

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20151121001

夏吉成, 胡平, 王建旭, 等. 贵州省铜仁汞矿区汞污染特征研究[J]. 生态毒理学报, 2016, 11(1): 231-238

Xia J C, Hu P, Wang J X, et al. Mercury pollution characteristics in Tongren Mercury Mining Area, Guizhou Province, China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2016, 11(1): 231-238 (in Chinese)

贵州省铜仁汞矿区汞污染特征研究

夏吉成^{1,2}, 胡平³, 王建旭¹, 张华¹, 冯新斌^{1,*}

1. 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
2. 中国科学院大学, 北京 100049
3. 铜仁市固体废物管理中心, 铜仁 554300

收稿日期: 2015-12-10 录用日期: 2016-02-01

摘要: 铜仁汞矿位于铜仁市碧江区云场坪镇, 曾是贵州省最大的汞矿之一。为了了解该矿在闭坑后矿区的汞污染特征, 采集了矿区的大气、水体、矿渣、土壤和农作物样品, 分析了汞的分布特征。结果表明, 矿区大气汞浓度为 7.29~139 ng·m⁻³、地表水汞浓度为 81.6~4.25×10³ ng·L⁻¹、矿渣汞含量为 2.79~510 mg·kg⁻¹、土壤汞含量为 3.06~2.92×10³ mg·kg⁻¹。可见, 大气、水体、矿渣和土壤中的汞含量远高于对照区或国家相关标准。共采集了 10 种农作物玉米(*Zea mays* L)、高粱(*Chinese sorghum*)、枣(*Ziziphus jujuba* Mill)、梨(*Pyrus spp*)、茄子(*Solanum melongena*)、丝瓜(*Luffa cylindrica*)、西红柿(*Lycopersicon esculentum*)、南瓜(*Cucurbita moschata duchesne*)、苦瓜(*Balsam pear*)和辣椒(*Capsicum annuum*)。除了茄子和南瓜外, 其余农作物可食部分的汞含量都高于国家《食品安全国家标准》。综上所述, 铜仁汞矿开采和冶炼带来的汞污染已严重影响周边生态环境和食品安全, 矿区汞污染不容忽视。

关键词: 汞; 大气; 地表水; 矿渣; 土壤; 农作物

文章编号: 1673-5897(2016)1-231-08 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Mercury Pollution Characteristics in Tongren Mercury Mining Area, Guizhou Province, China

Xia Jicheng^{1,2}, Hu Ping³, Wang Jianxu¹, Zhang Hua¹, Feng Xinbin^{1,*}

1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. Tongren Solid Waste Management Center, Tongren 554300, China

Received 10 December 2015 **accepted** 1 February 2016

Abstract: Tongren mercury mine located in Yun-chang-ping town, Bijiang district, Tongren City. It used to be one of the largest mercury mines at Guizhou province. With an aim to investigate the characteristics of mercury pollution in Tongren mercury mining area, we collected the air, water, calcine, soil and crop samples to analyze the concentration of mercury in samples. The results showed that the total gaseous mercury (TGM) concentrations ranged from 7.29 to 138.9 ng·m⁻³(with an average of 57.4 ng·m⁻³), the total mercury (THg) concentrations in surface waters ranged from 81.59 to 4.25×10³ ng·L⁻¹, the THg contents in calcines ranged from 2.79 to 510 mg·kg⁻¹ and the

基金项目: 973 项目(2013CB430004); 国家自然科学基金(41303068); 贵州省科学技术基金(黔科合 J 字[2014]2169 号); 中国科学院青年创新促进会基金; 环境地球化学国家重点实验室开放课题资助(SKLEG2015903)

作者简介: 夏吉成(1989-), 男, 硕士, 研究方向为污染环境修复, E-mail: xiajicheng13@mailsucas.ac.cn

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: fengxinbin@vip.skleg.cn

THg contents in soils ranged from 3.06 to $2.92 \times 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. All the samples had the mercury concentration exceeded the control site or national environmental standards. Totally 10 crops including corn (*Zea mays* L), sorghum (Chinese sorghum), jujube (*Ziziphus jujuba* Mill), pear (*Pyrus spp*), eggplant (*Solanum melongena*), gourd (*Luffa cylindrica*), tomato (*Lycopersicon esculentum*), pumpkin (*Cucurbita moschata duchesne*), bitter gourd (*Balsam pear*) and pepper (*Capsicum annuum*) were collected for mercury analysis. With the exceptions of eggplant and pumpkin, mercury concentrations in edible sections of crops exceeded national food safety standard. In summary, Hg mining and retorting activities have resulted in serious Hg pollution at local environment and affected the food safety in the study area. Mercury pollution of Tongren Hg mine shouldn't be ignored.

