

贵州省万山汞矿区周围土壤中不同形态汞的空间分布特征

曾昭婵¹, 黄 艺², 吴 攀^{1*}, 谢欢欢¹

(1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550003; 2. 贵州省国土资源厅, 贵阳 550003)

摘 要: 利用连续提取法对贵州省万山汞矿区周边土壤的形态与分布特征进行了测试分析。结果表明, 研究区土壤中汞含量在 1.34~291.71 mg·kg⁻¹ 之间, 明显高于我国土壤汞背景值。表层土壤中汞含量在东部区域普遍较高, 西部区域相对较低, 并呈现随距污染源距离的增加逐渐降低的趋势。剖面土壤中的汞则表现出明显的表层富集规律。研究区土壤中汞的形态主要以残渣态、难氧化降解有机质及某些硫化物结合态和易氧化降解有机质结合态汞为主, 且不同形态的汞含量与总汞含量具有较大的相关性。

关键词: 万山特区; 土壤; 汞; 形态; 空间分布

中图分类号: X833 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)05-0949-08

The Spatial Distribution Characteristics of Mercury Speciation in Soil of Wanshan Mercury Mining Area Guizhou Province, China

ZENG Zhao-chen¹, HUANG Yi², WU Pan^{1*}, XIE Huan-huan¹

(1. College of Natural Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China; 2. Department of Land and Resources of Guizhou Province, Guiyang 550003, China)

Abstract: The Hg speciation in soil was analyzed using sequential extraction method to study its spatial distributions in Wanshan mercury mining area in Guizhou, China. It was found that the content of Hg in the soil of the study area ranged 1.34~291.71 mg·kg⁻¹, which was higher than the soil background values in China. The content of Hg in the topsoil was higher in the east part of the study area in the west part, and decreased with mainly enriched in the topsoil as the forms of residue, non-biodegradable organic matter, sulfide and biodegradable organic matter. The content of each speciation had significant correlation with the total Hg in the soils.

Keywords: Wanshan district; soil; mercury; form; spatial distribution

随着人类对汞矿资源需求量的日益增大, 造成汞不断在环境中的释放迁移, 并有向生物体富集的趋势^[1-2]。汞作为人体非必需元素, 极大危害人体健康, 引起了世界性广泛关注^[3-7]。国内外主要集中研究了大气、水体及土壤中总汞含量、迁移特征及其毒理机制等, 并发现不同形态汞的生物可利用性及其毒性差异显著^[8-9]。然而, 目前有关报道形态汞及其迁移分布规律的研究成果尚少。万山汞矿区位于贵州省东部武陵山区, 气候温润, 广泛种植水稻。有“汞都”之称的贵州

万山汞矿, 已有 600 多年开采历史, 促进经济发展的同时, 对环境也造成了潜在的危害^[4-5, 10]。据记载, 1950 至 1980 年, 该矿区汞矿产量约 800 t·a⁻¹, 冶炼过程中, 废水和尾气汞含量分别可达 31.24 mg·L⁻¹ 和 301 mg·m⁻³。且汞在万山汞矿区周边土壤中富集明显, 可达 227.94 mg·kg⁻¹^[11]。汞进入土壤环境后, 与土壤有机质及矿物质组分相互作用, 进而发生形态转化, 其形态特征受土壤性质、水分含量、氧化还原条件等环境因素的共同影响^[12-13]。

本文通过分析万山汞矿区土壤中总汞含量、汞赋存形态及其空间分布特征, 研究认识经长期汞矿开采, 矿区土壤受汞污染程度、及汞在土壤中的迁移转化规律, 为进一步研究农作物富集汞的可能性提供一定的依据。

收稿日期: 2011-11-13

基金项目: 贵州省地勘基金项目(090903)

作者简介: 曾昭婵(1986—), 女, 贵州剑河人, 硕士研究生, 主要从事矿山环境研究。E-mail: 1195322029@qq.com

* 通讯作者: 吴 攀 E-mail: pwu@gzu.edu.cn

1 材料与方法

1.1 样品采集

2010 年 10 月在万山汞矿区采集土壤表土样和剖面样。0~20 cm 表层采样 86 处,不同深度剖面采样点 5 处。采样点主要设置在矿区周围尾矿库排水、河流沿岸、大型尾矿、废渣堆放点、废弃汞矿区及居民生活区周围,分布如图 1 所示。表土样品的采集采用多点混合法,即在一定面积区域内,随机采集 3~5 份 20 cm 表层土壤样品,充分混匀后用四分法分取混合样约 1 kg。剖面样利用土壤取样钻采集,深度至基岩或掩埋渣堆。样品用聚乙烯塑料袋封装保存,标明样品编号及相应记录,带回实验室后迅速冷冻干燥,研磨。过 100 目尼龙筛后自封袋封存备用。实验分析保证在采样后 28 d 内完成。

