

李强, 郭飞, 莫测辉, 赵鑫, 张瑞卿, 廖海清. 贵州省环境中汞污染现状与分布特征[J]. 生态科学, 2013, 32(2): 235-240.
LI Qiang, GUO Fei, MO Ce-hui, ZHAO Xin, ZHANG Rui-qing, LIAO Hai-qing. A study of distribution of environmental mercury in Guizhou Province[J]. *Ecological Science*, 2013, 32(2): 235-240.

贵州省环境中汞污染现状与分布特征

李强^{1,2}, 郭飞², 莫测辉¹, 赵鑫², 张瑞卿³, 廖海清^{2*}

1. 暨南大学环境工程系, 广州 510632
2. 中国环境科学研究院, 北京 100012
3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

【摘要】 贵州是我国汞矿的主要产地, 其储量和产量均居全国首位, 因此造成了该区域环境受到广泛的汞污染。从大的区域尺度上研究汞的污染分布特征对于了解该区域汞的污染现状有很好的指导作用。通过对贵州省汞污染源及各环境介质中汞污染情况的调查, 首先阐释了万山、务川、滥木厂等几个主要汞矿区及燃煤和有机化工等行业的汞污染现状; 并从大气、土壤和水体等环境介质方面综合分析了贵州地区汞的暴露水平与分布特征; 采用 ArcGIS 10.0 描绘了各环境介质中总汞及甲基汞的分布特征。结果表明贵州省东北部与西南部汞矿区汞污染程度较高, 大气、土壤和水体中的总汞分布呈明显的区域性, 汞矿毗邻区域明显高于其他区域, 矿区和城镇水体中甲基汞浓度较高, 表明汞矿区和人为活动等因素影响水体中的甲基汞的分布。

关键词: 贵州省; 汞; 污染现状; 分布特征

doi:10.3969/j.issn.1008-8873.2013.02.017 中图分类号: X50 文献标识码: A 文章编号: 1008-8873(2013)02-235-06

A study of distribution of environmental mercury in Guizhou Province

LI Qiang^{1,2}, GUO Fei², MO Ce-hui¹, ZHAO Xin², ZHANG Rui-qing³, LIAO Hai-qing²

1. Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China
2. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China
3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

Abstract: Guizhou is the greatest mercury (Hg) production center in China, and it's also the most serious Hg pollution area. Hg pollution study in a large regional scale was necessary. Through the investigation of Hg pollution source and environmental media in Guizhou, the Hg pollution in Wanshan, Wuchuan and Lanmuchang Hg mining areas, coal combustion and organic chemical plants was interpreted, and the distribution of Hg and methylmercury (MeHg) in atmosphere, water and soils was presented by ArcGIS software to illustrate the pollution of Hg in Guizhou Province. The results showed that serious mercury pollution was appeared in those Hg mining areas located in the Northeast and Southwest of Guizhou Province. It is obvious that the total Hg concentrations in contaminated sites were regionally higher than other places. High MeHg concentrations were presented in urban rivers as well as waters close to mining areas, indicating that the distribution of MeHg in waters should be related to the mining and human living.

Key words: Guizhou province; Hg; pollution; distribution

收稿日期: 2012-12-24 收稿, 2013-03-20 接受

基金项目: 国家水体污染控制与治理重大专项(2010ZX07212-007-001)

作者简介: 李强(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为重金属污染控制

*通讯作者: 廖海清, 副研究员, E-mail:liahq@craes.org.cn.

1 引言(introduction)

汞是一种毒性较强的金属元素,对环境的危害较大,已经被很多国际机构列为优先污染物。人类对矿产资源的开发与利用,使得环境中的汞含量急剧增加。自工业革命以来,汞在全球大气、水和土壤中的含量已增加了3倍左右^[1]。上世纪,全球出现多次汞污染事件,1956年日本熊本县水俣湾爆发的水俣病事件,约有60人在该事件中丧生,1972年,在伊拉克,由于汞污染事件造成了459人死亡^[2]。这一系列汞污染事件给人类和生态环境带来了巨大的危害,汞的相关研究因此受到社会各界的广泛关注。通过近50多年的研究,研发了一系列汞污染防治技术^[3,4]。