Keywords: mercury; air; surface water; calcine; soil; crops

我国汞矿资源分布相对集中,大型汞矿多分布于西南地区,其中约有 80% 汞矿分布在贵州境内。长期大规模的汞矿开采和冶炼对矿区生态环境造成了严重的污染。目前汞矿资源逐渐枯竭,尽管大部分汞矿已经闭坑^[1],但是在汞矿区,历史遗留的汞污染问题依然存在。

在我国《十二五重金属污染防治规划》中,汞被列为重点防控的重金属之一,贵州省境内的汞矿区被列为重点防控区。开展汞矿区环境汞污染效应研究,是矿区汞污染防治的基础。已有学者在我国贵州万山汞矿区^[2-3]、贵州滥木厂汞矿区^[4-5]、贵州务川汞矿区^[6]、贵州丹寨汞矿区^[7-8]、湖南凤凰茶田汞矿区^[9]、重庆秀山汞矿区^[10]和陕西旬阳汞矿区^[11]等开展了汞的污染环境效应研究,为这些区域汞污染防治和管理提供了基础资料。

铜仁汞矿位于铜仁市碧江区云场坪镇,曾是贵州省最大的汞矿之一,开采历史悠久,可追溯到明朝。该汞矿已于 1996 年闭坑,但是汞矿开采和冶炼对周边环境的影响仍不清楚,而且遗留的大量的尾渣和废渣仍然露天堆放在环境中。

为了了解该汞矿开采对周边生态环境的影响,本研究系统采集了铜仁汞矿区大气、地表水、矿渣、土壤和农作物样品,探究了汞的污染特征。本研究结果可为全面评价该矿区汞污染环境风险和开展汞污染修复工作提供基础数据。

1 研究区域概况 (Introduction of research area)

铜仁汞矿位于湘黔两省交界处的贵州铜仁市东部云场坪镇,东连湖南省凤凰县茶田镇,北接滑石乡,西、南与漾头镇毗邻。辖区位于东经 $109^{\circ}17'$ 至 $109^{\circ}22'$ 、北纬 $27^{\circ}43'$ 至 $27^{\circ}47'$ 之间。云场坪镇东西长 8.6 km,南北宽 8.4 km,总面积 35.6 km^2 。全年无霜期 250 d 左右,降雨量 1 250 mm。全镇耕地面积 249 hm^2 ,其中水田 172 hm^2 ,占耕地面积的 69.2%;

旱地 76.5 hm^2 ,占耕地面积的 30.8%。

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 样品的采集和预处理

于 2014 年 9 月对贵州省铜仁汞矿区的矿渣、农作物、土壤、大气和地表水进行了采样,采样点见图 1 (Fig. 1)。

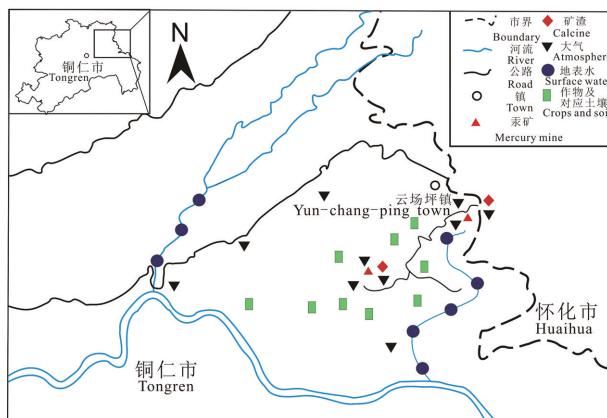


图 1 铜仁汞矿区采样位点示意图

Fig. 1 The sampling sites of Tongren Hg mining area

矿渣堆堆体上采集表层 5 cm 以下的矿渣 6 个,研磨并过 200 目筛,装入自封袋待测。

农作物:采集成熟期农作物可食部分。作物种类包括玉米(*Zea mays* L)、高粱(Chinese sorghum)、枣(*Ziziphus jujuba* Mill)、梨(*Pyrus spp*)、茄子(*Solanum melongena*)、丝瓜(*Luffa cylindrica*)、西红柿(*Lycopersicon esculentum*)、南瓜(*Cucurbita moschata Duchesne*)、苦瓜(*Balsam pear*)和辣椒(*Capsicum annuum*)。农作物样品用自来水反复清洗,去除附在其表面上的泥土,然后用去离子水漂洗干净后记录鲜重。随后,将作物分别装于尼龙网兜中悬于通风干燥处自然风干,称其干重,样品干燥后粉碎备用。

