

DOI: 10. 13656/j. cnki. gxkx. 20180919. 003

刘朋雨, 张连凯, 黄奇波, 等. 广西元宝山矿区重金属空间分布特征[J]. 广西科学, 2018, 25(6): 694-700.

LIU P Y, ZHANG L K, HUANG Q B, et al. Spatial distribution characteristics of heavy metals in Yuanbaoshan Mining Area, Guangxi[J]. Guangxi Sciences, 2018, 25(6): 694-700.

# 广西元宝山矿区重金属空间分布特征 \* Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in Yuanbaoshan Mining Area, Guangxi

刘朋雨, 张连凯, 黄奇波, 覃小群 \* \*

LIU Pengyu, ZHANG Liankai, HUANG Qibo, QIN Xiaoqun

(中国地质科学院岩溶地质研究所, 自然资源部岩溶生态与石漠化治理重点实验室, 自然资源部岩溶动力学重点实验室, 广西桂林 541004)

(Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Key Laboratory of Karst Dynamics, Ministry of Land and Resources, Institute of Karst Geology, China Academy of Geosciences, Guilin, Guangxi, 541004, China)

**摘要:**【目的】对广西元宝山矿区的重金属污染情况和分布特征进行评价。【方法】对矿区水体、土壤、植物的重金属含量进行测试分析和评价。【结果】元宝山矿区的水体重金属污染元素主要为铁、铝、锌、镍、钴、镉、锰, 污染源为矿坑排水, 超过Ⅳ类标准的倍数分别为 5.5 倍、22.5 倍、4.7 倍、10.8 倍、11.9 倍、9.9 倍、6.1 倍。元宝山矿区的土壤重金属污染元素为砷、镉、铜、镍、铅、锌, 含量超标数倍至数百倍不等。【结论】元宝山矿区重金属的污染情况与污染源距离相关, 大多数重金属浓度随与污染源距离的增加而减小, 其中在距污染源 5~8 km 处减少最多。五节芒 *Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb. ex Schum. et Laut. 可作为污染区的先锋修复物种。

**关键词:** 元宝山矿区 重金属污染 富集系数 生态修复

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9164(2018)06-0694-07

**Abstract:** 【Objective】To evaluate the heavy metal pollution and distribution characteristics of Yuanbaoshan mining area in Guangxi. 【Methods】The content of heavy metals in water, soil and plants was tested and evaluated. 【Results】Water pollution elements in Yuanbaoshan mining area are mainly Fe, Al, Zn, Ni, Co, Cd, Mn, and the pollution source was mine pit drainage. The multiples exceeding the class Ⅳ standard were: 5.5 times, 22.5 times, 4.7 times, 10.8 times, 11.9 times, 9.9 times, 6.1 times. The heavy metal pollution elements in the soil of Yuanbaoshan mining area were arsenic, cadmium, copper, nickel, lead, zinc, exceeding the standard several times to several hundred times. 【Conclusion】The pollution of heavy metals in the Yuanbaoshan mining area was related to the distance of the pollution source. The concentration of most heavy metals decreased with the increase of the distance from the pollution source, and the decrease was most at 5—8 km from the pollution source. *Miscanthus floridulus* (Labill.) Warb. ex Schum. et Laut. could be used as a pioneer repair species in contaminated areas.

**Key words:** Yuanbaoshan mining area, heavy metal pollution, coefficient of concentration, bioremediation

收稿日期: 2018-08-03

作者简介: 刘朋雨(1987—), 男, 助理研究员, 主要从事水文地质环境地质调查研究, E-mail: liupengyu@karst. ac. cn.

\* 中国地质调查局地质调查项目(121201237000160021)资助。

\* \* 通信作者: 覃小群(1961—), 女, 研究员, 主要从事水文地质环境地质调查研究, E-mail: qxq@karst. ac. cn.