我国有非常丰富的汞矿资源,已探明的金属汞储量有 1.438×10^5 t,居世界第3位^[5]。其中,以贵州省为最多,其储量为全国汞储量的40%,辰砂储量约 8.81×10^4 t,占全国总储量的70%,成型的汞矿床有64个,其中大型矿床占76%^[6]。贵州已有上千年的汞冶炼历史,由于采矿和冶炼工艺简单,环境治理措施落后,造成大量采矿废石和冶炼矿渣直接暴露于环境中,造成严重的环境污染。此外,贵州煤炭、铅锌及有机化工等工业也是造成汞污染的重要因素^[7-9]。

前人已针对贵州省的汞污染状况,开展了大量汞矿区污染现状和生物暴露水平等研究。已有的文献集中于报道贵州局部地区土壤、大气、水体的汞暴露水平,笔者从全局角度出发,在前人研究的基础上,对比分析主要污染场地与其他地区汞的分布差异特征,综合分析贵州省大气、土壤、水体的汞暴露水平及成因,阐释各环境介质中汞与甲基汞的分布特征与区域差异,有利于宏观掌握贵州省汞污染状况与分布特征,可为贵州省汞污染防治规划制定提供科学依据。

2 污染场地现状(Contaminated sites status)

贵州省的汞污染场地多、类型全,且产生量大、环境管理无序化。其中汞产量较大的矿区有万山汞矿、务川汞矿和滥木厂工矿三个,目前这些汞矿区的采矿场已基本关闭,矿区汞开采冶炼遗留的尾矿堆或尾矿坝是主要的汞二次污染源。此外,贵州省有机化工厂和燃煤引起的水体和大气汞污染排放也

是引起贵州省汞污染的重要因素。

2.1 万山汞矿

万山汞矿是世界第三大汞矿,也是中国最大的汞矿,其辰砂储量占贵州省总量的70%。1950至1990年,万山生产的汞共有 1.84×10^4 t,朱砂 1.54×10^3 t^[12]。选矿工艺流程包括两段碎矿、重选和浮选,可同时生产朱砂和汞精矿两种产品。汞冶炼经历了两个阶段,早期采用高炉和沸腾炉,后期改用蒸馏炉,开采和冶炼后的尾矿和废渣中的汞主要以辰砂形态存在。据统计,万山汞矿自开采以来,通过大气排放的汞是745 t,从废水排放到环境中的汞约40 t,以开采和冶炼造成的尾矿和废渣中约有汞450 t^[13],大量汞排放对生态系统及人体健康造成了巨大威胁。研究^[12,14]表明,万山汞矿开采和冶炼废水中的汞含量范围为8~4 900 ng/mL,平均含量为1 300 ng/mL;矿区土壤汞含量为24.31~347.52 mg/kg,高出全国土壤平均汞含量2~3个数量级。

2.2 务川汞矿

务川县也有丰富的汞矿资源,储量约 2.3×10^4 t,占贵州总储量的28%^[15]。务川汞矿有大约400年开采历史,1970年投产,处理单一辰砂型汞砂。选矿流程由两段开路碎矿,一段闭路磨矿,单一浮选工艺构成,产品为辰砂精矿。罗溪和老虎沟是主要的开采区,据估计,三废中汞的排放量达185 t^[16]。目前,务川县还有一些土法炼汞厂在开采,由于土法炼汞工艺简单,且没有任何环境保护措施,汞释放因子为6.9%~32.1%,年产汞量为31.2~37.1 t,每年的汞释放量高达3.7~9.6 t^[15],自1978年务川土法炼汞盛行以来,至今已累积向大气释放汞125.8~326.4 t。

2.3 滥木厂汞矿

滥木厂汞矿位于贵州西南部,主要含汞矿物为辰砂,探明汞储量 3.14×10^3 t^[17]。该汞矿区汞的环境迁移受人类活动的影响较小,汞进入环境主要是通过富汞土壤对汞的释放以及地表径流对于富汞基岩的侵蚀^[17]。由于土壤中汞的释放,使得该地区气态总汞浓度高于北欧和北美背景浓度2-3个数量级,每年向环境中的释放量通过估算大约是3.54 kg^[18]。

