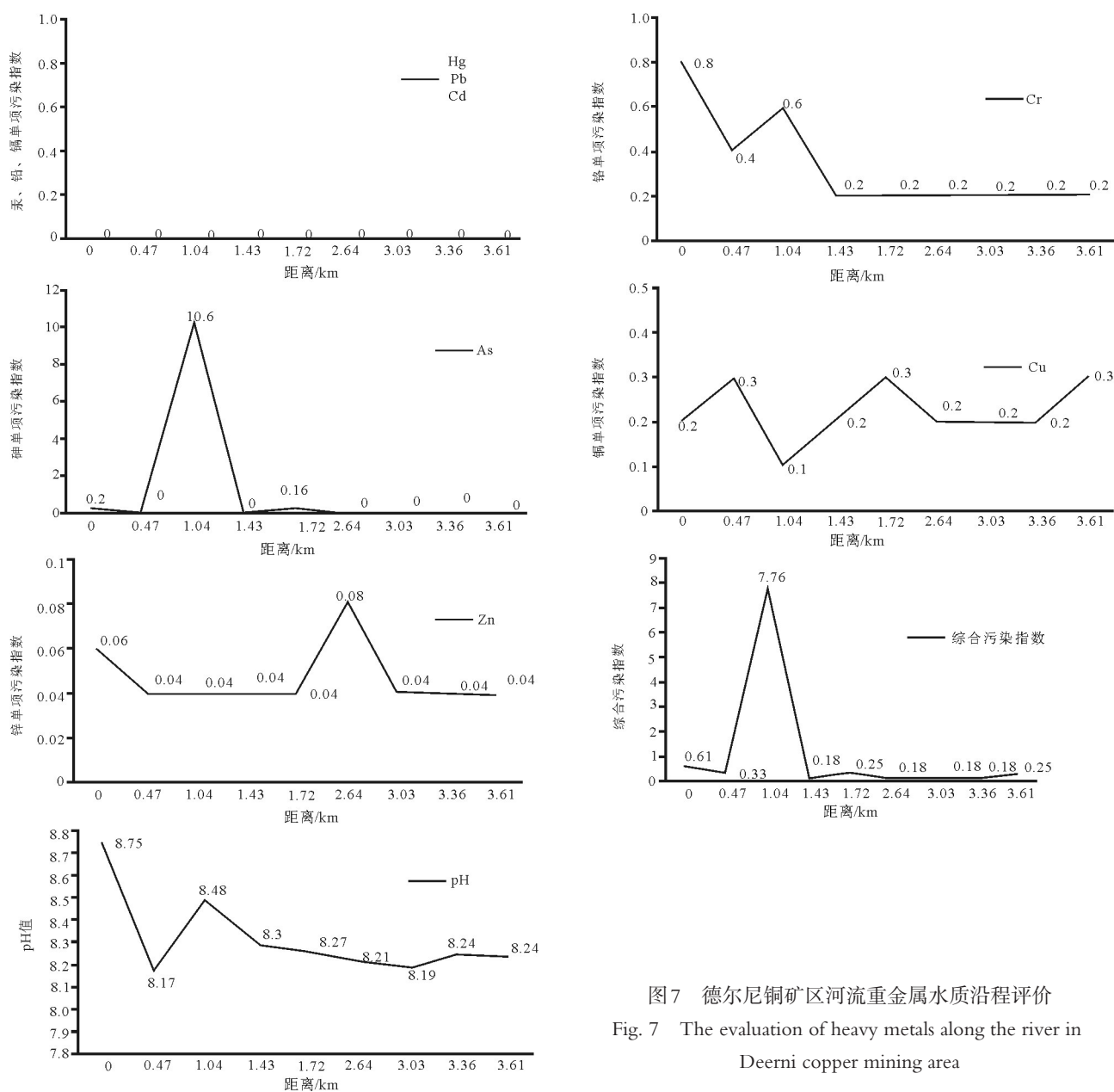


图 7 德尔尼铜矿区河流重金属水质沿程评价

Fig. 7 The evaluation of heavy metals along the river in Deerni copper mining area