土壤:在采集农作物样品的同时,采集对应植株

根际土壤(27 个),装入聚乙烯自封袋中。土壤样品在室内风干后去除杂物,混匀研磨并过 200 目筛备用。

大气:利用 RA-915+塞曼效应汞分析仪现场测定矿区近地表的大气-气态单质汞浓度,设 13 个点,同期在贵阳采集 3 个点作为对照,每个采样点监测 10 min。

地表水:采集矿渣堆淋滤液及矿区居民所饮用的山泉水,共 6 个采样点。对照水样(3 个采样点)采自于铜仁境内的锦江河未受汞污染影响的区域。用于测定溶解态汞的水样现场用 0.45 μm 微孔醋酸纤维滤膜过滤后加入 0.5% 的工艺超纯盐酸;用于测定总汞的水样现场加入 0.5% 的工艺超纯盐酸,密封后均用双层保鲜袋包装。所有水样在分析前都在冰箱内 4 ℃ 保存。

实验用盐酸、硝酸和氯化亚锡的纯度均为分析纯,购自中国国药有限公司;溴酸钾的纯度为分析纯,购自西陇化工股份有限公司;溴化钾的纯度为 BioXtra (>99%),购自 Sigma 公司。

2.2 分析方法

水样总汞:参照闫海鱼等^[12]的方法,在未过滤水样中加入 0.5% BrCl 氧化 24 h,上机前加入 0.2% 盐酸羟胺去除过剩的 BrCl,SnCl₂还原后将汞蒸汽富集在金管,高温热解后用冷原子荧光法(Tekran 2500 型测汞仪)(Tekran Co.,Canada)测定汞含量。

水样溶解态汞:在过滤水样中加入 0.5% BrCl 氧化 24 h,上机前加入 0.2% 盐酸羟胺去除过剩的 BrCl,SnCl₂还原后将汞蒸汽富集在金管,高温热解后用冷原子荧光法(Tekran 2500 型测汞仪)测定汞含量。

水样活性汞:在未过滤水样中,加入 SnCl₂还原后将汞蒸汽富集在金管,高温热解后冷原子荧光法(Tekran 2500 型测汞仪)测定汞含量。

水样颗粒态汞:水样颗粒态汞为总汞与溶解态汞的差值。

矿渣总汞:称取 0.1 g 左右的样品,用王水水浴消解后,加入 0.5% BrCl 氧化 24 h,SnCl₂还原后用 F732 -V 型测汞仪(上海华光仪器仪表厂)测定。

土壤总汞:称取 0.1 g 样品,用王水水浴消解后,加入 0.5% BrCl 氧化 24 h,SnCl₂还原后用 F732 -V 型测汞仪测定。

土壤汞形态:采用包正铎等^[13]方法,将土壤汞分为溶解态与可交换态、特殊吸附态、氧化态、有机结合态和残渣态汞。

大气气态单质汞:利用 RA-915M 塞曼效应汞分析仪(LUMEX Co.,Russia)现场测定,气体流量为

1~3 L·min⁻¹,仪器检出限 0.5 ng·m⁻³。
农作物总汞:称取 0.1 g 左右的样品,用 RA-915M 塞曼效应汞分析仪和配套 PYRO-915 热解装置(LUMEX Co.,Russia)直接测定。

2.3 质量控制

实验质量通过平行样、空白试验和标准物质(土壤 GBW07405;植物 GBW10014)测定的统计结果控制。样品分析过程中,分析的相对偏差处于±5% 以内。土壤标准样品 GBW07405 的总汞测定值为 0.28±0.01 mg·kg⁻¹(n=5),参考值为(0.29±0.04) mg·kg⁻¹;圆白菜标准样品 GBW10014 的总汞测定值为(11.1±0.45) μg·kg⁻¹(n=5),参考值为(10.9±1.6) μg·kg⁻¹。

3 结果与讨论 (Results and discussion)

3.1 大气汞含量

由表 1(Table 1)可见,铜仁汞矿区大气汞浓度的空间变化较大,从尾渣堆放区域到矿区周边的云场坪镇上,大气汞浓度显著降低。比如,矿区尾渣堆附近大气汞平均浓度为 57.4 ng·m⁻³,矿区周边的云场坪镇上的大气汞平均浓度为 10.4 ng·m⁻³。铜仁汞

表 1 铜仁汞矿区大气汞浓度(单位:ng·m⁻³)
Table 1 The total elemental gaseous mercury concentrations at Tongren mercury mine (Unit: ng·m⁻³)

区域描述	采样点数	最小值	最大值	平均值
Description	Samples	Min	Max	Mean
尾渣堆放区域	9	13.7	139	57.4
Tailings area				
矿区周边	4	7.3	13.9	10.4
Mining periphery				
贵阳 Guiyang	3	5.8	7.4	6.5