1.2 样品分析

土壤样品湿法消解后,总汞含量用原子荧光分光

光度计 (AFS-230E) 测定。消解方法如下:称取约 0.200 0 g 干燥土壤样品于 50 mL 具塞比色管中,加入 5 mL 1+1 王水后摇匀,水浴加热 2 h,间歇振荡使其充分消解,冷却定容至 25 mL,静置后取上清液测定。根据采样点分布位置、污染源种类、据污染源距离等,选取表土样 15 个 (T_3 、 T_8 、 T_{13} 、 T_{17} 、 T_{23} 、 T_{30} 、 T_{33} 、 T_{39} 、 T_{41} 、 T_{43} 、 T_{50} 、 T_{53} 、 T_{58} 、 T_{73} 、 T_{74}) 及 P_{T1} 和 P_{T5} 两处剖面样进行形态分析。采用化学提取手段,提取分析了土壤中①水溶态汞;②交换态汞;③碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态汞;④腐植酸结合或络合态汞;⑤易氧化降解有机质结合态汞;⑥难氧化降解有机质及某些硫化物结合态汞;⑦残渣态或晶格态汞。提取步骤如文献所述^[4],离心所得提取液用原子荧光法测定汞含量。样品处理分析过程中通过测定土壤标准物质 (ESS-3)、平行样及空白样等进行质量控制,土壤标准物质的总汞测定值为 $(0.110 \pm 0.008) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=8$),参考值为 $(0.112 \pm 0.012) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

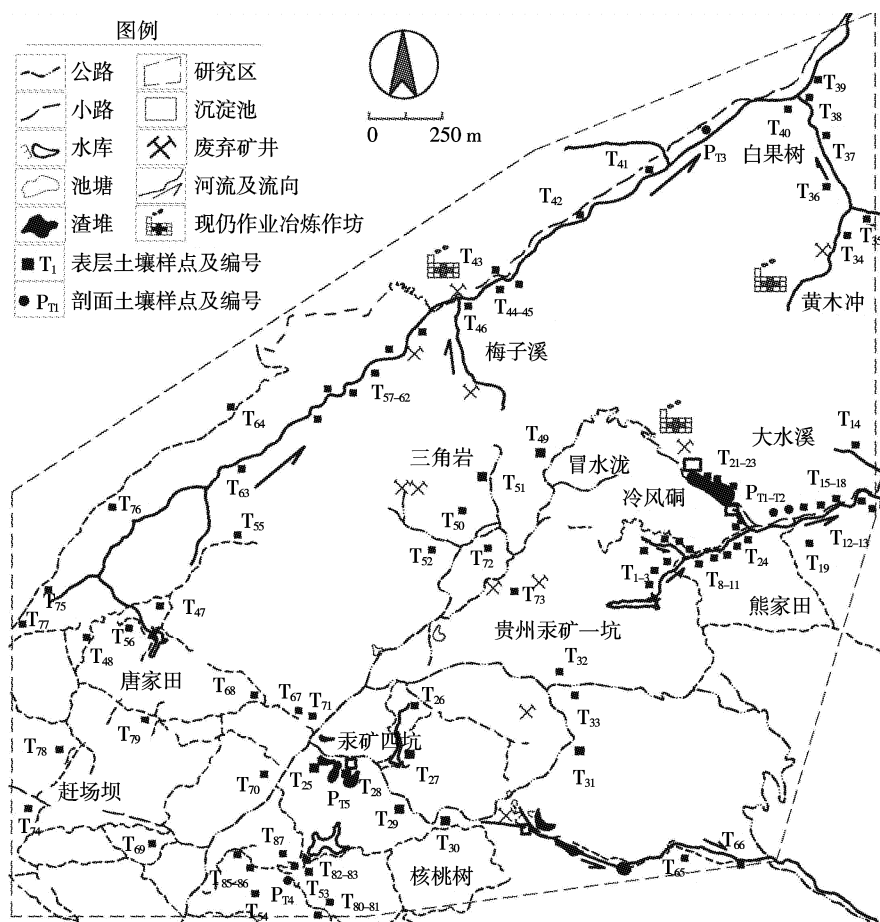


图 1 万山汞矿区周围土壤采样点分布

Figure 1 Sampling locations in soils around Wanshan Hg mine region

2 结果与讨论

2.1 汞的空间分布特征

2.1.1 汞在水平方向的分布特征

表层土壤汞含量在 $1.34\sim 291.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。由于近年来当地采取了对大型尾矿、渣堆进行水泥浇筑、修建渗滤液收集池及一定的植物修复等环境保护措施,在一定程度上降低了汞的释放与迁移转化作用,使本次研究结果较 2005 年呈降低趋势^[15],但仍远远超出国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中二级标准所规定的最大汞浓度负荷值 $0.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。汞在万山矿区周围土壤中呈现出一定的空间分布规律(见图 2),具体分析如下:

(1) 高汞含量样点主要分布于东部区域土壤中,低汞含量样点则主要分布于西、南部区域土壤中(表 1)。具体来说,东部汞含量普遍较高,在 $4.22\sim 290.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $87.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。中、北部汞含量次高,在 $1.32\sim 140.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 $31.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。而西、南部汞含量相对较低,在 $0.10\sim 14.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $3.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。这种含量分布规律可能与采样点周围污染源种类及距污染源距离的不同有关。东部区域周围分布着大水溪尾矿库、冷风硐大型渣堆及现仍作业冶炼作坊多种污染源,该区域土壤在污水灌溉、含汞废气沉降及雨水对废渣的淋滤的共同影响下,汞含量普遍很高。而西、南部区域周围污染源较为单一,且距污染源距离较远,从而使得该区域土壤中汞含量相对较低。

(2) 受大水溪尾矿库排水污水灌溉影响的土壤,其汞含量与水体中所呈现的随水流方向汞含量逐渐降低的规律没有一致性,这与 Yan Lin 等的研究结果相同^[6]。汞含量最高的点位于尾矿库排水下游区域土壤,这可能是由于下游土壤易成为接纳、富集洪水期淋滤、冲积下来的汞的场所。此外,大气沉降是土壤中汞的主要来源之一^[17],故风向、风速对土壤中汞的分布也有重要影响。

(3) 随距冶炼作坊、渣堆、废弃冶炼点等污染源距

离的增加,汞含量呈逐渐降低趋势(黄木冲现冶炼作坊周围土壤除外)。这主要是由于黄木冲冶炼点始于 2010 年 6 月,且仅限于外来矿石的冶炼活动,故其对周围环境的影响还未明显凸现。冷风硐、梅子溪区域采样期间仍存在小规模汞矿冶炼作坊,其周围土壤中汞含量随距冶炼作坊距离的增加呈明显降低的趋势。研究区西、南部由于距污染源距离较远,受污程度明显低于冷风硐、梅子溪等区域。此外,土地利用类型不同、土壤灌溉方式不同、废弃冶炼点零星分布等因素也在一定程度上影响汞在土壤中的分布。

2.1.2 汞在垂直方向的分布特征

汞在土壤中的分布主要受耕作、管理模式、土壤 pH、土壤质地、土壤理化性质、温度、微生物作用等因素^[18-19]的共同影响。汞在研究区土壤中垂直方向上的分布特征如图 3 所示,剖面土壤均呈现明显的表层富集规律,5 个剖面汞的最大值均出现在上层土壤中(0~40 cm),当土壤深度大于 80 cm 后,汞含量呈大幅度降低趋势。这主要受汞污染来源及土壤理化性质两方面因素的影响,具体分析如下。

(1) 研究区土壤中汞的主要来源包括土壤母质、大气沉降及污水灌溉。万山汞矿区的原生矿石矿物主要为辰砂^[7],土壤中的汞主要以 HgS 等相对稳定的形态存在,这在很大程度上影响和制约了汞的迁移速率和能力。

(2) 进入土壤中的汞能通过一系列物理化学过程被土壤胶体、有机质等吸附、螯合而固定于土壤中^[20-21]。其中有机质的存在能促进土壤对汞的吸附,且腐殖质与 Hg 有很强的结合能力^[22]。表层土壤由于存在大量的植物根系、枯枝落叶等使得其有机质含量更为丰富,从而在一定程度上影响了汞在表层土壤的吸附、固定作用。

同时,各剖面因采样点位置、污染源及距污染源距离的不同而在总汞含量上存在一定的差异,如剖面 4 所有样点汞含量相对较低且随剖面垂直方向变化较小,这主要是由于其位于研究区污染情况相对较低的西南区域(见图 1)。此外,剖面 1 与剖面 2 虽

表 1 各区域土壤中不同汞含量范围内样品出现频数

Table 1 The number of soil sample in different regions

地理位置	分布地点	样品总数/个	不同各汞含量范围内样品数/个		
			0~10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	11~100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	101~300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
东部	冷风硐、大水溪、熊家田	21	3	12	6
中、北部	核桃树、汞矿一、四坑、三角岩、冒水沱、梅子溪、黄木冲	40	9	30	1
西、南部	唐家田、赶场坝、张家	25	25	0	0