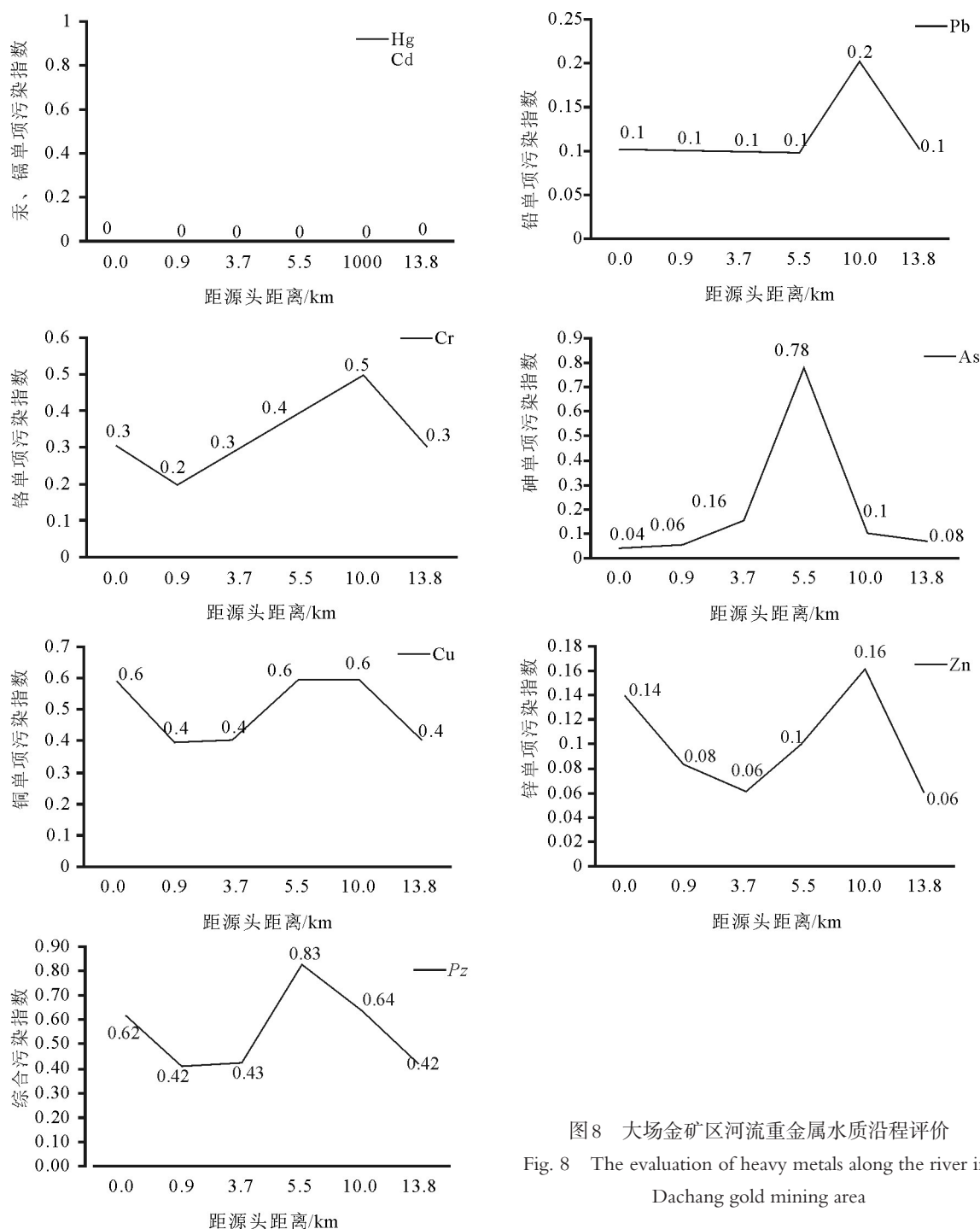


图8 大场金矿区河流重金属水质沿程评价

Fig. 8 The evaluation of heavy metals along the river in Dachang gold mining area

由图10可知,色布浦沟特征污染物主要为Cu、Cd。其中Cu单项污染指数为0~4174,单项污染程度为极重度污染;Cd单项污染指数为0~4(重度污染),其余重金属元素单项污染指数均小于1,安全。综合污染指数为0~4216,重金属污染断面主要出现在距上游7.7km处。位于甲玛矿区主要矿业活