2.4 煤炭燃烧

贵州是主要的煤炭生产基地,也是主要的消费者。大约 80% 的能源消费量的是来自煤炭燃烧^[19]。因工业和生活用途,每年燃烧的煤炭超过 5×10^5 t,并且大部分煤都未使用清洗或烟气控制。据报道,贵州煤炭中汞的含量大约是 $0.1 \sim 2.67$ mg/kg,平均浓度 0.53 mg/kg^[20]。由于特殊的地球化学背景,贵州煤炭中的汞浓度与中国其他省份相比是偏高的。随着经济的发展和火力发电需求的增加,煤炭的使用量也在不断增加。据估算,煤燃烧释放的气态总汞量从 1986 年的 5.8 t 增加到 2006 年的 26.4 t^[8]。

2.5 有机化工行业

贵州有机化工总厂位于清镇市郊 5 km 处,所采用是醋酸生产工艺,该工艺采用硫酸汞为触媒,生产的废水中含有一定量汞。该厂自 1971 年投产以来,已累计消耗金属汞 106 t^[21]。1985 年之前,该厂含汞废水直接排放,1985 年后,该厂使用自行研制的 FT 除汞装置,废水中汞的浓度有所降低。1971~1997 年间,约 5 t 汞随废水排放进入百花湖,导致百花湖沉积物和水体受到严重污染^[22]。瞿丽雅等通过对周边环境调查,发现该厂的排污口废水中汞浓度高达 2 $\mu\text{g/L}$,底泥汞浓度高达 324.54 mg/kg^[7]。

3 贵州省汞污染现状与成因剖析(Mercury pollution and causes in Guizhou Province)

本文汇集了贵州地区大气、土壤和水体中总汞和甲基汞的浓度数据。应用地理信息系统软件 ArcGIS 10.0,采用克里金插值法绘制各环境介质中总汞和甲基汞的分布图,宏观阐释汞污染现状,并探讨其成因。

3.1 大气污染

本文汇集了 27 个大气样点的数据,分布在贵阳市(3 个样点)、遵义市(2 个样点)、凯里市(2 个样点),万山汞矿区(2 个样点)、务川汞矿区(9 个样点)和滥木厂汞矿区(5 个样点),雷公山和梵净山自然保护区(2 个样点)。

贵州省大气汞的区域性差异非常显著(图 1),贵州万山、务川、滥木厂等汞矿区附近大气汞含量为 $19.5 \sim 528.2$ ng/m³,贵阳、遵义和凯里等非矿区大气汞含量为 $4.1 \sim 12.2$ ng/m³。大气中总汞分布呈

现明显的区域性差异,矿区附近大气汞含量显著高于其他区域。矿区大气中汞含量高的原因有几个方面:汞矿开采与冶炼过程的含汞废气释放;废渣风化过程导致汞通过固-气交换作用进入大气;汞矿区高背景土壤中汞释放^[18]。

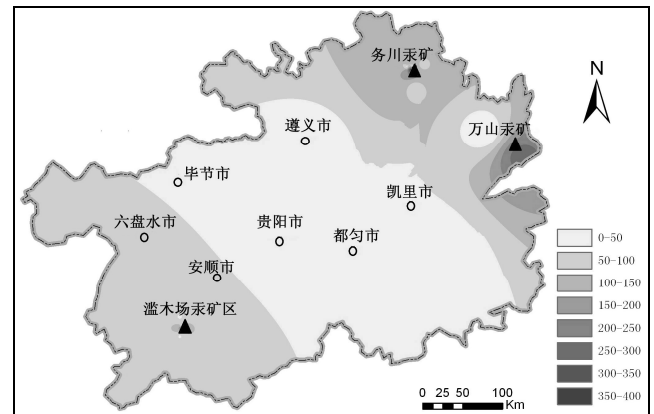


图 1 贵州省大气中总汞的区域分布特征^[18,19,23-26]