## 0 引言

**【研究意义】**我国重金属污染形势严峻,近年来重金属污染事件频发<sup>[1-4]</sup>。数据调查显示:我国江河湖库底质的污染率高达 80.1%,重金属污染的耕地面积近  $2 \times 10^7$  hm<sup>2</sup>,约占总耕地面积的五分之一<sup>[5-9]</sup>,这不仅对生态环境造成严重破坏,还直接损害民众身体健康,影响社会稳定。**【前人研究进展】**重金属污染分人为原因和自然原因 2 种。重金属污染的自然来源主要是岩石风化和火山喷发等自然地质活动;重金属污染的人为来源主要为矿产开采、金属冶炼、化工、煤燃烧、汽车尾气排放、生活废水排放、污泥使用、污水灌溉、农药和化肥施用、大气沉降等<sup>[10]</sup>。人类活动是土壤重金属污染的主要成因。重金属污染已引起了全社会的关注,在严格控制污染源头的同时,人们积极开展重金属治理和修复的研究。目前水体重金属污染治理修复方法主要有物理方法、化学方法、物理化学方法、集成技术、生物方法等<sup>[11-16]</sup>。其中生物方法属于原位修复技术,处理费用很低,与常规的工程措施和物理化学措施相比具有明显的优势,且具有对环境破坏较小的特点<sup>[17-21]</sup>,因此受到重点关注和研究。**【本研究切入点】**本研究以广西元宝山矿区内的泗维河及其周边土壤、植物为研究对象,测定区域内重金属污染情况和分布特征。**【拟解决的关键问题】**初步掌握元宝山矿区从污染源头至泗维河下游的重金属空间分布特征,为地方风险管理和治理修复决策提供科学依据。

## 1 研究区概况

元宝山位于广西壮族自治区融水县境内,范围在东经  $108^{\circ}58'$ ~ $109^{\circ}28'$ ,北纬  $25^{\circ}16'$ ~ $25^{\circ}30'$ ,为融水第一高山,广西第三山,位于融水县中部,行政区划分属安太乡、香粉乡、安陞乡、白云乡、红水乡等乡,最高峰无名峰海拔 2 086 m。元宝山北始林五坳,南濒金兰河,东至吉曼村,西临元宝河,方圆  $3\ 901$  hm<sup>2</sup>。区内属中亚热带季风气候,由于海拔较高,山地较多,故山区气候特征比较明显,具体表现为季风显著,气温较高,湿度大,降水量多;气候温和,年平均气温  $19.6^{\circ}\text{C}$ ;雨量充沛但分布不均,年均降水量  $1\ 284.3$  mm;夏长冬短,四季不均,夏季最长,冬季次之,春季最短。年总蒸发量  $1\ 478.2$  mm。研究区内有色金属矿产丰富,以锡铜锌多金属为主,资源潜力大,主要分布在元宝山岩体周边及摩天岭岩体西侧,可划分为摩天岭西侧锡铜多金属成矿区、元宝山西侧钨铜锡多金属成矿区和元宝山东侧锡铜锌多金属成矿区。其中

锡矿资源最有潜力,已有中型矿床 4 个,小型矿床 2 个,集中分布在元宝山东侧锡铜锌多金属成矿区和摩天岭西侧锡铜多金属成矿区。已查明,主要金属资源量锡近  $7 \times 10^4$  t,铜  $4.3 \times 10^4$  t,镍  $1.5 \times 10^4$  t,铅锌保有资源量  $2.7 \times 10^4$  t。由于开采方式落后,各类废渣废石露天堆置,尾矿坝不稳定,是周边农田的潜在污染源。

泗维河,又名回回江,属珠江水系西江干流黔江段支流柳江上游河段融江一级支流。泗维河发源于广西壮族自治区柳州市融水县元宝山东麓安陞乡乌吉村,贯穿安陞乡全境,流经融安县长安镇安宁村大袍屯入融安县境内,从泗维河口大泽注入融江,全长 60 多 km,其中融水县内长度为 50 多 km,融安县内河长 11 km。流域面积是  $323$  km<sup>2</sup>,其中融水县安陞乡全境占绝大部分,约  $250$  km<sup>2</sup>。主要支流至上而下有吉曼河、新塘河、曹口河、洋岭河、暖坪河、大墩河和融安县的泗朗河等。在融安县大泽建有中型水电站泗维河水电站。研究区内的污染环境及破坏生态问题较为突出。

## 2 材料与方法

### 2.1 主要试剂及仪器

水温、pH 值、电导率、溶解氧、TDS 等指标由美国产 WTW,Multi3420 测试,分辨率分别为  $0.01^{\circ}\text{C}$ 、 $0.01$  pH 单位、 $0.01$   $\mu\text{s}/\text{cm}$ 、 $0.01$  mg/L、 $0.01$  mg/L。