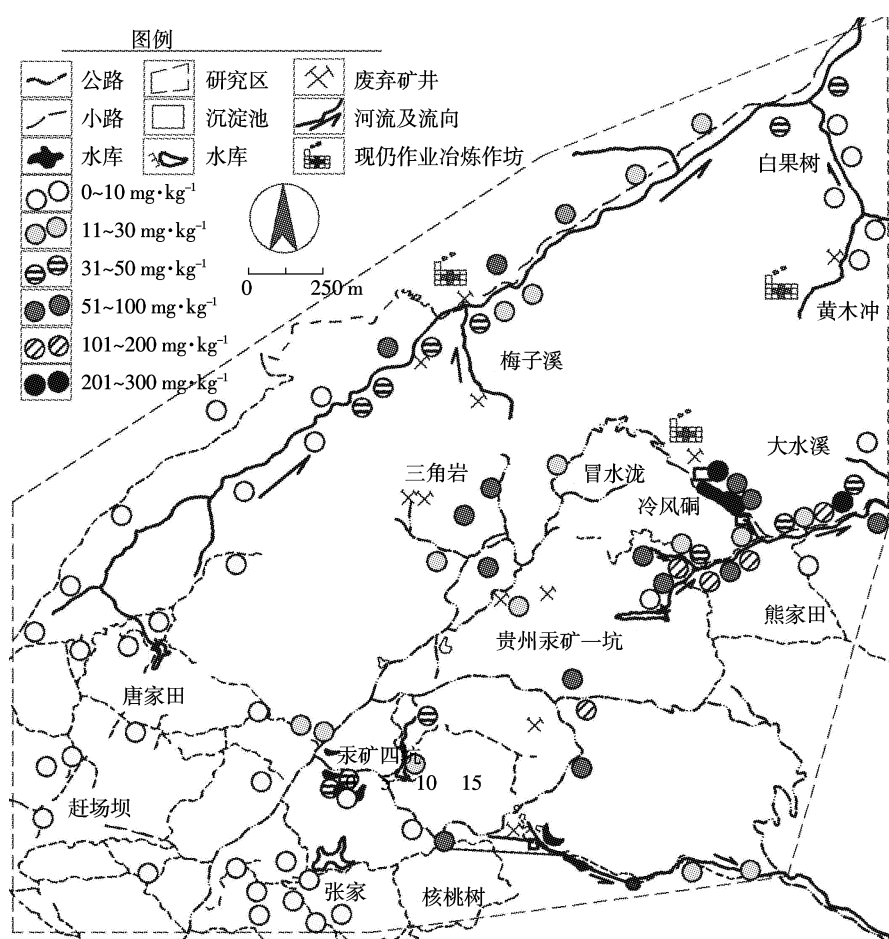


图 2 万山汞矿区周围土壤中汞含量分布

Figure 2 Mercury content distribution in soils around Wanshan Hg mine region

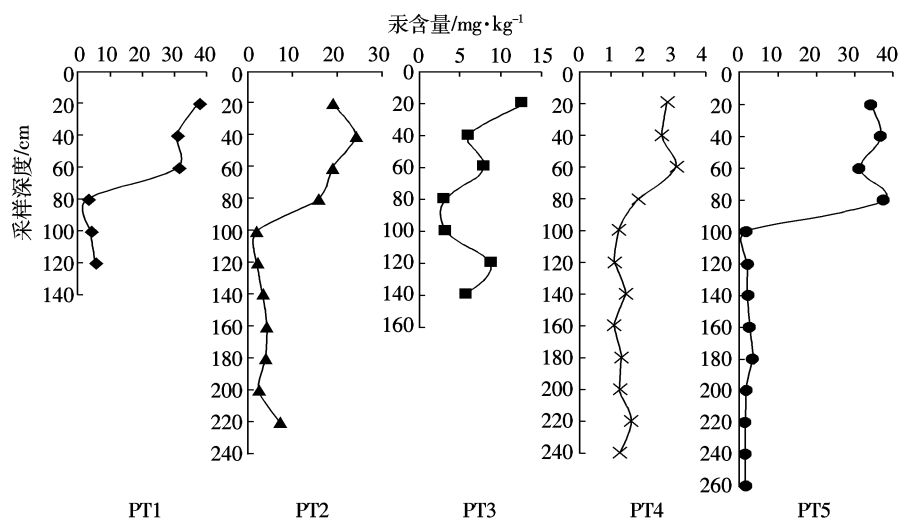


图 3 不同剖面土壤中汞含量分布

Figure 3 Mercury content distribution in soil profiles

采集于大水溪尾矿库排水沿岸,但在剖面深度、汞含量及分布上均有一定的差异,这主要是由于该区域耕作土壤均为河漫滩上人为覆土、翻耕后形成,土壤

来源、人为管理等方面存在较大的差异。且在土壤底部与河漫滩之间有一层厚度不一的冶炼废渣,这使得剖面 1、剖面 2 较其他剖面不同,其底部土壤汞含

量呈增加趋势。

2.2 研究区土壤中汞的形态与分布特征

2.2.1 汞的形态特征

研究区土壤中汞形态特征如表 2 所示, 由表可知: 研究区土壤样品汞形态主要以残渣态、难氧化降解有机质及某些硫化物结合态、易氧化降解有机质结合态为主。而水溶态、交换态、碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态 3 种形态的汞含量极低, 腐植酸结合或络合态的汞由于腐植酸对汞的较强吸附能力而使其在总汞含量中占一定程度的比例。各形态的汞含量与土壤总汞含量密切相关, 随总汞含量的增加而增加。而各形态汞含量占总量的百分比也呈现出较为一致的规律, 即: 残渣态>>难氧化降解有机质及某些硫化物结合态≈易氧化降解有机质结合态汞>铁锰氧化物及部分有机态汞、腐植酸结合或络合态>碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态>水溶态>交换态。

2.2.2 不同形态汞在水平方向的分布特征

不同形态汞在土壤中的水平空间分布特征如图 4 所示, 具体分析如下。