动区内及其下游一定距离,经过1.9km后水质变为安全。

玛吉沟未见特征污染物,只有下游有As元素检出,单项污染指数均小于1,安全(图11)。

3.2 河水pH值对重金属离子的影响

经过对比(表4;图7—图11)可知,青藏高原5

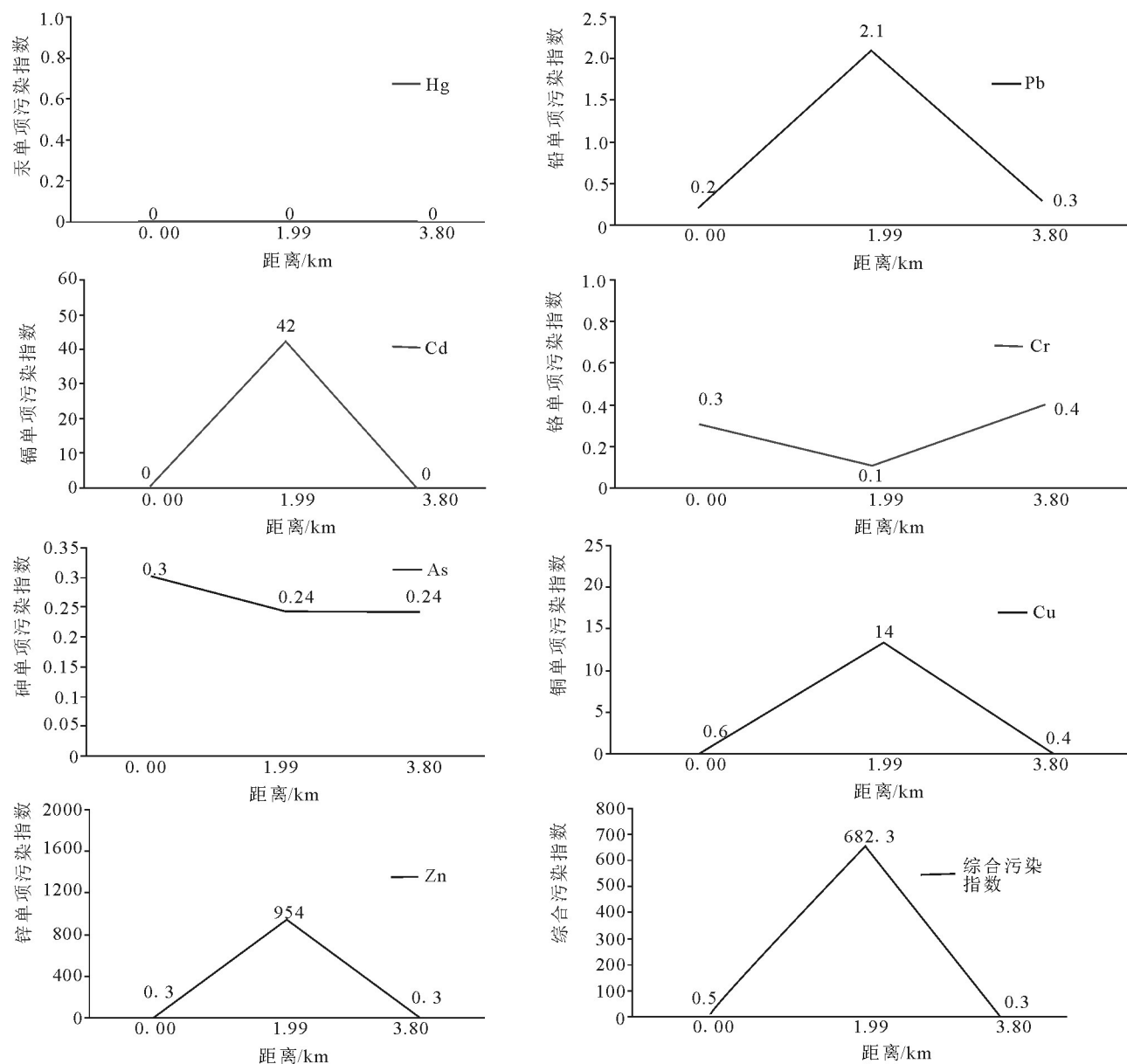


图9 下柳沟铅锌矿河流重金属水质沿程评价

Fig. 9 The evaluation of heavy metals along the river in Xialiugou lead-zinc mining area

处典型矿区的pH值中4处为微碱性环境,只有甲玛驱龙铜矿从强酸性变为碱性,强酸性环境促进了一些呈现碱性的重金属元素的释放,采样点位于甲玛铜矿矿业活动下游,可能由于原生本底值为酸性(2008年新建矿山前监测地表水pH值为4.98~7.78),长春黄金设计院认为甲玛铜矿水体本底属强酸性Cu、Fe、Mn重金属离子超标的水系,明显受到区域成矿带的地球化学背景值影响^{③④},且受矿业活动影响,水质pH值发生改变。

3.3 矿业活动阶段对河水中重金属离子的影响

在矿业活动区,无论是超标重金属元素还是未超标重金属均会产生响应,如德尔尼铜矿1.04km处位于废水排放、尾矿库影响的范围,色布浦沟河的5.3~9.6km途经甲玛铜矿矿权范围或是大场河流径大场金矿过采区时,重金属呈增加趋势等。

