

贵州丹寨金汞矿区稻田土壤重金属分布特征及其污染评估

喻子恒^{1,2} 黄国培² 张华² 李秋华¹ 钟顺清² 张玉涛³ 商立海^{2*}

(¹贵州师范大学贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001; ²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 550081; ³安顺学院贵州省科技厅土壤污染控制与修复工程技术中心, 贵州安顺 561000)

摘要 分析了贵州省丹寨金汞矿周边的国道区、村落区、矿渣区和对照区稻田土壤中 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的含量及分布规律, 并采用单因子指数法和内梅罗综合污染指数法对稻田土壤进行污染评价。结果表明: 稻田土壤样品 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的含量范围分别为 7.66~73.5、0.233~0.777、58.3~125、1.13~77.1 和 23.7~111 mg·kg⁻¹ (n=28), 其平均含量分别为 (31.2±17.2)、(0.426±0.136)、(95.3±15.6)、(20.4±22.7) 和 (49.9±23.9) mg·kg⁻¹ (n=28) 不同区域稻田土壤重金属含量差异显著, 国道区 Pb 含量高, 村落区 As、Hg 和 Pb 含量高, 矿渣区 As 和 Hg 含量高。研究区 92.86% 的稻田土壤遭到重金属重度污染, 主要表现为 As 的轻微污染和 Hg 的重度污染, 并造成糙米 As 和 Hg 超标。金汞矿开采和冶炼过程中释放的 As 和 Hg 随水体迁移是稻田土壤污染的主要途径。

关键词 丹寨; 土壤; 汞; 砷; 重金属

Distribution and pollution assessment of heavy metals in paddy soil in Danzhai Au-Hg mining area, Guizhou, China. YU Zi-heng^{1,2}, HUANG Guo-pei², ZHANG Hua², LI Qiu-hua¹, ZHONG Shun-qing², ZHANG Yu-tao³, SHANG Li-hai^{2*} (¹Key Laboratory for Information System of Mountainous Area and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; ²State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; ³Engineering Technology Center of Control and Remediation of Soil Contamination of Guizhou Provincial Science and Technology Bureau, Anshun University, Anshun 561000, Guizhou, China).

Abstract: The spatial distribution of five heavy metals (As, Cd, Cr, Hg, Pb) in paddy soils from four different zones in Danzhai Au-Hg mining of Guizhou Province were analyzed, and the pollution status was assessed by single factor index and Nemerow comprehensive index. The contents of As, Cd, Cr, Hg and Pb were 7.66–73.5, 0.233–0.777, 58.3–125, 1.13–77.1 and 23.7–111 mg·kg⁻¹ (n=28), with averages of (31.2±17.2), (0.426±0.136), (95.3±15.6), (20.4±22.7) and (49.9±23.9) mg·kg⁻¹ (n=28), respectively. Heavy metal contents in soils varied with different zones, with higher As, Hg and Pb contents in village area, higher Pb content in national road area, and higher As and Hg contents in tailing area. The Nemerow comprehensive index showed that 92.86% of soil samples were polluted heavily with Hg pollution and slightly with As pollution. The As and Hg contents in brown rice exceeded the China's national standard. The release of As and Hg in the process of Au-Hg mining and smelting with water migration is the main way to paddy soil pollution

Key words: Danzhai; soil; mercury; arsenic; heavy metal.