Fig. 1 Distribution of total Hg in atmosphere in Guizhou Province

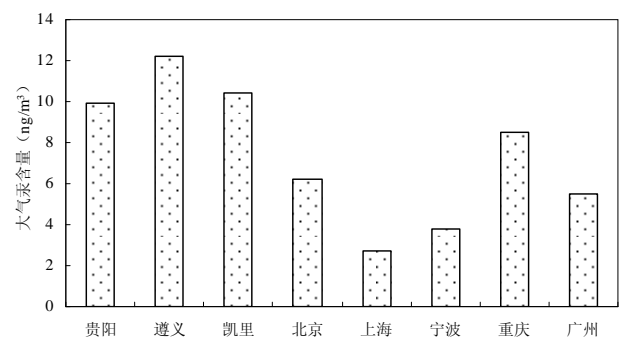


图 2 我国主要城市大气中汞含量^[27-29,36,37]

Fig. 2 Atmospheric Hg concentrations in major cities in China

本文比较了贵州和其他地区大气中汞污染水平。上海、宁波等地虽然受煤炭燃烧等人为污染的影响,大气总汞含量不高,主要可能受相对干净的海洋性气团影响^[28,36]。重庆大气汞含量较高的主要原因是机动车排放和煤炭燃烧等工业源^[37],贵州省万山和务川汞矿区气态汞迁移也可能造成重庆大气中总汞偏高。我国其他城市大气中汞含量明显低于贵州省汞污染相对较低的城市,如贵阳、遵义和凯里等,表明贵州大气汞污染程度明显比其他地区严重。

3.2 土壤污染

贵州省土壤总汞和甲基汞含量分布(图 3,图 4),

汇集了该地区 44 个土壤点的总汞数据, 19 个土壤点的甲基汞数据。分布在万山汞矿区 (10 个样点)、务川矿区 (21 个样点)、滥木厂矿区 (5 个样点) 三个汞矿区, 烂泥沟和水银洞两个金矿区 (2 个样点), 威宁和赫章县居民区 (2 个样点) 及有机化工厂周边区域 (4 个样点)。

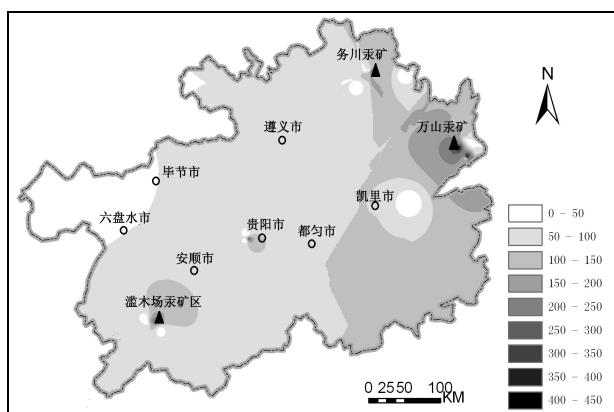


图 3 贵州省土壤中总汞的区域分布图^[30-34]

Fig. 3 Distribution of total Hg in soils in Guizhou Province

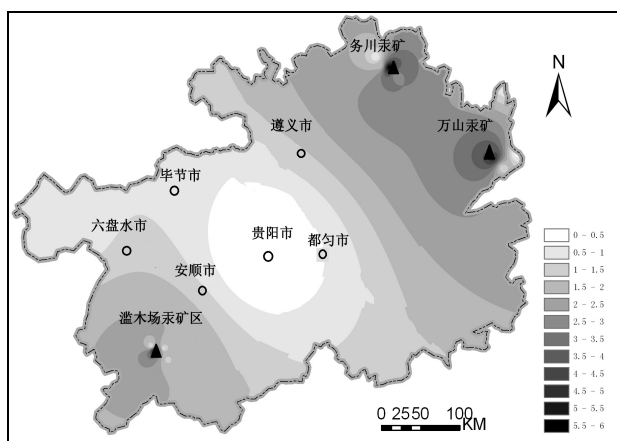


图 4 贵州省土壤中甲基汞的区域分布图^[30-33]

Fig. 4 Distribution of MeHg in soils in Guizhou Province

万山矿区土壤总汞的含量为 12.12~447 mg/kg, 甲基汞含量为 0.00265~5.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 务川汞矿区总汞含量为 2.9~360 mg/kg, 甲基汞含量为 1.6~5.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 滥木厂汞矿区土壤总汞含量为 8.97~237 mg/kg, 甲基汞含量为 1.36~5 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 有机化工厂附近土壤总汞含量为 0.25~289 mg/kg, 甲基汞含量为 0.00177~0.032 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 其他区域汞含量为 0.076~17 mg/kg, 甲基汞含量为 0.33~0.81 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。土壤中总汞和甲基汞的区域性差异也比较明显, 汞矿区和有机化工厂附近土壤总汞含量显著高于其他