勘探阶段(大场金矿)和闭坑后(罗布莎铬铁矿)河流水质污染较小,所检测的重金属均未超标;开采阶段矿业活动对河水水质污染较大,如开采阶

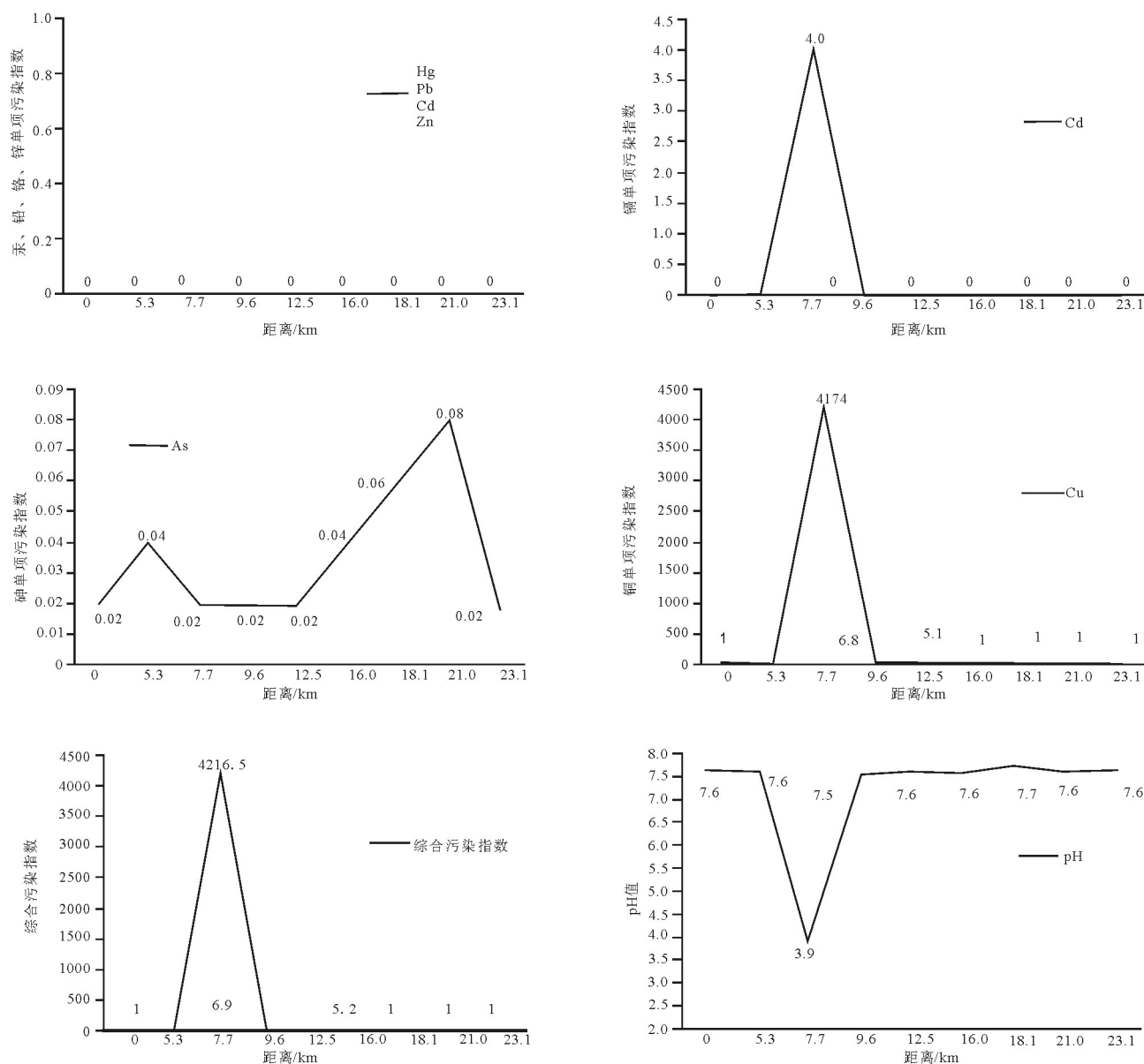


图10 甲玛矿区色布浦沟水质沿程评价

Fig. 10 The evaluation of heavy metals along the Sebu River in the Jiama mining area