国家重点基础研究发展规划项目(2013CB430002)和国家自然科学基金项目(41403114, 41173024, 41273152)资助。

收稿日期: 2017-03-21 接受日期: 2017-05-24

* 通讯作者 E-mail: shanglihai@vip.skleg.cn

随着城市化和工业化的发展,土壤重金属污染已成为我国重要的环境问题。土壤重金属污染的主要来源有工业“三废”、矿山开采废水、矿渣淋滤水、化肥农药、化石燃料燃烧排放和土壤母质等(邵学新等,2007;于瑞莲等,2008)。土壤重金属污染影响农产品的产量与质量,并直接或者间接地通过食物链危害人体健康(Buchet *et al.*,1990;冯新斌等,2013)。

贵州省丹寨金汞矿区位于贵州省凯里市丹寨县城东南方向约 12 km,是典型的卡林型金汞矿床,开采历史超过 600 余年(贵州省地方志编纂委员会,1992),其成矿元素 Au、Hg 和 As 密切共生(夏勇等,1994)。该矿初期的开采、冶炼技术相对粗放、简单,对周边环境造成了严重的污染(李红阳等,2002),采矿活动遗留了大约 186 万 t 矿渣,继续给当地环境带来污染(林齐维等,1998;苏连文等,2010)。前人研究表明,矿区附近废渣与土壤中汞的含量高达 15~627 mg·kg⁻¹(刘鹏等,2005),远超贵州省土壤汞背景值(0.1027 mg·kg⁻¹)和国家土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中规定的 II 类标准(pH>6.5,Hg≤0.5 mg·kg⁻¹)。孙雪城等(2014)研究表明,矿渣和附近土壤中 As 和 Hg 的含量分别高达 23.7~356.5 和 11.5~79.7 mg·kg⁻¹,分别是国家土壤质量标准规定的 II 类土壤限量标准的 1~14 和 56~115 倍。孙雪城等(2014)对矿渣进行淋滤实验,结果发现淋滤液中 As 和 Hg 的含量高达 9929.8 和 12.12 μg·L⁻¹,表明矿区尾渣仍对周围土壤存在潜在的 Hg 和 As 污染。

金属矿开采、冶炼和尾渣堆放是造成周边环境重金属污染的主因(许超等,2007;陈岩等,2012)。对于丹寨金汞矿区土壤的汞污染已有较多研究,但大多数只限于汞的含量调查和评估。经实地调查,丹寨矿区周围分布大量农田,主要种植水稻,而专门针对矿区稻田土壤和水稻中汞及其他重金属的含量分布、污染来源的研究则相对较少。因此,本文分析丹寨矿区附近稻田土壤和水稻中重金属(As、Cd、Cr、Hg 和 Pb)的含量分布特征,解析重金属的来源并进行重金属污染评价,为矿区土壤重金属污染修复和农业结构调整提供基础数据和科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区域

丹寨金汞矿位于贵州省黔东南苗族侗族自治州

凯里市丹寨县东南方乌水河峡谷,距县城约 12 km,距贵阳市约 230 km,地理坐标为 107°58'E,26°09'N。丹寨金汞矿于 1952 年建成投产,1985 年停产,年产汞量约 80 t(苏连文等,2010)。矿洞主要分布在乌水河两岸山坡上,冶炼厂间位于峡谷河岸至半坡。乌水河是流经矿区的主要河流,河宽约 3~10 m,深 0.5~4 m,是矿区周边区域灌溉和生活的主要水源。

1.2 样品采集与前处理

2015 年 10 月初,沿乌水河采集土壤样品,土壤为水稻根系土壤(0~20 cm),采样点分布如图 1 所示。

根据各采样点的地理位置,结合重金属的主要来源(于瑞莲等,2008;杨奕如等,2009),将采样区分为 4 类:(1)国道区:含 G1~G4 采样点(G1 紧邻 321 国道,G2~G4 紧邻村路道);(2)村落区:含 C1~C7 采样点;(3)矿渣区:含 K1~K14 采样点(K1~K4 位于矿渣堆上游,K5~K14 位于矿渣堆下游);(4)对照区:含 D1~D3 采样点(与国道区、矿渣区和村落区有一山之隔,距离大于 1.5 km)。