区域 (图 3), 这可能与汞的迁移有关, 含汞废渣在地表应力的作用下发生地球化学迁移, 造成矿区土壤汞含量偏高。矿区土壤中的甲基汞含量也高于其他区域, 但是有机化工厂附近土壤甲基汞含量明显低于其他区域 (图 4)。有机化工厂附近土壤由于受到化工厂污水排放的影响, 致其土壤中的汞含量增高; 由于有机化工厂排放的污水中甲基汞含量较低, 所以, 其周边土壤中甲基汞浓度相对较低。

3.3 水体污染

贵州省地表水体总汞和甲基汞含量分布 (图 5, 图 6), 汇集了该地区湖泊、水库、河流等 19 组总汞数据, 15 组甲基汞数据。其中的河流-下溪河、敖寨河、高楼坪河和黄道河的源头都位于万山矿区, 选取的是丰水期各河流溪、池、直流、引流等的总汞和甲基汞均值, 其中高楼坪河包括地下水的污染数据。

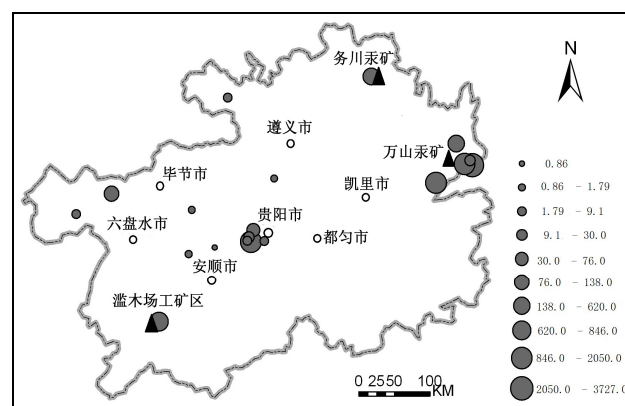


图 5 贵州省水体中总汞的区域分布图^[10,11,32-35]

Fig. 5 Distribution of total Hg in waters in Guizhou Province

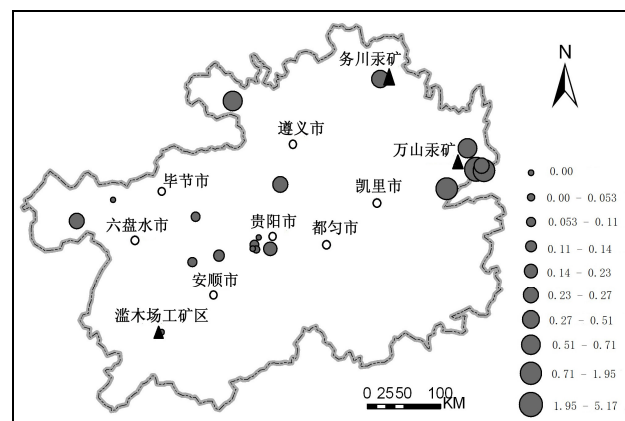


图 6 贵州省水体中甲基汞的区域分布图^[10,11,34,35]

Fig. 6 Distribution of MeHg in soils in Guizhou Province

万山汞矿区河流总汞为 27.85~3 727 ng/L, 甲基汞含量为 0.27~5.17 ng/L; 务川矿区地表水总汞为 620 ng/L, 甲基汞含量为 0.51 ng/L; 滥木厂地表水总汞含量为 846 ng/L; 化工厂污染区水体 30~1 830 ng/L, 甲基汞含量为 0.053~0.094 ng/L; 其他区域总汞含量为 0.86~138 ng/L, 甲基汞含量为 0.1~0.65 ng/L。水体中总汞含量分布呈现明显的区域性差异, 万山、务川和滥木厂矿区地表水和化工厂污染区水体总汞含量远远高于其他区域(图 5)。