(1) 残渣态、难氧化降解有机质和某些硫化物结合态及易氧化降解有机质结合态的汞是研究区土壤中汞的主要形态。这主要是由于研究区的主要矿石矿物是辰砂, 废弃尾矿、废渣中残留的辰砂(HgS)会随水体的侵蚀、淋溶进入土壤中, 加之被包含在矿物晶格中的残渣态金属具有较强的稳定性, 不易与水体和大气发生交换作用, 从而使得残渣态的汞成为研究区土壤样品中汞的主要形态。且大量研究表明, 当重金属进入土壤后, 各形态会在土壤固相间进行再分配及再分布^[23-25]。当汞进入土壤后, 其会随时间从水溶态、可交换态等不稳定的形态逐渐向有机质结合态等较稳定的形态转化。其中, 梅子溪、冷风硐现仍作业冶炼作坊周围两个土壤点的残渣态汞占总汞含量的比例

则相对较低, 这可能与其靠近现仍作业冶炼作坊有关。冶炼过程中释放于大气及随水排放的汞对周围土壤中水溶态、交换态等形态汞的贡献较大。

(2) 水溶态及交换态汞含量占总汞含量的比例极小。这除了各形态汞在土壤中相互转化、再分配的影响之外, 当地对环境采取的污染防治措施也是其重要影响因素之一。汞极易被具有较大比表面积的细小微粒吸附, 而当地在近年内对几个大型渣堆采取修建渗滤液收集池及一定植物修复的措施, 这在一定程度上减缓了汞的迁移转化速率。

2.2.3 不同形态汞在垂直方向的分布特征

本文对不同形态汞在土壤垂直方向上的空间分布特征进行了分析(见图 5)。

(1) 残渣态、难氧化降解有机质及某些硫化物结合态和碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态汞含量均随土壤深度的加深而不规则增加。可见汞在土壤中随时间和迁移距离的增加, 其各形态间相互转化, 最终进一步向残渣态等较稳定的形态转化, 从而使得其含量在深层土壤中得到相应的增加。

(2) 水溶态、交换态、腐植酸结合态汞则主要分布于表层土壤中, 其随采样深度的加深不规则的减少。其在土壤中会随时间在各土壤环境条件的影响下向其他较稳定形态转化, 且由于表层土壤直接受人为耕作、接受枯枝落叶等因素的影响, 有机质、腐植酸等含量也较为丰富, 使其主要富集于表层土壤中。

(3) 易氧化降解有机质结合态则表现出随采样深度的加深先增加后减少的规律。这主要受汞迁移能力的影响。万山汞矿区位于湘黔汞矿带, 土壤中的汞背景值相对较高。在长期的迁移转化作用下, 汞在下层土壤中得到富集, 使得土壤中汞含量由表层向下逐渐增加。但汞在土壤中的迁移转化除了受时间的影响外, 还受土壤理化性质、环境条件、人为活动等因素的