土壤样品通风避光自然风干,粉碎(陈岩等,2012)。

1.3 样品分析

土壤 pH:参照我国农业行业标准 NY/T 1377—2007,按照土水比 1:2.5 振荡平衡后用 pH S-3C 型 pH 计(上海雷磁)测定。

Hg:土壤的总汞测定采用王水消解,用冷原子吸收分析仪(上海华光 F732-S)测定(李仲根等,2005)。

As、Cd、Cr 和 Pb:土壤采用 HNO₃-HF-H₂O₂ 高温高压密闭消解(严莎等,2008),用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS,美国 PE, NexION 300X)测定。

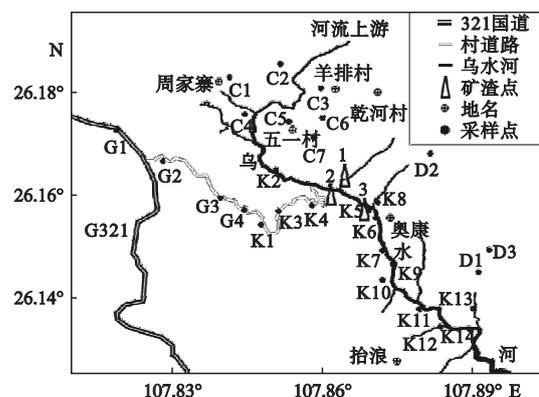


图 1 研究区域和采样站位示意图

Fig.1 Map of study area and sampling sites

1.4 质量保证与质量控制

所有分析批次均设有空白样品和 10% 的重复样品, 结果表明重现性小于 5% 的偏差。采用标准参考物质控制数据质量, 土壤汞分析采用河口沉积物(ERM CC580), 土壤 As、Cd、Cr 和 Pb 采用黄红壤(GSS-5), 标准参考物质测定结果如表 1 所示。

1.5 污染评价方法

以国家土壤质量标准(GB 15618—1995)中规定的 II 级标准、贵州土壤背景值(何邵麟, 1998)和凯里市土壤背景值(何邵麟等, 2005)为参考指标, 采用单项污染指数法和内梅罗综合污染指数法分别对单一重金属的污染状况和多金属污染状况进行评估(郭笑笑等, 2011)。

单项污染指数法的计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i$$

式中 P_i 为土壤污染物 i 的污染指数; C_i 为土壤污染物 i 的实测浓度; S_i 为污染物 i 的评价标准。

单项污染指数法能反映出土壤中各种重金属污染的情况。其污染等级划分为 5 个级别: I 级: $P_i \leq 1$, 无污染; II 级: $1 < P_i \leq 2$, 轻微污染; III 级: $2 < P_i \leq 3$, 轻度污染; IV 级: $3 < P_i \leq 5$, 中度污染; V 级: $P_i > 5$, 重度污染。

内梅罗综合污染指数法的计算公式为:

$$P_N = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{\text{ave}}^2 + (C_i/S_i)_{\text{max}}^2}{2}}$$

式中 P_N 为内梅罗综合污染指数, $(C_i/S_i)_{\text{ave}}$ 为各重金属的单项污染指数的平均值, $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 为各单项污染指数中最大值。

内梅罗综合污染指数特别考虑了污染最严重的因子, 在加权过程中避免了权系数中主观因素, 能很好地评价土壤污染的整体状况。内梅罗综合污染指数对土壤环境质量评定等级也分为 5 级: I 级: $P_N \leq 0.7$, 清洁(安全); II 级: $0.7 < P_N \leq 1.0$, 尚清洁(警戒限); III 级: $1.0 < P_N \leq 2.0$, 轻度污染; IV 级: $2.0 < P_N \leq 3.0$, 中度污染; V 级: $P_N > 3$, 重度污染。

表 1 标准物质测定重金属含量及标准参考值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 1 Measured As, Cd, Cr, Pb and Hg contents and reference value in certified reference materials