水体中甲基汞含量的区域性差异不明显(图 6), 主要污染区水体及城镇水体中甲基汞含量也较高, 但是有机化工厂区水体明显低于其他区域, 进一步表明有机化工产生的废水中甲基汞含量较低。此外, 矿区颗粒态汞占总汞的比例很高, 说明矿区地表水中大部分汞以颗粒态形式吸附在悬浮物上。

万山、务川、滥木厂等汞矿区和化工厂区水体中总汞远高于背景值, 附近水体中大部分超过了饮用水标准。除有机化工厂附近水体外, 其他水体中甲基汞远高于标准值, 说明汞的开采冶炼活动对矿区地表水造成了严重的汞污染, 化工厂排出的含汞废水流经周边河流和湖泊, 也给当地环境造成了汞污染。

4 结论(Conclusions)

大气、土壤和水体中总汞分布呈现明显的区域性, 汞矿毗邻区域明显高于其他区域; 矿区和城镇水体中甲基汞浓度较高, 表明汞矿区和人为活动等因素影响水体中甲基汞分布。贵州省大气、水体、土壤中总汞及甲基汞含量均高于其他地区, 且矿区和有机化工厂区等污染场地的含汞固体废弃物已通过大气水体等环境介质发生迁移, 造成二次污染, 且污染程度有可能加剧, 采取有效措施控汞污染已迫在眉睫。

参考文献 (References)