表 2 国内外部分汞矿区大气汞的含量
Table 2 The total elemental gaseous mercury concentrations at mercury mines in China and other countries

汞矿名称	地理位置	大气汞/(ng·m ⁻³)	参考文献
Name of Hg mine	Location	TGM/(ng·m ⁻³)	References
务川汞矿	中国,贵州	7~4×10 ⁴	[16]
Wuchuan Hg mine	Guizhou, China		
万山汞矿	中国,贵州	17.8~1.1×10 ³	[17]
Wanshan Hg mine	Guizhou, China		
Nevada Hg mine	Nevada, USA	13~866	[18]
Palawan Hg mine	Palawan, Philippines	0.9~65	[19]
El Callao Hg mine	El Callao, Venezuela	280~1×10 ⁵	[20]

矿大气汞浓度明显高于北半球内陆大气汞的背景浓度($\sim 1.5\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)^[14-15]以及同期贵阳市大气汞浓度($6.5\text{ ng}\cdot\text{m}^{-3}$)。与国内外典型汞矿区大气汞浓度相比,除菲律宾巴拉望汞矿区外,铜仁汞矿区的大气汞浓度明显偏低,见表 2(Table 2),这可能与铜仁汞矿闭坑停产较早有关。

3.2 水体中不同形态汞的分布特征

对照点水样总汞浓度为 $45.1\sim 56.4\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $50.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,接近我国 I 类和 II 类地表水质量标准($50\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)。

铜仁汞矿区地表水中不同形态汞的分布特征见图 2(Fig. 2),水样总汞(THg)浓度为 $81.6\sim 4.25\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均浓度为 $1.48\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。颗粒态汞(PHg)浓度为 $49.4\sim 2.53\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $1.17\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;溶解态汞(DHg)浓度为 $11.0\sim 1.72\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $314\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解态汞浓度占总汞的 21.2%;活性汞(RHg)浓度为 $1.7\sim 15.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,平均为 $5.4\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。铜仁汞矿区地表水总汞浓度显著高于对照区,表明矿区水体受到汞污染严重。在意大利的圣萨尔瓦多汞矿,其矿区地表水体总汞浓度可达 $1.4\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,地表水污染引起鱼体的汞含量严重超标,不仅严重影响食物链安全而且给当地渔业发展带来一定影响^[21]。铜仁汞矿区地表水总汞浓度可达 $4.25\times 10^3\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,因此地表水汞污染带来的环境风险不容忽视。值得注意的是,活性汞的平均浓度达 $5.4\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$,尽管该形态在总汞中所占比例较小,

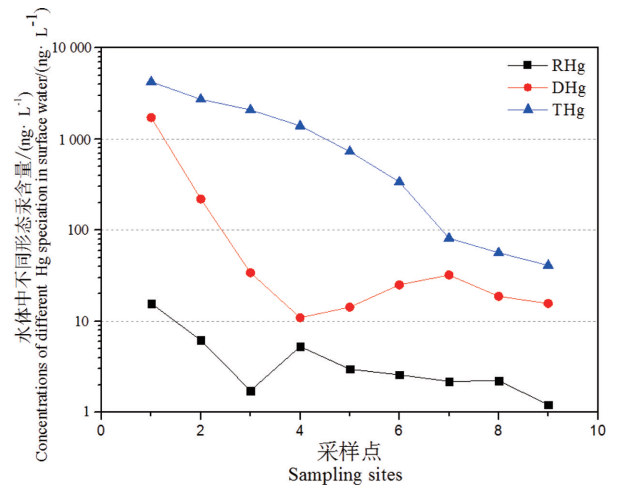


图 2 铜仁汞矿区地表水中不同形态汞的分布特征

注:采样点 1~6 为矿区,7~9 为对照区。

Fig. 2 The distribution characteristic of different mercury species of surface water at Tongren Hg mining area

Note:Sampling points 1~6 for mining sites, 7~9 for the control areas.