元素	土壤		标准物质
	测定值	标准值	
As	409±0.007	412±16	GSS-5
Cd	0.508±0.001	0.45±0.06	GSS-5
Cr	120±3.78	118±7	GSS-5
Pb	576±2.81	552±29	GSS-5
Hg	130±1.48	132±3	ERM CC580

戒限); III 级: $1.0 < P_N \leq 2.0$, 轻度污染; IV 级: $2.0 < P_N \leq 3.0$, 中度污染; V 级: $P_N > 3$, 重度污染。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 及重金属分布

土壤 pH 值范围为 3.74~7.40, 平均值为 6.42 ± 0.91 ($n=28$), 其中 $\text{pH} < 6.5$ 的土壤样品有 11 个, 在 6.5~7.5 的土壤有 17 个(表 2)。

稻田土壤样品 As、Cd、Cr、Hg 和 Pb 的含量范围分别为 7.66~73.5、0.233~0.777、58.3~125、1.13~77.1 和 23.7~111 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=28$) (表 2), 其平均含量分别为 (31.2 ± 17.2)、(0.426 ± 0.136)、(95.3 ± 15.6)、(20.4 ± 22.7) 和 (49.9 ± 23.9) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=28$) (表 2)。

2.2 稻田土壤重金属污染评价

丹寨金汞矿区稻田土壤 As 含量高于贵州省土

表 2 稻田土壤重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Table 2 Concentrations of heavy metals in paddy soils

采样点	pH	Pb	Cr	Cd	Hg	As
G1	7.06	101	115	0.551	1.76	36.7
G2	6.86	58.5	83.7	0.249	1.13	25.9
G3	6.90	79.9	96.5	0.376	7.56	73.5
G4	6.95	40.8	92.1	0.503	2.42	14.0
C1	7.20	76.6	87.3	0.530	5.98	21.5
C2	7.15	111	110	0.339	7.44	49.4
C3	6.10	50.8	111	0.369	18.1	33.6
C4	7.26	80.7	78.6	0.566	13.9	23.0
C5	7.13	92.4	125	0.466	60.0	43.3
C6	7.08	26.2	78.2	0.363	6.47	13.0
C7	7.30	37.9	74.6	0.573	54.8	22.9
K1	6.35	61.4	107	0.511	6.35	22.2
K2	7.40	38.5	89.6	0.516	15.5	22.3
K3	6.09	38.2	82.4	0.407	13.8	17.6
K4	6.51	36.7	86.6	0.406	33.8	26.1
K5	6.72	42.3	84.4	0.306	21.6	70.6
K6	7.10	32.8	58.3	0.233	27.7	48.8
K7	5.74	23.7	102	0.324	5.42	16.0
K8	7.38	34.4	70.9	0.385	55.9	35.3
K9	6.86	44.3	116	0.506	77.1	32.7
K10	6.06	34.2	103	0.345	10.1	16.6
K11	5.60	41.4	115	0.402	52.9	42.1
K12	5.25	28.6	101	0.287	3.79	61.5
K13	5.39	31.8	103	0.251	5.97	29.5
K14	6.62	48.2	96.9	0.777	57.5	35.7
D1	5.10	45.4	102	0.362	1.88	17.2
D2	4.96	28.0	101	0.305	1.37	7.66
D3	3.74	31.6	98.4	0.725	1.44	14.3
平均值		49.9±23.9	95.3±15.6	0.426±0.136	20.4±22.7	31.2±17.2

壤 As 的背景值(14.89 mg · kg⁻¹) 和凯里市土壤 As 的背景值(24.20 mg · kg⁻¹) (何邵麟等, 2005) 。丹寨金汞矿区稻田土壤与株洲典型功能区工业区耕地土壤 As 含量(40.81±21.87) mg · kg⁻¹(姜苹红等, 2012) 相当, 高于辽宁鞍山污灌区稻田土壤 As 含量(8.38±2.24) mg · kg⁻¹(段飞舟等, 2005) 。用单项污染指数法进行评估, 发现稻田土壤样品 50.00% 表现为无 As 污染, 39.29% 轻微 As 污染, 10.71% 轻度 As 污染(表 3) 。