段的下柳沟铅锌矿、德尔尼铜矿区、甲玛矿区出现了Pb、Cd、Cu、Zn、As等元素的超标,一些重金属元素超标倍数程度可达1550倍(表5)。

3.4 开发不同矿种对河流水质中重金属离子的影响

以重金属元素超标的矿区为例,铜矿开采区(甲玛铜矿和德尔尼铜矿为例)色布浦沟河酸性条件超标重金属元素为Cu、Cd;德尔尼河为As。铅锌矿区(以下柳沟铅锌矿为例)为Pb、Cd、Cu和Zn四种元素。

高背景值含量为河流重金属含量增高提供了

物源,前人从成矿背景条件中提供了证据,如甲玛矿区^[23-24],下柳沟铅锌矿的Pb、Cu和Zn^[25-27]。本文从监测河流周边的土壤、矿石、围岩中元素含量等角度研究了矿区河水重金属超标的物质来源(表6、表7),如甲玛矿区的Cd、Cu元素的土壤背景值分别为0.11~0.44mg/kg、21.9~447mg/kg,高于国家土壤环境质量标准(GB15618—1995)自然保护区标准0.2mg/kg、35mg/kg,德尔尼铜矿的土壤As含量为16~41.94mg/kg,矿石中As元素含量为36mg/kg,高

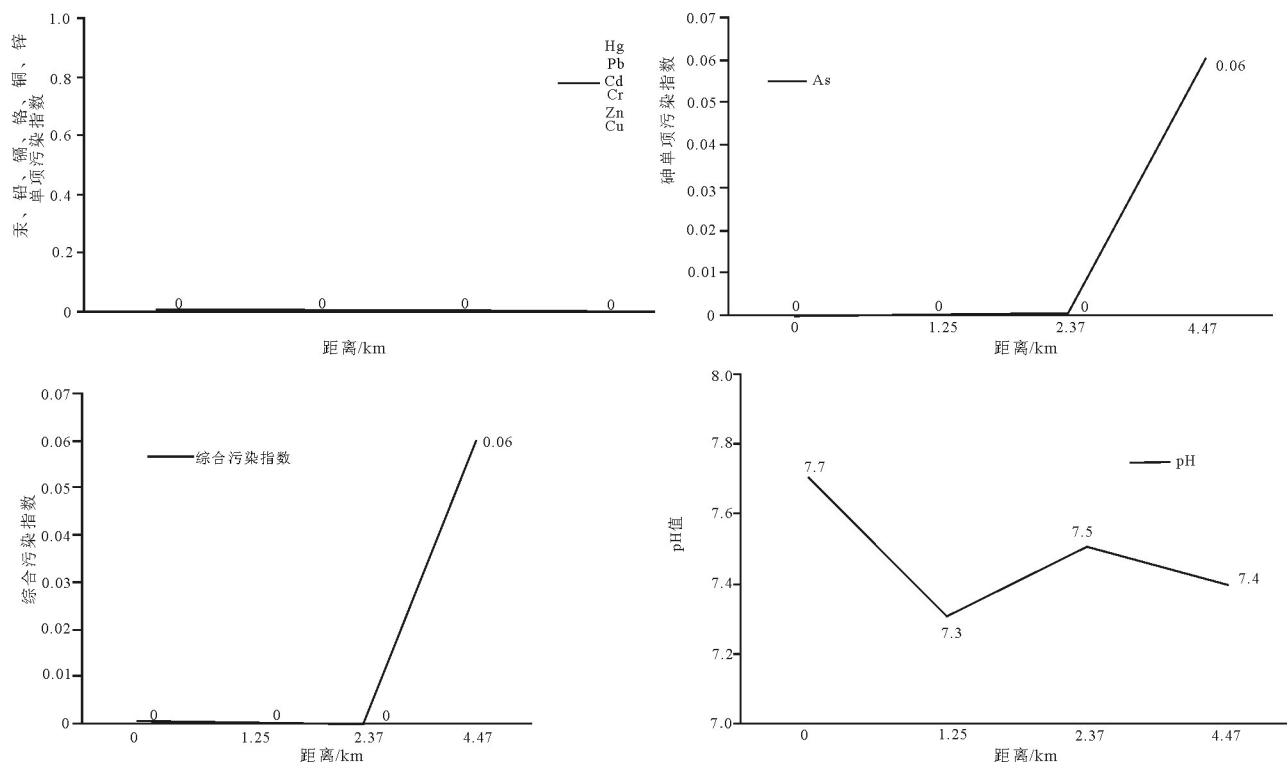


图 11 罗布莎矿区玛吉沟河水水质沿程评价

Fig. 11 Evaluation diagram of heavy metals along the Maji River in the Lobsshar mining area