本文中  $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  为质量浓度,分别采用德国产 Aquamerck 碱度计和硬度计测量,分辨率分别为  $0.1$  mmol/L 和  $2$  mg/L。

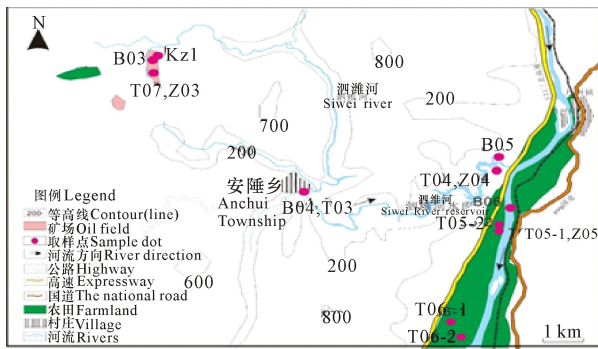
水化学指标测定采用 IRIS Intrepid II XSP 全谱直读等离子体光谱仪(美国热电公司)。

样品重金属浓度测定采用 Perkin Elmer AA6800 原子吸收分光光度计(美国 Perkin Elmer 公司)。

### 2.2 采样及样品处理

2016 年 10 月对元宝山矿区的泗维河水体、土壤、植物进行取样分析,分别在泗维河上游矿坑排水口、中上游泗维水库入库口、中下游水库大坝及下游汇入融江入口处附近,共选取取样点 15 个,其中地表水取样点 4 个,土壤取样点 7 个,矿渣取样点 1 个,植物取样点 3 个。采样点分布如图 1 所示。

水体样品:现场测定水温、pH 值、电导率、TDS 等参数。 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{HCO}_3^-$  采用德国 Merck 滴定试剂盒现场测定。水样采集后装入纯净水瓶,采样时瓶内不留气泡。其中,用于测定阳离子的水样加入 10%  $\text{HNO}_3$  酸化至  $\text{pH} < 2$ ,测定阴离子的样品不作处理。



B为地表水取样点, T为土壤取样点, Z为植物取样点, Kz为矿渣取样点

B is the sampling point of surface water, T is the soil sampling point, Z is the plant sampling point, Kz is the slag sampling point

图1 元宝山矿区采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of sampling points in Yuanbaoshan mining area

土壤样品:在 10 m×10 m 的样地中选取 3~4 处,自地表向土下 20 cm,采集一个混合样品,风干后

表1 元宝山矿区水体主要调查指标一览表

Table 1 Summary of main survey indicators of water body in Yuanbaoshan mining area

编号 Number	采样地点/标准 Sampling point/ standard	pH	钠 Na (mg/L)	铁 Fe (mg/L)	铝 Al (μg/L)	铜 Cu (μg/L)	铅 Pb (μg/L)	锌 Zn (μg/L)	铬 Cr (μg/L)	镍 Ni (μg/L)	钴 Co (μg/L)	镉 Cd (μg/L)	锰 Mn (μg/L)	砷 As (μg/L)	汞 Hg (μg/L)
B03	融水县 108 铜矿矿坑排水口 Mine drainage of 108 copper mine in Rongshui county	2.85	1.66	10.99	11 270	513	32.7	23 260	22.5	1 077	1 192	99.5	9 080	0.9	0.24
B04	融水县江门村泗维水库入口 Entrance of Siwei reservoir in Jiangmen village, Rongshui county	6.94	2.59	0.3	76.5	2.79	2.68	78.7	0.83	10.5	1.32	<0.06	136	18.5	0.17
B05	融水县泗维水库大坝下游 Downstream dam of Siwei reservoir in Rongshui county	6.96	2.92	0.04	3.26	<0.09	1.35	2.82	0.68	<0.07	0.13	<0.06	15.4	<0.09	0.64
B06	融安县滩底村融江 Tandi village Rong river in Rongan county	7.54	3.05	0.13	124	0.14	2.37	4.84	1.02	0.55	0.62	<0.06	61.1	1.41	0.13
—	国家标准 National standard	—	400	2	500	1 500	1 000	5 000	100	100	100	10	1 500	50	2