丹寨金汞矿区稻田土壤 Cd 的含量大部分高于贵州省土壤 Cd 的背景值(0.3133 mg · kg⁻¹) , 而与凯里市土壤背景值(0.4742 mg · kg⁻¹) 相当(何邵麟等, 2005) 。用单项污染指数法进行评估, 14.29% 表现为无 Cd 污染, 丹寨金汞矿区 78.57% 轻微 Cd 污染, 7.14% 轻度 Cd 污染(表 3) , 可知当地土壤面临着地质高背景污染问题(Liu *et al.* 2017) 。

丹寨金汞矿区稻田土壤 Cr 含量高于贵州省土壤 Cr 背景值(79.42 mg · kg⁻¹) (何邵麟, 1998) 和凯里市土壤 Cr 背景值(71.66 mg · kg⁻¹) (何邵麟等, 2005) 。用单项污染指数法进行评估, 100% 表现为无 Cr 污染(表 3) 。

丹寨金汞矿区稻田土壤 Pb 含量大部分介于贵州省土壤 Pb 背景值(29.39 mg · kg⁻¹) (何邵麟, 1998) 和凯里市土壤 Pb 背景值(62.54 mg · kg⁻¹) (何邵麟等, 2005) 之间。与国内相关研究对比, 高于江苏淮安 205 国道周围土壤 Pb 含量(14.93 ± 0.89) mg · kg⁻¹(杨奕如等, 2009) , 而与福建沿海城市稻田土壤 Pb 含量(60.323±11.99) mg · kg⁻¹(陈穗玲等, 2013) 相当。用单项污染指数法进行评估, 100% 表现为无 Pb 污染(表 3) 。

丹寨金汞矿区稻田土壤 Hg 含量普遍高于贵州省土壤 Hg 背景值(0.1027 mg · kg⁻¹) 和凯里市土壤 Hg 背景值(0.1262 mg · kg⁻¹) 。与国内相关研究对比, 丹寨金汞矿区稻田土壤 Hg 含量与滥木厂汞矿区稻田土壤 Hg 含量(31±35) mg · kg⁻¹(仇广乐等, 2006) 相当, 高于天津汞污水灌溉区稻田土壤 Hg 含量(1.215±0.135) mg · kg⁻¹(武超等, 2016) 。与刘鹏等(2005) 在丹寨的研究结果对比, 发现本研究中得到 Hg 含量低于刘鹏等(2005) 报道的 1996 年土壤中 Hg 的含量(123.4±108.0) mg · kg⁻¹, n = 9。用单项污染指数法进行评估, 3.57% 表现为轻度 Hg 污染, 14.29% 表现为中度 Hg 污染, 而 82.14% 表现为重度 Hg 污染(表 3) 。

利用内梅罗综合污染指数法评估丹寨金汞矿区稻田土壤污染, 可以发现 92.86% 的样品表现为重度重金属污染(表 4) 。

2.3 稻田土壤重金属污染来源分析

Cd 和 Cr 的含量在国道区、村落区、矿渣区和对照区未呈现显著性差异。因此这两种元素与矿区开采、冶炼等没有直接关系, 可能主要是地质背景来源。

Pb 的含量水平在国道区和村落区明显高于矿渣区和对照区(图 2) 。国道区和村落区的人类活动较密集, Pb 是交通污染源的典型特征污染物(Lee *et al.* , 1997; Banerjee 2003) 。