于标准 0.2mg/kg,下柳沟铅锌矿 Pb、Cd、Cu 和 Zn 分别为 46.0~910mg/kg、0.37~6.72mg/kg、28.0~450mg/kg、84.0~1300mg/kg,均远高于土壤标准值。当然,重金属元素较高的背景值不一定导致该元素超标,如罗布莎铬铁矿土壤中 6 种重金属(除 Hg)均超标,但河水水质较好,可能与其水文地质条件和各元素的地球化学性质有关,如罗布莎上游有清洁的泉水(表 7)。

发现另一部分是矿山开采添加物导致河流中元素增加^[28-32],调查发现下柳沟铅锌矿废水水质 Pb、Cu、Cd 和 Zn 出现超标的现象(表 5)。如果选冶工艺提高,控制得当,对下游河水水质影响较小,如德

尔尼废水水质均达标(表 5)。

3.5 河流净化程度

以上述 3 个矿区为例,河水中重金属经过 0.39~1.9km 达到安全水平。首先受到地形地貌影响,在地形相对平缓的低山丘陵地貌的大场金矿,流速缓慢,相对滞缓,流量较小,降解速率相对缓慢;而在地形为高山峡谷地貌的德尔尼铜矿,流速快,流量大,降解速率相对快。其次还与矿山开发规模、污染排放方式、强度等因素有关。单一污染方式污染物排放量小影响程度可能低;而复合污染方式,排放强度大,加大大范围历史遗留问题可能对河流净化程度产生影响。

表 5 典型矿区废水中重金属元素含量和 pH 值

Table 5 The heavy metals values and pH in waste water samples of the typical mining areas

矿区	样品编号	重金属元素含量/(mg·L ⁻¹)							pH
		Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	
下柳沟铅锌矿	XLGFS1	<0.00005	0.016	0.055	0.002	0.011	0.24	15.5	6.93
德尔尼铜矿	DENFS1	<0.00005	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.00539	0.0879	7.72
	DENFS2	<0.00005	<0.001	0.00134	<0.001	<0.001	0.0111	0.39	7.68

表6 典型矿区土壤重金属元素含量及pH值
Table 6 The heavy metals values and pH in soils of the typical mining areas

矿区	样品编号	重金属元素含量/(mg·kg ⁻¹)							pH
		Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	
甲玛铜矿区	JMT1	0.023	32.5	0.11	75.7	21.6	21.9	74.8	8.36
	JMT2	0.046	38.4	0.14	166	17.9	39.2	89.9	8.03
	JMT3	0.037	126	0.44	55.7	54.2	136	102	7.90
	JMT4	0.048	41.9	0.35	45.9	29.2	447	93.6	8.01
	JMT5	0.022	194	0.22	44.3	29.1	63.6	88.7	7.96
德尔尼铜矿区	DENT1	0.081	27	0.26	92	18.7	60	100	6.8
	DENT2	0.068	28	0.2	72	21.26	28	74	7.02
	DENT3	0.051	23	0.21	81	41.94	48	90	6.63
	DENT4	0.0545	24	0.26	120	16	53	94	7.14
下柳沟铅锌矿	XLGT1	0.000034	46.0	0.37	81.0	0.0128	28.0	84.0	7.70
	XLGT2	0.000284	910	6.72	72.0	0.0528	450	1300	7.51
	XLGT3	0.000034	530	3.36	66.0	0.0181	38.0	520	7.70
大场金矿区	DCT1	0.021	18.0	0.18	47	31.1	22	71	8.70
	DCT2	0.034	19.0	0.18	48	161.3	26	81	7.48
	DCT3	0.028	21.0	0.19	54	45.3	28	84	7.47
	DCT4	0.022	19.0	0.15	56	23.8	30	89	7.62
	DCT5	0.02	22.0	0.17	55	66.6	31	92	7.49
	DCT6	0.024	18.0	0.12	38	41.2	25	77	7.55
罗布莎铬铁矿 矿区	LBST1	0.068	153	0.36	79.6	75.6	852	152	4.04
	LBST2	0.028	14.0	0.068	1114	11.6	21.0	56.7	8.69
国家土壤环境质量标准 (GB15618—1995)自然保 护区标准		0.15	35.0	0.2	90.0	15.0	35.0	100.0	