由表 1,参照我国地下水环境质量标准(GB/T 14848—2017)Ⅳ类标准,可见元宝山矿区水体污染元素主要为铁、铝、锌、镍、钴、镉、锰,污染源为矿坑排水,其超Ⅳ类标准的倍数分别为 5.5 倍、22.5 倍、4.7 倍、10.8 倍、11.9 倍、9.9 倍、6.1 倍。矿坑排水为酸性废水,在地表径流过程中,受地表土壤和岩石溶蚀的作用影响,废水 pH 值上升,重金属离子浓度显著降低。在泗维河及融江采集到的水样全部符合 GB/

装入塑料自封袋。

植物样品:先在 2 m×2 m 范围内做生物量调查,接着选取多株目标植物,分别对根、茎、叶、花、果实进行取样并混合,置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min,70℃ 下烘干 24 h 左右,碾碎,过 0.3 mm 尼龙筛,最后用浓硝酸加热消解。处理后的植被样品用 AA6800 原子吸收光谱仪测定金属元素含量。测定过程中用平行双样和加标回收样进行质量控制,以保证数据的准确度和精度。

水体样品采集后送国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心进行分析。土壤样品和植物样品的测定均在广东地质实验测试中心完成。

### 3 结果与分析

#### 3.1 水化学类型及重金属污染情况

元宝山矿区的水样主要水质检测结果见表 1。

T 14848—2017 的Ⅳ类标准,到本次取样最下游的滩底村融江水时(图 1),上述污染物浓度分别下降 98.9%、98.9%、99.9%、99.9%、99.9%、99.3%。元宝山矿区水体中重金属含量随距离(与污染源的距)的增加呈现减小的变化趋势,且在 0~8 km 处浓度降低较多,至矿区 15 km 左右即泗维水库处重金属含量已经很低,但在融安滩底村时浓度又出现增加的现象。这可能是由于滩底村地处泗维河汇入融江

之后的地理位置,重金属离子浓度的增加受融江上游其他地点的污染物影响所致。

### 3.2 土壤重金属污染情况

元宝山矿区的土壤样品(矿区附近荒地3土壤,矿渣,水库入口附近荒地1土壤,水库大坝附近荒地2土壤,汇入融江入口滩底村水田1、菜地1土壤,汇入口下游小洲村水田2、菜地2土壤)主要调查指标的检测结果见表2。分析可知:

表2 元宝山矿区的土壤主要调查指标一览表

Table 2 Summary of main soil survey indicators in Yuanbaoshan mining area

编号 Number	采样点/标准 Sampling sites	pH	砷 As ( $\mu\text{g/g}$ )	镉 Cd ( $\mu\text{g/g}$ )	钴 Co ( $\mu\text{g/g}$ )	铬 Cr ( $\mu\text{g/g}$ )	铜 Cu ( $\mu\text{g/g}$ )	汞 Hg ( $\mu\text{g/g}$ )	锰 Mn ( $\mu\text{g/g}$ )	钼 Mo ( $\mu\text{g/g}$ )	镍 Ni ( $\mu\text{g/g}$ )	铅 Pb ( $\mu\text{g/g}$ )	硒 Se ( $\mu\text{g/g}$ )	锌 Zn ( $\mu\text{g/g}$ )
Kz1	矿渣 Slag	7.65	529.7	5.54	10.9	0.11	208	0.018	1 073	1.46	32.7	22.8	0.85	287
T07	荒地3 Wasteland 3	3.49	1 380	0.58	10.5	0.064	121	0.16	2 052	3.59	86.3	757	1.96	742
T03	荒地1 Wasteland 1	4.52	224.2	0.6	16.2	0.092	117	0.11	755	0.86	90.5	85.6	0.96	228
T04	荒地2 Wasteland 2	8.3	25.22	0.86	27.1	0.12	41.3	0.17	1 406	0.89	53	26.8	0.32	182
T05-1	水田1 Paddy field 1	6.36	13.2	0.65	7.5	0.074	24.1	0.14	251	1.02	22.3	35	0.41	178
T05-2	菜地1 Vegetable field 1	4.48	11.08	0.1	5.59	0.046	19.2	0.1	254	0.87	15.4	24.8	0.39	72.9
T06-1	水田2 Paddy field 2	6.75	9.49	0.3	8.9	0.08	23.8	0.12	375	0.73	20.6	30.6	0.42	122
T06-2	菜地2 Vegetable field 2	7.42	10	0.28	7.76	0.042	22.4	0.3	691	0.78	14.8	22.2	0.27	94.7
—	国标二级 National two level standard	—	20	0.25	40	120	50	0.2	—	—	60	50	3	150