- [1] 于建国. 我国汞污染防治现状和发展趋势[J]. 化学工业, 2010, 28(2-3): 40-42.
- [2] Bakir F, Damluji S F, Amin-zaki L, Murtadha M, Khalidi A, al-Rawi N Y, Tikriti S, Dahahir H I, Clarkson T W, Smith J C, Doherty R A. Methylmercury poisoning in Iraq[J]. *Science*, 1973, 181(4096): 230-241.
- [3] Hylander L D. Global mercury pollution and its expected decrease after a mercury trade ban[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 125(1): 331-344.
- [4] US Environmental Protection Agency. Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers [R]. Washington D C: USEPA, 2002: 1-15.
- [5] 杨海, 李平, 仇广乐, 冯新斌. 世界汞矿地区汞污染研究进展[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 80-85.
- [6] 戴智慧, 冯新斌, 李平, 仇广乐, 商立海. 贵州万山汞矿区自然土壤汞污染特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 902-906.
- [7] 瞿丽雅. 贵州有机化工厂的汞污染及对环境的影响[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 1999, 17(3): 25-29.
- [8] Tang S L, Feng X B, Qiu J R, Yin G X, Yang Z C. Mercury speciation and emissions from coal combustion in Guiyang, southwest China[J]. *Environment Research*, 2007, 105(2): 175-182.
- [9] Feng X B, Li G H, Qiu G L. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang country, Guizhou, China—Part1: mercury emission from zinc smelting and its influences on the surface waters[J]. *Atmosphere Environment*, 2004, 38(36): 6223-6230.
- [10] Feng X B, Jiang H M, Qiu G L, Yan H Y, Li G H, Li Z G. Mercury mass balance study in Wujiangdu and Dongfeng Reservoir, Guizhou, China[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(10): 2594-2603.
- [11] Zhang J F, Feng X B, Yan H Y, Guo Y N, Yao H, Meng B, Liu K. Seasonal distributions of mercury species and their relationship to some physicochemical factors in Puding Reservoir, Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 408(1): 122-129.
- [12] 丁振华, 王文华, 瞿丽雅, 汤庆合, 刘彩娥, 程金平, 胡卫莹. 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(1): 111-114.
- [13] 赵训. 万山汞矿区环境污染及其防治对策[J]. 采矿技术, 2010, 10(1): 52-54.
- [14] Zheng W, Kang S C, Feng X B, Zhang Q G, Li C L. Mercury speciation and spatial distribution in surface waters of the Yarlung Zangbo River, Tibet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(24): 2697-2703.
- [15] 李平, 冯新斌, 仇广乐, 王少锋. 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.
- [16] Qiu G L, Feng X B, Wang S, Shang L. Environmental contamination of mercury from Hg-mining areas in Wuchuan, northeast Guizhou, China[J]. *Environment Pollution*, 2006, 142(3): 549-558.
- [17] 王少锋, 冯新斌, 仇广乐, 肖唐付. 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.
- [18] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, Wei Z Q, Xiao T F. Mercury emission to atmosphere from Lanmuchang Hg-Tl mining area Southwestem Guizhou,China[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, 39(39): 7459-7473.
- [19] Tan H, He J L, Liang L, Lazoff S, Sommer J, Xiao Z F, Lindqvist O. Atmospheric mercury deposition in Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 259(1-3): 223-230.
- [20] Feng X B, Sommar J, Lindqvist O, Hong Y T. Occurrence, emissions and deposition of mercury during coal combustion in Guizhou province, China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2002, 139(1-4):311-324.
- [21] 侯亚敏, 冯新斌, 仇广乐, 阎海鱼. 贵州百花湖表层水中不同形态汞的分布规律[J]. 湖泊科学, 2004, 16(2): 125-132.
- [22] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 商立海, 李仲根, 李广辉. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1357- 1361.
- [23] 何锦林, 谭红, 赵亚民, 姚松林. 贵州梵净山自然保护区大气汞的沉降[J]. 环境科学学报, 1999, 19(2): 164-169.
- [24] Wang S F, Feng X B, Qiu G L, Shang L H, Li P, Wei Z Q. Mercury concentrations and air/soil fluxes in Wuchuan mercury mining district, Guizhou province, China[J]. *Atm-ospheeric Environment*, 2007, 41(28): 5984-5993.
- [25] Liu N, Qiu G, Landis M S, Feng X B, Fu X W, Shang L H. Atmospheric mercury species measured in Guiyang, Guizhou province, southwest China[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 100(1): 93-102.
- [26] Feng X B, Yan H Y, Wang S F, Qiu G L, Tang S L, Shang L H, Dai Q J, Hou Y M. Seasonal variation of gaseous mercury exchange rate between air and water surface over Baihua reservoir, Guizhou, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2004, 38(28): 4721-4732.
- [27] Friedli H R, Arellano A F, Geng F, Cai C, Pan L. Measurements of atmospheric mercury in Shanghai during September 2009[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, 11(8): 3781-3788.
- [28] Nguyen D L, Kim J Y, Shim S G, Zhang X S. Ground and shipboard measurements of atmospheric gaseous elemental mercury over the Yellow Sea region during 2007–2008[J]. *Atmosphere Environment*, 2011, 45(1): 253-260.
- [29] Fang F M, Wang Q C, Li J F. Urban environmental mercury in Changchun, a metropolitan city in Northeastern China:source, cycleand fate[J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 330(1-3): 159-170.
- [30] Horvat M, Nolde N, Fajon V, Jereb V, Logar M, Lojen S, Jacimovic R, Falnoga I, Qiu L Y, Faganeli J, Drobnic D. Total mercury, methylmercury and selenium in mercury polluted areas in the province Guizhou, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 304(1-3): 231-256.
- [31] Feng X B, Li G H, Qiu G L. A preliminary study on mercury contamination to the environment from artisanal zinc smelting using indigenous methods in Hezhang County, Guizhou, China: Part 2. Mercury contaminations to soil and crop[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 47-55.
- [32] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, Xiao T F. Mercury contaminations from historic mining to water, soil and vegetation in Lanmuchang, Guizhou, southwestern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 368(1): 56-68.
- [33] 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 商立海. 贵州汞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.
- [34] 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.
- [35] Qiu G L, Feng X B, Wang S F, Fu X W, Shang L H. Mercury distribution and speciation in water and fish from abandoned Hg mines in Wanshan, Guizhou province, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(18): 5162-5168.
- [36] Xiu G L, Cai J, Zhang W Y, Zhang D N, Bueler A, Lee S C, Shen Y, Xu L H, Huang X J, Zhang P. Speciated mercury in size-fractionated particles in Shanghai ambient air[J]. *Atm-ospheeric Environment*, 2009, 43(19): 3145-3154.
- [37] Yang Y K, Chen H, Wang D Y. Spatial and temporal distribution of gaseous elemental mercury in Chongqing, China[J]. *Environment Monitoring and Assessment*, 2009, 156(1-4):479-489.