4 结 论

(1)通过5个矿山的探讨,德尔尼铜矿、甲玛铜

矿、下柳沟铅锌矿污染程度在重度以上,影响因素高背景提供了丰富的物源条件,同时不合理的采选工艺增加了河水重金属含量,地形水文条件、矿山开发规

表7 典型矿区矿石、废渣样中重金属元素含量和pH值
Table 7 The heavy metals values and pH in sediment samples,
discarded residues samples of the typical mining areas

矿区	样品编号	重金属元素含量/(mg·kg ⁻¹)							pH
		Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	
大场金矿	DCKS1	0.1	33.0	0.19	120	3.6	53.0	120	7.73
德尔尼铜矿	DENKS1	16000	180	17000	33	36	81.38	1453	7.53
	DENWY1	130	18	140	2000	0.17	4.99	25	9.09
	DENWKJ1	1800	53	3600	200	5.64	31.33	901	6.95
	DENDN1	30	21	100	120	0.12	21.23	115	8.24
国家土壤环境质量标准 (GB15618—1995) 自然保护区标准		0.15	35.0	0.2	90.0	15.0	35.0	100.0	

表 8 典型矿区泉水中重金属元素含量和 pH 值
Table 8 The heavy metals values and pH in spring
samples of the typical mining areas

矿区	样品编号	重金属元素含量/(mg·kg ⁻¹)							pH
		Hg	Pb	Cd	Cr	As	Cu	Zn	
甲玛铜矿区	JMQS1	<0.00005	<0.005	<0.0001	<0.010	0.001	0.01	<0.05	7.6
罗布莎铬铁矿区	LBSQS1	<0.00005	<0.005	<0.001	0.01	<0.001	<0.01	<0.05	7.4
	LBSQS2	<0.00005	<0.005	<0.001	0.01	0.003	<0.01	<0.05	7.4

模、污染排放方式、强度也是重要的影响因素。

(2) 勘探阶段和闭坑后河流水质污染较小, 开采阶段矿业活动对河水水质污染较大, 矿山企业应重视开采阶段的河流防治。同时研究区选取三江源、祁连山水资源重点保护区, 切实做好防治工作, 对三江源、祁连山等国家水资源重点保护区起积极作用。

(3) As、Pb、Cd、Cu 和 Zn 五种元素是金属矿山的特征污染物, 矿山河流重金属污染一部分矿区背景值含量较高, 另一部分是矿山开发导致河流中重金属元素增加, 因此最好能开发新工艺以减少废水、废渣淋滤液对河流的污染。

(4) 青藏高原 5 处典型的高山峡谷区金属矿山河流受到单一矿山影响, 河水流经 2km 后重金属元素达到安全水平, 一定程度上反映了青藏高原大型矿山河流的纳污能力。

致谢: 青海水勘院张盛生、贾升安同志和四川省地质矿产开发局九一五水文地质工程地质队曾文钊、杨与靖在野外进行样品采集, 西北地质调查测试中心对样品进行测试分析, 在此一并致谢。

参考文献

- [1] Gao Z X. Evaluation of heavy metal pollution and its ecological risk in one river reach of a gold mine in Inner Mongolia, Northern China[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017: 1–6.
- [2] Liao J B, Ru X, Xie B B, et al. Multi-phase distribution and comprehensive ecological risk assessment of heavy metal pollutants in a river affected by acid mine drainage[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, (141): 75–84.
- [3] Kerr J G, Cooke C A. Erosion of the Alberta badlands produces highly variable and elevated heavy metal concentrations in the Red Deer River, Alberta[J]. Science of the Total Environment, 2017, 596/597: 427–436.
- [4] Meng Y B, Zhou L F, He S L, et al. A heavy metal module coupled-

with the SWAT model and its preliminary application in a mine-impacted watershed in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 1207–1219.