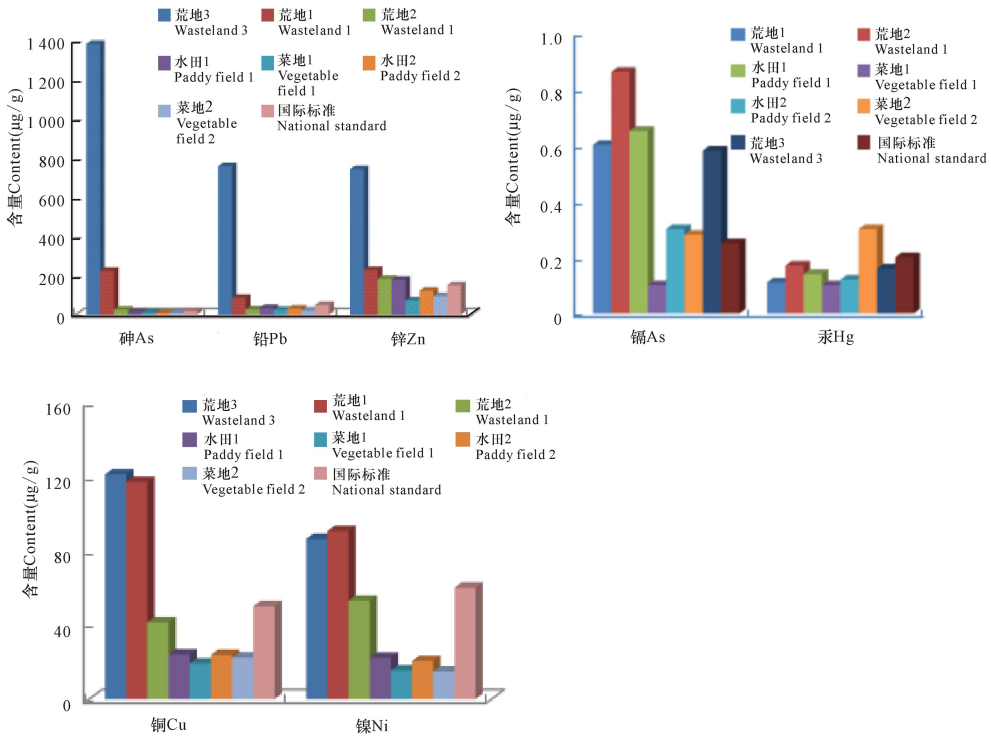


图2 元宝山矿区不同样地土壤重金属含量

Fig. 2 Heavy metal content in soils of different sample plots in Yuanbaoshan mining area

2)从泗维河上游到下游,土壤取样点距离为5~8 km,由测试结果可知,土壤中绝大多数重金属含量随距离的增加而降低,且在0~8 km内降低最多,越向后减弱效应越弱,直至稳定(图3)。

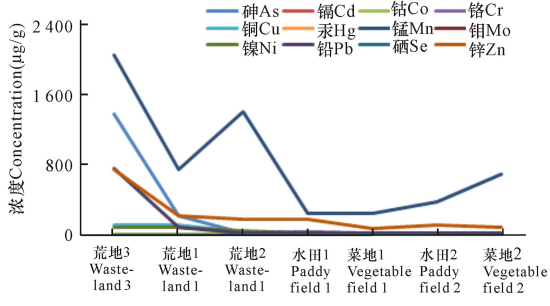


图3 元宝山矿区的土壤污染物含量随距离的变化  
Fig. 3 Variation of soil pollution content with distance in Yuanbaoshan mining area