但是它在水体中既可以被还原生成零价汞并进入大气也能被微生物甲基化生成毒性极强的甲基汞^[22]。

颗粒态汞是水体中汞的主要存在形态,约占总汞浓度 78%。

如图 3(Fig. 3)所示,矿区水体中的颗粒态汞与总汞含量之间呈显著的正相关关系,这与李平等^[23]的研究结果类似,说明地表水中的汞主要和颗粒物结合在一起迁移。从污染控制角度考虑,通过人工拦截,将颗粒物沉淀则能去除矿区地表水体大部分汞,可作为将来地表水汞污染修复的一种策略。

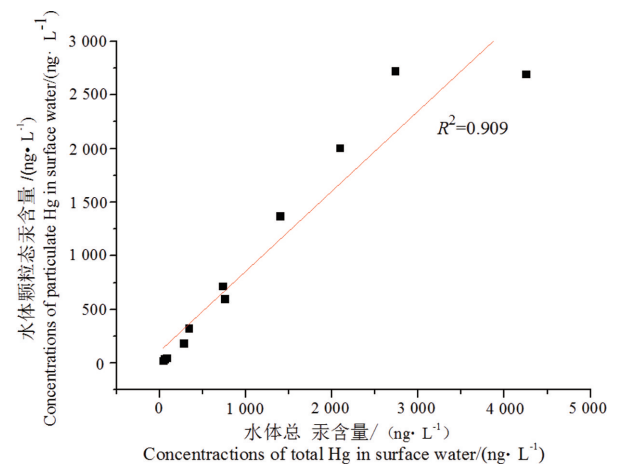


图 3 铜仁汞矿区地表水中颗粒态汞含量与总汞的相关性

Fig. 3 The correlation relationship between particulate Hg and total Hg in surface water in Tongren Hg mining area

3.3 矿渣汞含量

汞矿区矿渣是一个重要的汞释放源^[24]。从表 3 (Table 3)可以看出贵州铜仁汞矿区不同采样点的矿渣样品中总汞含量变化较大。这可能与采样点位的水文条件和不同时期的汞冶炼工艺有关^[25]。当外部水动力较强时,矿渣中的汞会随水流迁移到周围环境,导致矿渣中汞含量降低。此外,不同时期的汞冶炼工艺,也会造成矿渣汞含量的不同。早期冶炼工艺简单粗放,矿石冶炼不彻底,汞的回收率低(低

	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean
汞含量(样品数 n=6)			
Mercury content	2.79	510	80.6
(Samples number n=6)			

于 50%);随着冶炼技术的持续更新进步,汞的回收率不断提高,可达 95%^[26]。

3.4 土壤中汞的形态分布特征

由表 4(Table 4)可见,土壤中总汞含量在 3.06~2.92×10³ mg·kg⁻¹,平均值为 322 mg·kg⁻¹,远高出国家土壤环境质量二级标准(GB 15618-1995)所规定的最大汞浓度负荷值 1.0 mg·kg⁻¹。矿区土壤总汞含量分布见图 4(Fig. 4),土壤总汞含量较高的采样点主要集中在汞矿坑附近,其空间分布差异较大。如表 5(Table 5)所示,与国内外其他汞矿区土壤汞含量相比,铜仁汞矿区土壤中的汞含量处于较高水平。土壤各形态汞占总汞的比例由大到小依次为:残渣态>有机结合态>>氧化态>特殊吸附态≈溶解态与可交换态。尽管溶解态与可交换态和特殊吸附态汞含量普遍较低,平均值为 0.024 mg·kg⁻¹,但是部分采样位点土壤中溶解态与可交换态和特殊吸附态含

量高达 1.24 mg·kg⁻¹,说明矿区土壤汞的形态分布在空间分布上是高度不均一的,其环境风险也不一样。因此,在开展汞污染土壤风险管控时,要充分考虑汞的空间分布引起的环境风险。

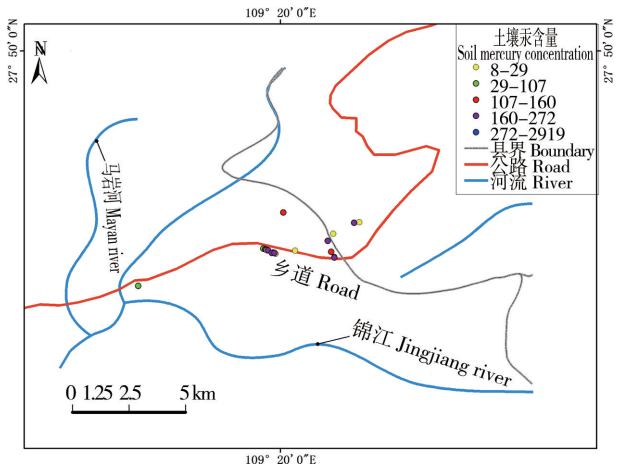


表 4 铜仁汞矿区土壤中不同形态汞的分布特征(单位:mg·kg⁻¹)