- [5] Yu R L, Hu G R, Lin C Q, et al. Contamination of heavy metals and isotopic tracing of Pb in intertidal surface sediments of Jinjiang River Estuary, SE China[J]. Applied Geochemistry, 2017, 83: 41–49.
- [6] Sakai N, Alsaad Z, Thuong N T, et al. Source profiling of arsenic and heavy metals in the Selangor River basin and their maternal and cord blood levels in Selangor State, Malaysia[J]. Chemosphere, 2017, 184: 857–865.
- [7] Fu J, Zhao C, Luo Y, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: their relations to environmental factors[J]. J. Hazard Mater, 2014, 270: 102–109.
- [8] Zhuang P, McBride M B, Xia H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. Total Environ., 2009, 407: 1551–1561.
- [9] Zhuang P, Zou H, Shu W. Biotransfer of heavy metals along a soil–plant–insect–chicken food chain: field study[J]. J. Environ. Sci. China, 2009, 21: 849–853.
- [10] 田成秀, 李文明, 郑长远. 河流重金属研究进展[J]. 青海师范大学学报(自然科学版), 2011, (4): 25–28.
- [11] 周晨霓, 潘刚, 任德智. 拉萨河流域高寒湿地水质影响因子分析[J]. 农业资源与环境学报, 2014, 31(5): 411–416.
- [12] 李秀庆. 湟水河流域污染物的迁移转化分析及水质评价[D]. 青海师范大学硕士学位论文, 2013: 1–84.
- [13] 唐灿富. 西藏某铜铅锌选矿废水处理及回用探析[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(4): 55–57.
- [14] 黄苗, 刘玥晓, 赵伟华, 等. 长江源区近年水质时空分布特征探析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(7): 46–51.
- [15] 王旭, 周爱国, 甘义群, 等. 青藏高原矿产资源开发与地质环境保护协调发展的对策探讨[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(2): 69–74.
- [16] 补建伟. 黑河源区西支流域水化学特征与土壤重金属空间结构及环境承载力评价[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 2013: 1–174.
- [17] 康波, 严正平. 青海大场金矿矿床分析与前景[J]. 科学技术, 2014, 11: 325–326.
- [18] 田成成, 李成英, 张磊, 等. 大场金矿区水文地质特征及矿坑用水

- 量预测[J]. 西部探矿工程, 2012, 11: 177-180.
- [19]安秀清. 西藏甲玛矿区铜资源量或逾 1500 万 t[J]. 矿山机械, 2010, 38(22): 95-95.
- [20]Wang H, Yu S B, Cao H, et al. The Strata Movement Rule of Overlying Poor Ore with Massive Mining[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(10): 71-77.
- [21]国家环境保护总局. GB3838—2002 地表水环境质量标准[S]. 北京: 国家环境保护总局, 2002.
- [22]中国地质调查局. 矿山地质环境调查评价规范[S]. 中国地质调查局地质技术标准, 2014: 11, 30.
- [23]唐菊兴, 邓世林, 郑文宝, 等. 西藏墨竹工卡县甲玛铜多金属矿床勘查模型[J]. 矿床地质, 2011, 2: 179-197.
- [24]郑文宝, 陈毓川, 唐菊兴, 等. 西藏甲玛铜多金属矿床铜矿化富集规律研究及应用[J]. 金属矿山, 2010, 2: 87-92.
- [25]郭彦汝, 王瑾, 王潇洒, 等. 北祁连尕大坂铜铅锌矿床特征及形成环境[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2014, 32(3): 51-57.
- [26]祁正林, 李衍业. 北祁连下柳沟—尕达坂地区铜多金属矿田成因探讨[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2010, 28(2): 37-41.
- [27]Cao D Z, Chen Q M, Peng G X, et al. Geochemical characteristics and significance of Gadaban Cu-polymetal deposit in northern Qilian[J]. Journal of Qinghai University(Natural Science Edition), 2016, 34(3): 31-41.
- [28]彭沈一. 铜冶炼工人血铅、血镉、尿镉及尿砷的分布[J]. 国外医学. 卫生学分册, 1985, 5: 231.
- [29]高小文, 吕敬, 李秀娟, 等. 铜矿尾矿库污染物在地下水中运移规律数值模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(2): 120-121.
- [30]严群, 罗仙平, 赖兰萍, 等. 会东铅锌矿选矿废水净化回用工艺的试验研究[J]. 工业水处理, 2008, 28(3): 57-60.
- [31]赵旭会. 探究铅锌矿选矿废水的处理及循环利用[J]. 安全生产与绿色能源, 2017, 2: 118-119.
- [32]唐灿富. 西藏某铜铅锌选矿废水处理及回用探析[J]. 湖南有色金属, 2012, 28(2): 55-57.
- ①徐友宁, 刘瑞平, 陈华清, 等. 青海威斯特铜业有限责任公司德尔尼铜矿矿山地质环境保护与恢复治理方案. 中国地质调查局西安地质调查中心. 2014.
- ②张盛生, 白刚刚, 许伟林, 等. 青海省三江源头大场及周边砂金矿区地质环境治理可行性研究报告. 青海省环境地质局. 2011.
- ③长春黄金设计院. 甲玛多金属矿区超标本底水处理技术研究与应用. 2013.
- ④西藏自治区地质矿产勘查开发局第二地质大队. 西藏自治区墨竹工卡县甲玛铜多金属矿矿山地质环境调查评价报告. 2013.