3)土壤中镉、汞、铜、镍等污染物含量不是从上游到下游递减的趋势,而是在中游或下游增加,说明有其他原因对其产生影响,还需进一步确认。

表3 元宝山矿区的植物主要调查指标一览表

Table 3 Summary of main plants survey indicators in Yuanbaoshan mining area

样品编号 Number	植物种类 Plant species	取样位置 Sampling sites	砷 As (mg/kg)	铁 Fe (mg/kg)	铬 Cr (mg/kg)	钴 Co (mg/kg)	镍 Ni (mg/kg)	镉 Cr (mg/kg)	铅 Pb (mg/kg)	铜 Cu (mg/kg)	锌 Zn (mg/kg)	钼 Mo (mg/kg)	锰 Mn (mg/kg)	硒 Se (mg/kg)	汞 Hg (ng/g)
Z03	五节芒1 <i>Miscanthus floridulus</i> 1	根系土 Soil from root	1 795	72 811	956	11.7	97.7	0.95	521	122	881	2.54	1 943	1.87	67
		根 Root	22.1	10 989	8.81	3.37	7.98	8.25	329	6.75	1 152	0.73	214	0.53	29.6
		叶 Leaf	36.4	374	0.54	0.37	1.27	0.22	1.22	5.45	55.4	0.056	134	0.18	12.6
Z04	五节芒2 <i>Miscanthus floridulus</i> 2	根系土 Soil from root	21.8	41 756	93.6	27.9	61.9	0.87	40.4	43.9	266	0.73	1 361	0.27	39
		根 Root	2.56	2 572	0.54	3.35	4.95	0.73	0.7	19.3	144	3.58	202	0.79	63.6
		叶 Leaf	0.92	117	0.28	0.1	0.068	0.053	0.22	2.08	19.9	0.38	49.2	0.12	27.5
Z05	水稻 Rice	根系土 Soil from root	12.2	27 348	65	8.01	27.4	0.56	37.6	26.6	231	1.07	251	0.37	110
		根 Root	339	30 386	21	8.53	16.4	4.03	25.4	21.1	184	2.74	410	0.62	57.2
		茎 Stem	2.25	247	0.56	0.28	1.18	0.43	0.65	6.52	62.4	5.19	415	0.13	63.3

### 3.3 植物重金属吸附能力情况

对泗维河上中下游河流附近分布较为广泛的植物进行取样,分别选取:矿区附近五节芒1、水库附近五节芒2、汇入融江入口附近水稻,对其根系土、根、茎、叶、果实等进行分析,结果见表3。其中,不同植物对重金属的富集系数见图4。

当某种植物对某种污染物质的富集系数>1时,表示该植物为某种污染物质的良好富集植物。五节芒1是土壤镉、锌的良好吸附植物,富集系数分别为8.7和1.3,可作为土壤重金属修复的物种,五节芒2对所有污染物的富集系数均未达到1,可能由于土壤本底值不同或其他原因导致,富集系数与五节芒1有显著差异,还需进行后续研究。水稻对土壤砷、镉是良好的吸附植物,尤其是对砷的富集系数为27.8,说明在存在砷、镉污染的土壤中种植水稻有较高风险。

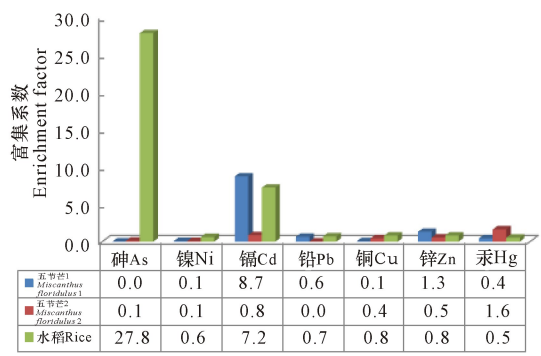


图4 元宝山矿区不同植物对污染物质的富集系数  
Fig. 4 Enrichment factors of pollutants from different plants in Yuanbaoshan mining area

## 4 结论

(1)元宝山矿区水体污染元素主要为铁、铝、锌、镍、钴、镉、锰,污染源为矿坑排水,其含量超IV类标准的倍数分别为5.5倍、22.5倍、4.7倍、10.8倍、11.9倍、9.9倍、6.1倍。矿坑排水为酸性废水,在地表径流过程中,受地表土壤和岩石溶蚀的作用影响,废水pH值上升,离子浓度显著降低。融安滩底村融江水样的重金属离子浓度增加可能是融江上游其他地点影响所致。

(2)元宝山矿区土壤重金属污染元素为砷、镉、

铜、镍、铅、锌,含量超标数倍至数百倍不等。土壤中重金属含量随距离(离污染源矿坑废水的距离)的增加而降低,且在0~8 km内降低最多,越向后减弱效应越弱,直至稳定。