Table 4 The distribution of mercury speciation at Tongren Hg mining area (Unit: mg·kg ⁻¹)			
形态汞 Mercury speciation	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean
溶解态与可交换态			
Dissolved and exchangeable	0.0002 (0.0007%)	0.20 (0.026%)	0.02 (0.007%)
特殊吸附态	0.0002 (0.0008%)	1.24 (0.16%)	0.10 (0.029%)
Special adsorbed			
氧化态	0.0002 (0.002%)	9.18 (1.2%)	1.08 (0.34%)
Oxidation state			
有机结合态	0.047 (0.31%)	630 (59%)	108 (32%)
Bound to organic			
残渣态	2.32 (59%)	2.91×10 ³ (99%)	217 (65%)
Residual			
各形态汞之和			
Sum of different forms of mercury	3.06	2.92×10 ³	322
王水消解总汞			
Aqua regia digestion of total mercury	2.77	2.89×10 ³	287
回收率*	110%	101%	112%
Recovery rate			

注:()内表示形态汞占总汞比例; * 各形态汞之和含量/王水消解总汞含量。
Note:Percentage in () represents the proportion of different forms mercury/total mercury; * sum of different forms of mercury content / aqua regia digestion of total mercury content.

图 4 铜仁汞矿区土壤总汞含量分布
Fig. 4 The distribution of mercury concentrations of soils at Tongren Hg mining area

3.5 农作物的汞含量分布特征

由表 6(Table 6)可见,农作物样品中可食部分(水果蔬菜以鲜重计)汞含量为 2.41~95.4 μg·kg⁻¹,汞含量低于我国《食品安全国家标准》(GB2762-2012)的有茄子和南瓜,其余农作物均有不同程度的超标。

汞矿区由于汞污染相对较重,导致农作物汞含量普遍偏高。尽管在有些区域汞矿开采和冶炼活动已经停止,但是由于汞仍然在环境中循环(挥发-沉

表 5 国内外部分矿区土壤汞的含量
Table 5 The mercury content in the soils collected from some mercury mines in China and other countries

		土壤汞含量 (mg·kg ⁻¹)	参考文献
汞矿名称 Name of Hg mine	地理位置 Location	Soil mercury content (mg·kg ⁻¹)	References
务川汞矿 Wuchuan Hg mine	中国,贵州 Guizhou, China	5.1~790	[27]
万山汞矿 Wanshan Hg mine	中国,贵州 Guizhou, China	0.33~320	[28]
Nevada Hg mine	Nevada, USA	62~393	[29]
Mieres Hg mine	Asturias, Spain	1.7~472	[30]
Idrija Hg mine	Idrija, Slovenia	8.4~415	[31]

降-挥发)并在土壤中沉降,最终被作物(植物)富集。比如在斯洛文尼亚的伊德里亚汞矿, Miklav ĉi ĉ 等^[32]发现,即使汞矿闭坑达 15 年之久,在矿区采集的作物如茄子、辣椒、菊苣根和毛柄库恩菌等 24 种作物,其汞含量仍达 $215\sim 5.68\times 10^3\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,在汞矿区开展汞污染土壤修复工作,要充分考虑环境中汞的挥发-沉降引起的土壤二次污染并有可能导致作物中汞含量超标。

表 6 农作物可食部分汞的含量(单位: $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
Table 6 Mercury content in the
edible parts of the crops (Unit: $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

农作物 Corp	干重/湿重 Dry weight / wet weight	样品数 Sample	最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean
玉米 <i>Zea mays</i> L	干重 Dry weight	5	2.9	40.7	22.4
高粱 <i>Sorghum</i>	干重 Dry weight	3	3.3	71.0	34.2
枣 <i>Jujube</i>	鲜重 Wet weight	3	17.8	64. 7	45.3
梨 <i>Pear</i>	鲜重 Wet weight	3	4.1	73.4	35.6
茄子 <i>Eggplant</i>	鲜重 Wet weight	3	2.7	6.4	4.20
丝瓜 <i>Loofah</i>	鲜重 Wet weight	3	2.9	37.5	25.5
西红柿 <i>Tomato</i>	鲜重 Wet weight	5	5.6	19.9	12.8
南瓜 <i>Pumpkin</i>	鲜重 Wet weight	3	2.4	6.4	4.6
苦瓜 <i>Balsam pear</i>	鲜重 Wet weight	4	11.8	95.4	50.7
辣椒 <i>Chili</i>	鲜重 Wet weight	4	5.5	25.5	15.4

致谢:感谢张鹏和查磊同学在野外采样过程中给予的帮助。

通讯作者简介:冯新斌(1968-),男,地球化学博士,研究员,主要研究方向为环境地球化学。

参考文献 (References):

[1] 黄健琴. 贵州万山汞矿开采史[J]. 东方企业文化, 2012, 6: 148.
Huang J Q. Wanshan mercury mining history, Guizhou province [J]. Oriental Enterprise Culture, 2012, 6: 148 (in