表 2 表层土壤中各形态汞含量分布

Table 2 Content of different specification of mercury in topsoils

土壤汞形态	各形态汞含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		各形态汞含量占总汞百分比/%	
	范围	平均值	范围	平均值
水溶态	0~0.21	0.08	0~2.42	0.27
交换态	0~0.20	0.02	0~0.40	0.05
碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态	0~3.87	0.46	0~1.73	0.48
腐植酸结合或络合态	0.09~5.66	1.382	0.66~6.25	2.77
易氧化降解有机质结合态	0.37~51.51	6.84	3.32~23.19	11.36
难氧化降解有机质及某些硫化物结合态	0.33~46.23	7.32	4.61~23.21	12.57
残渣态或晶格态	1.01~138.56	51.76	50.58~90.63	72.50

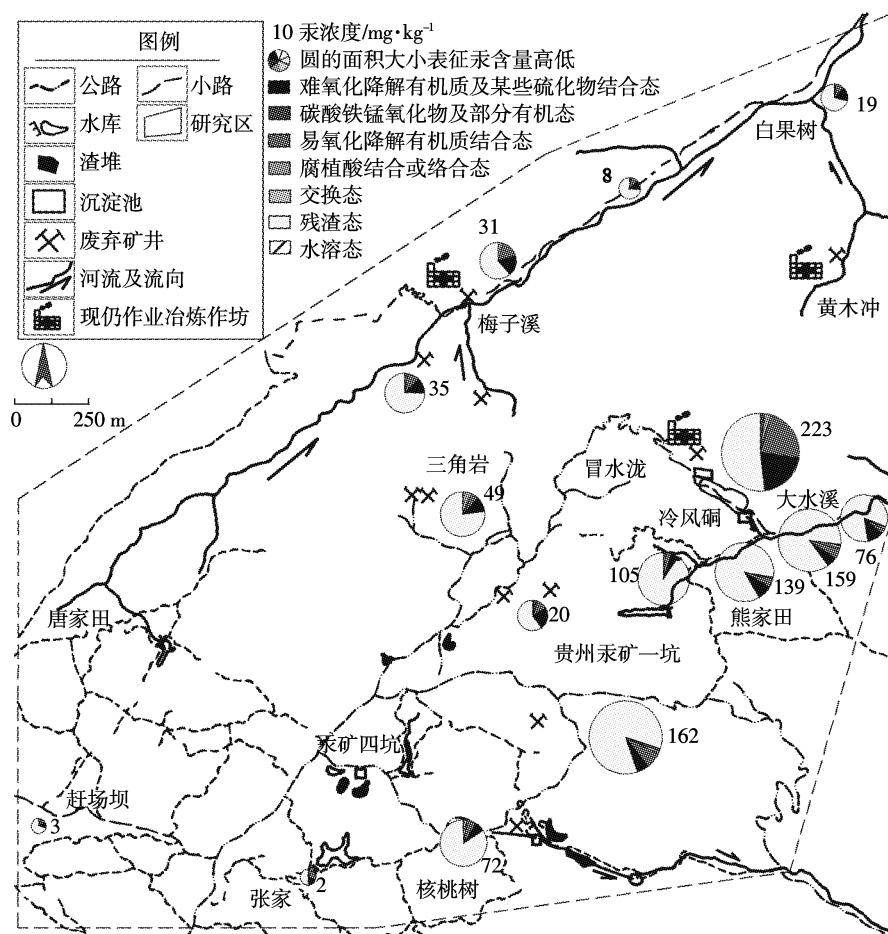


图 4 研究区不同采样点中不同形态汞含量分布

Figure 4 Content of different specification of mercury in different sampling locations