(3)由于土壤重金属含量不同,五节芒对相同重金属的吸附能力有很大差别:五节芒1是土壤镉、锌的良好吸附植物,富集系数分别为8.7和1.3,五节芒2对镉、锌的富集系数分别为0.8和0.5。可知五节芒在一定条件下可作为土壤重金属修复的物种,但其存在富集系数因环境不同稳定性较差的问题。

(4)水稻对土壤砷、镉有良好的吸附植物,尤其是对砷的富集系数为27.8,说明在存在砷、镉污染的土壤中种植经济作物水稻有较高风险。

#### 参考文献:

[1] 周建军,周桔,冯仁国.我国土壤重金属污染现状及治理战略[J].中国科学院院刊,2014,29(3):315-320.  
ZHOU J J,ZHOU J,FENG R G. Heavy metal pollution in soil and its control strategy in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2014,29(3):315-320.

[2] 中国工程院环境保护部.中国环境宏观战略研究[M].北京:中国环境科学出版社,2011.  
Environmental Protection Department of Chinese Academy of Engineering. Research on China's environmental macro strategy[M]. Beijing, China Environmental Science Press,2011.

[3] 骆永明.中国主要土壤环境问题与对策[M].南京:河海大学出版社,2008.  
LUO Y M. Main soil environmental problems and countermeasures in China[M]. Nanjing: Henan University Press,2008.

[4] 瞿丽梅,陈同斌,廖晓勇,等.广西环江铅锌矿尾砂坝坍塌对农田土壤的污染及其特征[J].环境科学学报,2008,28(6):1206-1211.  
QU L M,CHEN T B,LIAO X Y, et al. Pollution of agricultural soils resulting from a tailing spill at a Pb-Zn mine; A case study in Huanjiang, Guangxi Province[J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(6):1206-1211.

[5] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.  
FAN T, YE W L, CHEN H Y, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agriculture soil[J]. Ecology and Environment Sciences, 2013,22(10):1727-1736.

[6] 顾继光,林秋奇,胡韧,等.土壤-植物系统中重金属污染的治理途径及其研究展望[J].土壤通报,2005,36(1):128-133.

GU J G, LI Q Q, HU R, et al. Heavy metals pollution in soil-plant system and its research prospect[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(1): 128-133.

[7] 顾继光,周启星,王新.土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(2):143-151.  
GU J G, ZHOU Q X, WANG X. Reused path of heavy metal pollution in soils and its research advance[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2003, 11(2): 143-151.

[8] 刁维萍,倪吾钟,倪天华,等.水环境重金属污染的现状及其评价[J].广东微量元素科学,2004,11(3):1-5.  
DIAO W P, NI W Z, NI T H, et al. The existing status and evaluation of heavy metal pollution in water environment[J]. Guangdong Trace Elements Science, 2004, 11(3): 1-5.

[9] 贾燕,汪洋.重金属废水处理技术的概况及前景展望[J].中国西部科技:学术版,2007(4):10-13.  
JIA Y, WANG Y. The summarization of prospects of treatment technology for heavy metal wastewater[J]. Science and Technology of West China: Academic, 2007 (4): 10-13.

[10] 刘有才,钟宏,刘洪萍.重金属废水处理技术研究现状与发展趋势[J].广东化工,2005,32(4):36-39.  
LIU Y C, ZHONG H, LIU H P. Research present condition and development trend of heavy metals liquid waste processing technique[J]. Guangdong Chemical Industry, 2005, 32(4): 36-39.

[11] 朱映川,刘雯,周遗品,等.水体重金属污染现状及其治理方法研究进展[J].广东农业科学,2008(8):143-146.  
ZHU Y C, LIU W, ZHOU Y P, et al. Reused path of heavy metal pollution in hydro-environment and its research advance[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2008(8):143-146.

[12] 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):263-268.  
LIU C Z, HUANG Y Z, LEI M, et al. Soil contamination and assessment of heavy metals of Xiangjiang river basin[J]. Environmental Science, 2012, 33(1): 263-268.

[13] UDOVIC M, LESTAN D. Fractionation and bioavailability of Cu in soil re-mediated by EDTA leaching and processed by earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) [J]. Environ Sci Pollut Res, 2010, 17(3): 561-570.