Chinese)
[2] 丁振华, 王文华, 瞿丽雅, 等. 贵州万山汞矿区汞的环境污染及对生态系统的影响[J]. 环境科学, 2004, 25(2): 111-114
Ding Z H, Wang W H, Qu L Y, et al. Mercury pollution and its ecosystem effects in Wanshan mercury miner area, Guizhou [J]. Environmental Science, 2004, 25(2): 111-114 (in Chinese)
[3] 王建旭, 冯新斌, Chris W N A. 贵州万山汞矿区汞污染土壤植物修复技术研究[C]. 全国环境化学大会暨环境科学仪器与分析仪器展览会, 2011
Wang J X, Feng X B, Chris W N A. Phytoremediation of mercury contaminated soil at Wanshan mercury mine[C]. National Conference on Environmental Chemistry, 2011 (in Chinese)
[4] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州滥木厂汞矿区土壤与大气间气态汞交换通量及影响因素研究[J]. 地球化学, 2004, 33(4): 405-413
Wang S F, Feng X B, Qiu G L, et al. Research of the fluxes and impact factors of gaseous mercury exchange between the soil and the atmosphere in Lanmuchang mercury area, Guizhou. [J]. Geochemistry, 2004, 33(4): 405-413 (in Chinese)
[5] 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 等. 贵州汞矿矿区不同位置土壤中总汞和甲基汞污染特征的研究[J]. 环境科学, 2006, 27(3): 550-555
Qiu G L, Feng X B, Wang S F, et al. Total mercury and methylmercury in soils collected from Guizhou Hg-mined areas [J]. Environmental Science, 2006, 27(3): 550-555 (in Chinese)
[6] 李平, 冯新斌, 仇广乐, 等. 贵州省务川汞矿区土法炼汞过程中汞释放量的估算[J]. 环境科学, 2006, 27(5): 837-840
Li P, Feng X B, Qiu G L, et al. Mercury emission from the indigenous method of mercury smelting in Wuchuan mercury mining mreas, Guizhou province [J]. Environmental Science, 2006, 27(5): 837-840 (in Chinese)
[7] 孙雪城, 王建旭, 冯新斌. 贵州丹寨金汞矿区尾渣和水土中汞砷分布特征及潜在风险[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(6): 1173-1180
Sun X C, Wang J X, Feng X B. Distribution and potential environmental risk of mercury and arsenic in slag, soil and water of Danzhai mercury mining area, Guizhou province, [J]. China Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(6): 1173-1180 (in Chinese)
[8] 刘荣相, 王智慧, 张朝晖. 苔藓植物对贵州丹寨汞矿区汞污染的生态监测[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1558-1566