As 和 Hg 有相似的分布特征, 矿渣区和村落区的含量显著高于对照区(图 2) , 高 As 含量与高 Hg 含量的样品基本一致(图 3) 。国道区 G3 点土壤 As 和 Hg 的含量明显高于其他 3 个点, 可能是 G3 点受到局部点源污染(如附近堆积比较隐蔽的矿渣堆) 。丹寨金汞矿是一个典型的卡林型金汞矿床, 其成矿元素 Au、Hg 和 As 密切共生(夏勇等, 1994) 。金汞矿开采过程中产生的粉尘、冶炼过程中排放的废渣、废水和废气对矿渣区稻田产生 As 和 Hg 污染。另据调查, 当地曾存在土法炼汞活动, 土法炼汞活动中使用的矿石及产生的废渣、废水和废气对村落区稻田产生 As 和 Hg 污染。

2.4 稻田土壤 As 和 Hg 的污染途径分析

丹寨金汞矿区的主要污染元素为 As 和 Hg。将乌水河水及溪水灌溉土壤 As 和 Hg 的含量对比, 用

表 3 稻田土壤金属单项污染指数

Table 3 Single factor index of heavy metal in paddy soil

P_i	比例(%)				
	Pb	Cr	Cd	Hg	As
$P_i \leq 1$	100	100	14.29	0	50.00
$1 < P_i \leq 2$	0	0	78.57	0	39.29
$2 < P_i \leq 3$	0	0	7.14	3.57	10.71
$3 < P_i \leq 5$	0	0	0	14.29	0
$P_i > 5$	0	0	0	82.14	0

表 4 稻田土壤重金属综合污染指数

Table 4 Nemerow comprehensive index of heavy metal in paddy soil

P_N	比例(%)
$P_N \leq 0.7$	0
$0.7 < P_N \leq 1.0$	0
$1.0 < P_N \leq 2.0$	3.57
$2.0 < P_N \leq 3.0$	3.57
$P_N > 3.0$	92.86