[14] 谢景千,雷梅,陈同斌,等.蜈蚣草对污染土壤中As、Pb、Zn、Cu的原位去除效果[J].环境科学学报,2010,30(1):165-171.  
XIE J Q, LEI M, CHEN T B, et al. Phytoremediation of

soil co-contaminated with arsenic, lead, zinc and copper using *Pteris vittata*: A field study[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(1): 165-171.

- [15] 黄闰, 孟桂元, 陈跃进, 等. 苕麻对重金属铅耐受性及其修复铅污染土壤潜力研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(20): 148-152.

HUANG G, MENG G Y, CHEN Y J, et al. Study on Pb tolerance and remediation potential of lead-contaminated soil of ramie[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(20): 148-152.

- [16] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 等. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施[J]. 环境科学学报, 2007, 27(6): 881-893.

LIAO X Y, CHEN T B, YAN X L, et al. Enhancement of heavy metal removal in phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(6): 881-893.

- [17] 郭彬, 李伟东, 丁能飞, 等. 重金属污染土壤的植物修复技术的问题及对策[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(4): 852-857.

GUO B, LI W D, DING N F, et al. Problems in operation and corresponding countermeasures of phytoremediation of soils contaminated by heavy metals[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(4): 852-857.

- [18] 李静, 余天明, 周洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评估[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2327-2330.

LI J, YU T M, ZHOU J, et al. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper[J]. Environmental Science, 2008, 29(8): 2327-2330.

- [19] 谢华, 刘晓海, 陈同斌, 等. 大型古老锡矿区土壤和蔬菜重金属含量及其健康风险[J]. 环境科学, 2008, 29(12): 3503-3507.

XIE H, LIU X H, CHEN T B, et al. Concentration and health risk of heavy metals in vegetables and soils in region affected by an ancient tin ore[J]. Environmental Science, 2008, 29(12): 3503-3507.

- [20] 刘庆, 吴晓芙, 陈永华, 等. 铅锌矿区的植物修复研究进展[J]. 环境科学与管理, 2012, 37(5): 110-114.

LIU Q, WU X F, CHEN Y H, et al. Progress on phytoremediation in lead-zinc mine areas[J]. Environmental Science and Management, 2012, 37(5): 110-114.

- [21] 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估[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014-2021.

YANG G, SHEN F, ZHONG G J, et al. Concentration and health risk of heavy metals in crops and soils in a zinc-lead mining area in southwest mountainous regions[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(9): 2014-2021.

(责任编辑: 陆 雁)

(上接第 683 页 Continue from page 683)

- [9] SHAHABIPOUR F, CARAGLIA M, MAJEE D, et al. Naturally occurring anticancer agents targeting EZH2[J]. Cancer Letters, 2017, 400: 325-335.

- [10] ZHANG J, LIN M T, TUNG H Y, et al. Bruceine D induces apoptosis in human chronic myeloid leukemia K562 cells via mitochondrial pathway[J]. Am J Cancer Res, 2016, 6(4): 819-826.

- [11] HENG Z, YUN P J, CHUN Y S, et al. Berbamine suppresses cell proliferation and promotes apoptosis in ovarian cancer partially via the inhibition of Wnt/ $\beta$ -Catenin signaling[J]. Acta Biochim Biophys Sin (Shanghai), 2018, 50(6): 532-539.

- [12] ZHAO X, SUN S, XU J, et al. MicroRNA-152 inhibits cell proliferation of osteosarcoma by directly targeting

Wnt/ $\beta$ -catenin signaling pathway in a DKK1-dependent manner[J]. Oncol Rep, 2018, 40(2): 767-774.

- [13] NISHIKAWA K, OSAWA Y, KIMURA K. Wnt/ $\beta$ -Catenin signaling as a potential target for the treatment of liver cirrhosis using antifibrotic drugs[J]. Int J Mol Sci, 2018, 19(10): 1-12.

- [14] VALLEE A, LECARPENTIER Y. Crosstalk between peroxisome proliferator-activated receptor gamma and the canonical Wnt/ $\beta$ -Catenin pathway in chronic inflammation and oxidative stress during carcinogenesis[J]. Front Immunol, 2018, 9: 1-18.

(责任编辑: 陆 雁)