- Liu R X, Wang Z H, Zhang Z H. Ecological monitoring of bryophytes for mercury pollution in Danzhai mercury mine area, Guizhou province, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1558-1566 (in Chinese)
- [9] 李永华, 孙宏飞, 杨林生, 等. 湖南凤凰茶田汞矿区土壤-水稻系统中汞的传输及其健康风险[J]. *地理研究*, 2012, 31(1): 63-70
- Li Y H, Sun H F, Yang L S, et al. Transmission and health risks of mercury in soil-paddy system in Chatian mercury mining area, Fenghuang county, Hunan province [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(1): 63-70 (in Chinese)
- [10] 张龙, 林先辉, 刘俏, 等. 秀山汞矿开采对当地水土环境的影响[J]. *西南师范大学学报: 自然科学版*, 2011, 33(6): 105-109
- Zhang L, Lin X H, Liu Q, et al. Effects of mercury mine exploitation on local soil and water environment in Xiushan [J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science*, 2011, 33(6): 105-109 (in Chinese)
- [11] 徐平平. 汞矿区汞污染的环境风险评价研究[D]. 山东师范大学, 2013
- Xu P P. Risk assessment of mercury contamination in mercury mining area [D]. Shandong Normal University, 2013 (in Chinese)
- [12] 阎海鱼, 冯新斌, 商立海, 等. 天然水体中痕量汞的形态分析方法研究[J]. *分析测试学报*, 2003, 22(5): 10-13
- Yan H Y, Feng X B, Shang L H, et al. Speciation analysis of ultra-trace levels of mercury in natural waters [J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2003, 22(5): 10-13 (in Chinese)
- [13] 包正铎, 王建旭, 冯新斌, 等. 贵州万山汞矿区污染土壤中汞的形态分布特征[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(5): 907-913
- Bao Z D, Wang J X, Feng X B, et al. Distribution of mercury speciation in polluted soils of Wanshan mercury mining area in Guizhou [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(5): 907-913 (in Chinese)
- [14] Lindberg S, Bullock R, Ebinghaus R, et al. A synthesis of progress and uncertainties in attributing the sources of mercury in deposition [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, 36(1): 19-33
- [15] Zhu J, Wang T, Talbot R, et al. Characteristics of atmospheric total gaseous mercury (TGM) observed in urban Nanjing, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, 12(24): 12103-12118
- [16] Li P, Feng X, Qiu G, et al. Mercury pollution in Wuchuan mercury mining area, Guizhou, Southwestern China: the impacts from large scale and artisanal mercury mining [J]. *Environment International*, 2012, 42(4): 59 - 66
- [17] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 等. 万山汞矿区地表与大气界面间汞交换通量研究[J]. *环境科学*, 2006, 27: 1487-1494
- Wang S F, Feng X B, Qiu G L, et al. Mercury exchange fluxes between air and soil interface over different type of land in Wanshan Hg mine area [J]. *Environmental Science*, 2006, 27: 1487-1494 (in Chinese)
- [18] Gustin M S, Taylor G E, Leonard T L, et al. Atmospheric mercury concentrations associated with geologically and anthropogenically enriched sites in central western Nevada [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, 30(8): 2572-2579
- [19] Maramba N P C, Reyes J P, Francisco-Rivera A T, et al. Environmental and human exposure assessment monitoring of communities near an abandoned mercury mine in the Philippines: A toxic legacy [J]. *Journal of Environmental Management*, 2006, 81(2): 135 - 145
- [20] Antonio Garcia-Sanchez, Felicia Contreras, Meliton Adams, et al. Airborne total gaseous mercury and exposure in a Venezuelan mining area [J]. *International Journal of Environmental Health Research*, 2006, 16(5): 361-373
- [21] Rimondi V, Gray J E, Costagliola P, et al. Concentration, distribution, and translocation of mercury and methylmercury in mine-waste, sediment, soil, water, and fish collected near the Abbadia San Salvatore mercury mine, Monte Amiata district, Italy [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 414(1): 318 - 327
- [22] 何天容, 冯新斌, 郭艳娜, 等. 红枫湖水体中活性汞和溶解气态汞的分布特征及其控制因素[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(2): 14-17
- He T R, Feng X B, Guo Y N, et al. Distributions of reactive and dissolved gaseous mercury and controlling factors in Hongfeng reservoir [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(2): 14-17 (in Chinese)
- [23] 李平, 冯新斌, 仇广乐. 贵州省务川汞矿区汞污染的初步研究[J]. *环境化学*, 2008, 27(1): 96-99
- Li P, Feng X B, Qiu G L. The preliminary study of mercury pollution in Wuchang mercury mining area, Guizhou province [J]. *Environmental Chemistry*, 2008, 27(1): 96-99 (in Chinese)
- [24] 冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. *化学进展*, 2009(Z1): 436-457
- Feng X B, Qiu G L, Fu X W, et al. Mercury pollution in the environment [J]. *Progress in Chemistry*, 2009 (Z1): 436-457 (in Chinese)
- [25] Teršič T, Gosar M, Biester H. Distribution and speciation of mercury in soil in the area of an ancient mercury ore

- roasting site, Frbejžene trate (Idrija area, Slovenia) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 110(2): 136-145
- [26] 仇广乐. 贵州省典型汞矿地区汞的环境地球化学研究 [D]. 贵州: 中国科学院地球化学研究所, 2005
- Qiu G L. Environmental geochemistry of mercury in typical Hg-mined area, Guizhou Province [D]. Guizhou: Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, 2005 (in Chinese)
- [27] Qiu G, Feng X, Wang S, et al. Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan, northeastern Guizhou, China [J]. *Environmental Pollution*, 2006, 142(3): 549 - 558
- [28] Qiu G, Feng X, Wang S, et al. Mercury and methylmercury in riparian soil, sediments, mine-waste calcines, and moss from abandoned Hg mines in east Guizhou province, southwestern China [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, 20(3): 627 - 638
- [29] Boszke L, Kowalski A, Astel A, et al. Mercury mobility and bioavailability in soil from contaminated area [J]. *Environmental Geology*, 2008, 55(5): 1075-1087
- [30] Loredo J, Ordonez A, Gallego J R, et al. Geochemical characterisation of mercury mining spoil heaps in the area of Mieres (Asturias, northern Spain) [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 67(1): 377-390
- [31] David K, Milena H, Joze K. Mercury fractionation in contaminated soils from the Idrija mercury mine region [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, 6(8): 696-703
- [32] Miklav čič A, Mazej D, Ja čimovi č R, et al. Mercury in food items from the Idrija Mercury Mine area [J]. *Environmental Research*, 2013, 125: 61 - 68 ◆