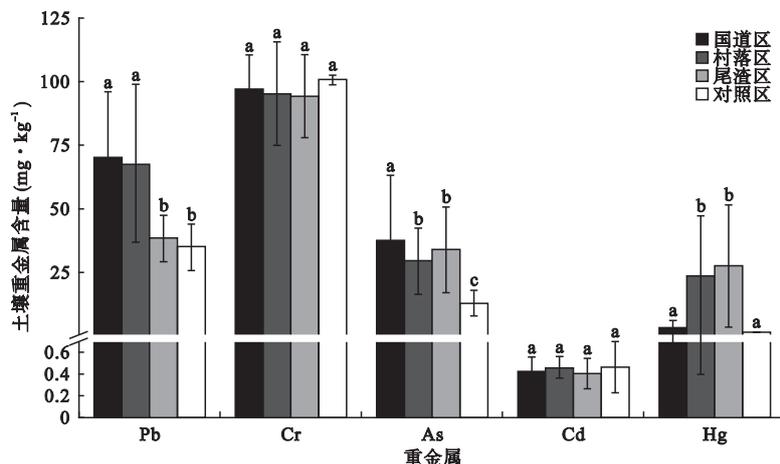


图2 不同区域稻田土壤重金属含量水平

Fig.2 Concentrations of heavy metals in different zones of paddy soil

相同字母代表无显著性差异,不同字母代表有显著性差异,95%置信水平。

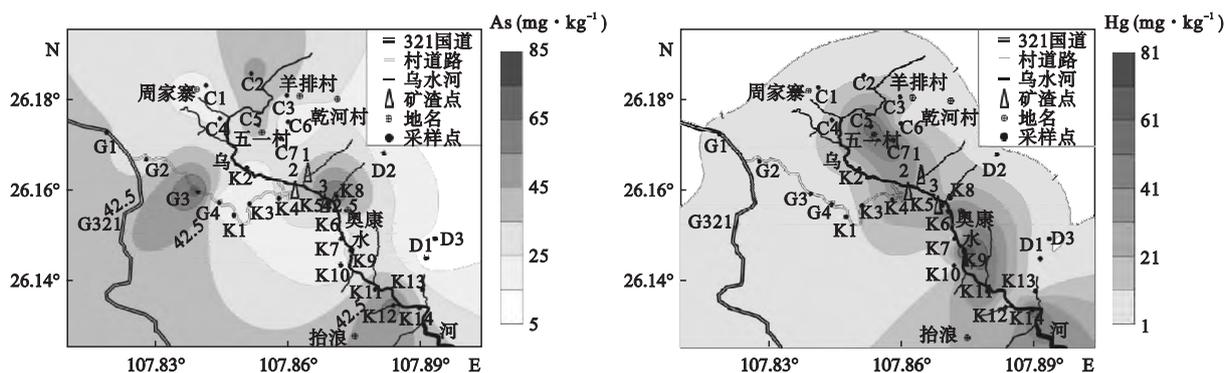


图3 稻田土壤 As、Hg 含量空间插值图

Fig.3 Spatial distribution of As and Hg concentrations in paddy soil

乌水河水灌溉的稻田土壤中 As 和 Hg 的浓度分别为 $(38.9 \pm 6.52) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($32.7 \sim 48.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n = 5$) 和 $(54.2 \pm 17.6) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($27.7 \sim 77.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n = 5$) (K6、K8、K9、K11 和 K14), 而溪水灌溉的稻田土壤中 As 和 Hg 的浓度分别仅为 $(14.4 \pm 3.89) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($7.66 \sim 17.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n = 5$) 和 $(4.04 \pm 3.78) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($1.37 \sim 10.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $n = 5$) (K7、K10、D1、D2 和 D3), 前者是后者 As 和 Hg 含量的 3 倍和 13 倍。

矿区有大量的炼汞渣、烟土、尾矿和采矿废石等固体废弃物,这些废弃物大都未经处理露天堆放,极易通过淋滤作用释放重金属到水体中(苏连文等,2010)。丹寨金汞矿开采、冶炼过程产生的废水包括浮选废水、洗汞水、冲渣水、炉气凝结水、清洗地面水和冷却水等,乌水河成为接纳这些废水的河流。孙雪城等(2014)报道丹寨矿区矿渣堆渗滤液和下游河水 As 含量高达 5.6 和 $11.5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$, Hg 含量达

0.22 和 $0.16 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由此,丹寨金汞矿区附近稻田 As 和 Hg 的污染是金汞矿开采活动过程中造成的,而随乌水河迁移是重要的污染途径。

3 结论

贵州省丹寨金汞矿开采和冶炼对周围土稻田土壤环境造成了轻微的 As 污染和重度的 Hg 污染,并造成水稻糙米中 As 和 Hg 超标(作者实测糙米数据,本文未呈现)。地质高背景造成研究区域稻田土壤 Cd 的含量轻微超标。研究区域稻田土壤 Pb 含量显示出人类活动密集区含量较高特征,但整体未超标。

金汞矿开采和冶炼过程中 As 和 Hg 随水体迁移是稻田土壤污染的重要途径。考虑到当前农产品出现 As 和 Hg 超标的情况,建议对 As 和 Hg 污染土壤开展修复治理措施。