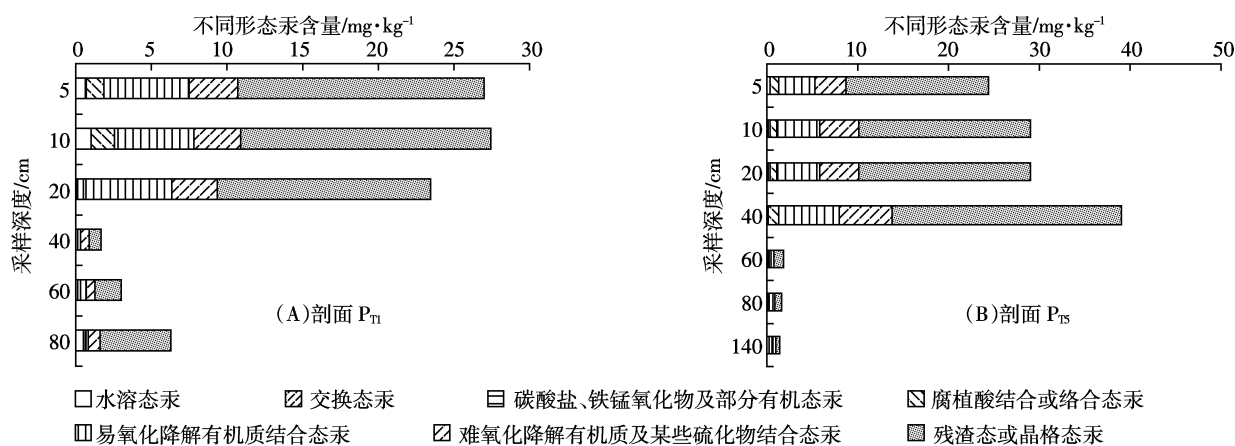
土壤剖面 P_{11} (A)、剖面 P_{15} (B) 的详细位置见图 1

图 5 研究区剖面土壤中不同形态汞含量分布

Figure 5 Content of different specification of mercury in soil profiles

共同影响,使得汞在土壤中的迁移速率较慢。这就造成了汞在剖面土壤中随采样深度的增加呈先增加后减少的规律。

3 结论

(1)本次所采土样中汞含量为 $1.34\sim 291.71\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

研究区东部污染严重,北、中部次之,西、南部污染较轻。

(2)汞的水平分布主要呈现出随距污染源距离的增加汞含量逐渐降低的趋势,而在垂直空间上则表现为明显的表层富集规律。

(3)研究区土壤中汞主要以残渣态为主,水溶态和交换态汞含量极低,各形态汞含量占总量的百分比也较为一致,即:残渣态>>难氧化降解有机质及某些硫化物结合态≈易氧化降解有机质结合态汞>铁锰氧化物及部分有机态汞、腐植酸结合或络合态>碳酸盐、铁锰氧化物及部分有机态>水溶态>交换态。

参考文献:

- [1] 彭德娇, 侯娟, 陈琳, 等. 无机汞在鲤鱼体内生物富集规律的研究[J]. 毒理学杂志, 2007, 21(2): 129-131.
PENG De-jiao, HOU Juan, CHEN Lin, et al. Law of biological accumulation of inorganic mercury in carp[J]. *Journal of Toxicology*, 2007, 21(2): 129-131.
- [2] 闫海鱼, 冯新斌, 刘霆, 等. 贵州百花湖鱼体汞污染现状[J]. 生物学杂志, 2008, 27(8): 1357-1361.
YAN Hai-yu, FENG Xin-bin, LIU Ting, et al. Present situation of fish mercury pollution in heavily mercury-contaminated Baihua reservoir in Guizhou[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1357-1361.
- [3] 鲁洪娟, 倪吾钟, 叶正钱, 等. 土壤中汞的存在形态及过量汞对生物的不良影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 597-600.
LU Hong-juan, NI Wu-zhong, YE Zheng-qian, et al. Mercury forms in soil and effect of excessive mercury on the biological[J]. *Soil Science*, 2007, 38(3): 597-600.
- [4] 冯新斌. 贵州部分地区土壤挥发性汞释放通量及其影响因素的研究(摘要)[J]. 地质地球化学, 1995(6): 123-125.
FENG Xin-bin. Emission flux of vapor phase of Mercury from soil and its influence factors in part of Guizhou[J]. *Geology Geochemistry*, 1995(6): 123-125.
- [5] 张国平, 刘丛强, 吴攀, 等. 贵州万山汞矿尾矿堆及地表水的环境地球化学特征[J]. 矿物学报, 2004, 24(3): 231-237.
ZHANG Guo-ping, LIU Cong-qiang, WU Pan, et al. Environmental geochemical characteristics of mine wastes from the Wanshan mercury mine, Guizhou, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2004, 24(3): 231-237.
- [6] Higuera P, Oyarzun R, Biester H, et al. A first insight into mercury distribution and speciation in soils from the Almadén mining district, Spain[J]. *Geochemical Exploration*, 2003, 80: 95-104.
- [7] Qiu Guangle, Feng Xinbin, Wang Shaofeng, 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: 627-638.
- [8] 刘清, 王子健. 重金属形态与生物毒性及生物有效性关系的研究进展[J]. 环境科学, 1996, 17(1): 89-92.
LIU Qing, WANG Zi-jian. Research progress in heavy metal speciation and toxicity and bioavailability of heavy metals[J]. *Environmental Science*, 1996, 17(1): 89-92.
- [9] 王学锋, 杨艳琴. 土壤-植物系统重金属形态分析和生物有效性研究进展[J]. 化工环保, 2004, 24(1): 24-28.
WANG Xue-feng, YANG Yan-qin. Progresses in research on speciation and bioavailability of heavy metals in soil-plant system[J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2004, 24(1): 24-28.
- [10] 程金平, 胡卫莹, 马黎, 等. 贵州万山汞矿汞污染生物健康效应[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(11): 1909-1912.
CHEN Jin-ping, HU Wei-xuan, MA Li, et al. The biological health effects of mercury pollution in Guizhou Wanshan mercury mine [J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, 39(11): 1909-1912.
- [11] 瞿丽雅. 贵州汞污染防治研究[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2004.
QU Li-ya. Study on pollution prevention and control of mercury in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2004.
- [12] 张庆辉. 汞环境地球化学特征[J]. 阴山学刊, 2006, 20(1): 35-37.
ZHANG Qing-hui. Characteristics of mercury environmental geochemical[J]. *Yinshan Academic Journal*, 2006, 20(1): 35-37.
- [13] 朱小翠, 青长乐, 皮广洁. 土壤汞形态及其影响因素的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 94-100.
ZHU Xiao-cui, QING Chang-le, PI Guang-jie. Study on soil mercury fractions and their influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 94-100.
- [14] 冯新斌, 陈业材, 朱卫国. 土壤中汞存在形式的研究[J]. 矿物学报, 1996, 16(2): 218-222.
FENG X B, CHEN Y C, ZHU W G. Investigation on various mercury species in soil[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1996, 16(2): 218-222.
- [15] 仇广乐. 贵州省典型汞矿区汞的环境地球化学研究[D]. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2005: 15.
Qiu Guang-le. Environmental geochemistry of mercury in typical Hg-mined areas, Guizhou Province [D]. Guiyang: Institute of Geochemistry Chinese Academy of Sciences, 2005: 15.
- [16] Yan Lin, Thorjörn Larssen, Rolf D Vogt, et al. Identification of fractions of mercury in water, soil and sediment from a typical Hg mining area in Wanshan, Guizhou Province, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25: 68-80.
- [17] Heyer M, Burke J, Keeler G. Atmospheric sources, transport and deposition of mercury in Michigan: Two years of event precipitation[J]. *Water Air Soil Pollut*, 1995, 80: 199-208.
- [18] 李俊莉, 宋划明. 土壤理化性质对重金属行为的影响分析[J]. 环境科学动态, 2003(1): 24-25.
LI Jun-li, SONG Hua-ming. Analysis of physical and chemical property of soil on the behavior of heavy metals[J]. *Environmental Science News*, 2003(1): 24-25.
- [19] 荆延德. 土壤汞污染的物理化学行为及其微生物学特征[D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 1-11.
JING Yan-de. Physicochemical and microbial characterization of mercury contamination in soils[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 1-11.
- [20] 刘培桐. 环境学概论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993.
LIU Pei-tong. Environmental science [M]. Beijing: Higher Education

- Press, 1993.
- [21] 丁疆华, 温琰茂, 舒 强. 土壤汞吸附和甲基化探讨[J]. 农业环境与发展, 2001(1):34-36.
- DING Jiang-hua, WEN Yan-mao, SHU Qiang. Discussing of adsorption and methylation of mercury in soils[J]. *Agro-Environment and Development*, 2001(1):34-36.
- [22] 牛凌燕, 曾 英. 土壤中汞赋存形态及迁移转化规律研究进展[J]. 广东微量元素科学, 2008, 15(7):1-5.
- NIU Ling-yan, ZENG Ying. Research progresses of speciation and translation of mercury in soil[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2008, 15(7):1-5.
- [23] Han F X, Banin A, Triplett G B. Redistribution of heavy metals in arid-zone soils under a wetting-drying cycle soil moisture regime[J]. *Soil Science*, 2001, 166(1):18-28.
- [24] 依艳丽, 李 迎, 张大庚, 等. 不同水分条件下汞在土壤中形态转化的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2010, 41(1):42-45.
- YI Yan-li, LI Ying, ZHANG Da-geng, et al. Dynamic process of the form of mercury in the soil under different water conditions[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*, 2010, 41(1):42-45.
- [25] 章明奎, 符娟林, 顾国平, 等. 长三角和珠三角土壤中汞的化学形态、转化和吸附特性[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2):1-5.
- ZHANG Ming-kui, FU Juan-lin, GU Guo-ping, et al. Chemical forms, transformation and adsorption of mercury in the soils of the Changjiang Delta and Zhujiang Delta[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006 (2):1-5.