参考文献

- 陈穗玲, 李锦文, 陈南, 等. 2013. 福建沿海地区不同区域稻田土壤重金属元素富集特征与环境质量评价. 中国环境监测, (2): 34-40.
- 陈岩, 季宏兵, 朱先芳, 等. 2012. 北京市得田沟金矿和崎峰茶金矿周边土壤重金属形态分析和潜在风险评价. 农业环境科学学报, 31(11): 2142-2151.
- 段飞舟, 高吉喜, 何江, 等. 2005. 灌溉水质对污灌区土壤重金属含量的影响分析. 农业环境科学学报, 24(3): 450-455.
- 冯新斌, 陈玖斌, 付学吾, 等. 2013. 汞的环境地球化学研究进展. 矿物岩石地球化学通报, (5): 503-530.
- 贵州省地方志编纂委员会. 1992. 贵州省志——地质矿产志. 贵阳: 贵州人民出版社.
- 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 2011. 土壤重金属污染评价方法. 生态学杂志, 30(5): 889-896.
- 何邵麟. 1998. 贵州表生沉积物地球化学背景特征. 贵州地质, (2): 149-156.
- 何邵麟, 陈敏, 刘应忠, 等. 2005. 贵州主要城市地表松散沉积物中微量元素与土壤环境. 贵州地质, 22(3): 147-155.
- 姜莘红, 马超, 向仁军, 等. 2012. 株洲典型功能区土壤重金属污染及其生态风险. 环境科学与技术, (s1): 379-384.
- 李红阳, 高振敏, 杨竹森, 等. 2002. 贵州丹寨卡林型金矿床地球化学特征. 地质科学, 37(1): 1-7.
- 李仲根, 冯新斌, 何天容, 等. 2005. 王水水浴消解-冷原子荧光法测定土壤和沉积物中的总汞. 矿物岩石地球化学通报, 24(2): 140-143.
- 林齐维, 李庆新, 瞿丽雅, 等. 1998. 丹寨汞矿冶炼厂土壤汞污染的初步研究. 贵州环保科技, (2): 23-26.
- 刘鹏, 吴攀, 陶秀珍. 2005. 贵州丹寨汞矿土壤汞含量的变化趋势. 环境科学与技术, 28(s2): 9-10.
- 仇广乐, 冯新斌, 王少锋, 等. 2006. 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. 环境科学, 27(3): 550-555.
- 邵学新, 吴明, 蒋科毅. 2007. 土壤重金属污染来源及其解析研究进展. 广东微量元素科学, 14(4): 1-6.
- 苏连文, 吴永贵, 刘方, 等. 2010. 贵州丹寨汞矿区土和渣中重金属的含量及形态分析. 贵州农业科学, 38(2): 202-204.
- 孙雪城, 王建旭, 冯新斌. 2014. 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. 生态毒理学报, 9(6): 1173-1180.
- 武超, 张兆吉, 费宇红, 等. 2016. 天津污灌区水稻土壤汞形态特征及其食品安全评估. 农业工程学报, 32(18): 207-212.
- 夏勇, 吴学益, 贾蓉芬, 等. 1994. 丹寨汞金矿床成矿构造地球化学模拟实验. 大地构造与成矿学, (2): 117-125.
- 许超, 夏北成, 秦建桥, 等. 2007. 广东大宝山矿山下游地区稻田土壤的重金属污染状况的分析与评价. 农业环境科学学报, (s2): 549-553.
- 严莎, 凌其聪, 严森, 等. 2008. 城市工业区周边土壤-水稻系统中重金属的迁移累积特征. 环境化学, 27(2): 226-230.
- 杨奕如, 殷云龙, 於朝广, 等. 2009. 205国道两侧农田土壤和稻米叶片及糙米中重金属含量的空间分布特征. 植物资源与环境学报, 18(2): 73-79.
- 于瑞莲, 胡恭任. 2008. 土壤中重金属污染源解析研究进展. 有色金属, 60(4): 158-165.
- Banerjee AD. 2003. Heavy metal levels and solid phase speciation in street dusts of Delhi, India. *Environmental Pollution*, 123: 95-105.
- Buchet JP, Lauwerys R, Roels H, et al. 1990. Renal effects of cadmium body burden of the general population. *The Lancet*, 336: 699-702.
- Lee PK, Touray JC, Baillif P, et al. 1997. Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France. *Science of the Total Environment*, 201: 1-15.
- Liu Y, Xiao T, Perkins RB, et al. 2017. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale. *Journal of Geochemical Exploration*, 176: 42-49.

作者简介 喻子恒,男,1991年生,硕士研究生,主要从事稻田生态系统重金属的环境分析。E-mail: ysir20140407@163.com
责任编辑 魏中青