

贵州省稻田土壤重金属分布特征

孔祥宇^{1,2}, 黄国培², 程天金^{3*}, 江帆¹, 王志伟⁴, 李秋华¹
喻子恒², 张华², 姚珩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. 环境保护部
环境保护对外合作中心, 北京 100083; 4. 贵州省草业研究所 贵州省农业科学院, 贵阳 550006

摘要: 为揭示贵州省稻田土壤重金属的超标状况和空间分布特征, 采集了 92 个稻田土壤样品, 用 ICP-MS 测定了样品的重金属含量, 并运用单因子污染指数法、富集因子法和空间分析法对数据进行了分析处理。结果表明, 贵州省稻田土壤的 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb 和 Zn 平均含量分别为(19.7±17.1)、(0.577±0.690)、(91.1±38.6)、(40.5±32.8)、(37.1±20.3)、(35.5±32.0)、(3.59±8.81)和(135±128) mg/kg; 89.1%的点位重金属超标, 67.4%的点位为轻微(超标 1~2 倍)和轻度(超标 2~3 倍)超标; Ni、As、Cd 主要由地质高背景成因导致; 在成矿区和成矿带上, 出现源于人为活动的重金属超标, 在一些点位和区域达到了中度超标(超标 3~5 倍)至重度(超标大于 5 倍)超标。

关键词: 重金属; 稻田土壤; 贵州省

中图分类号: P595 文章编号: 1007-2802(2018)06-1084-08 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2018.37.72

Distribution Characteristics of Heavy Metals in Paddy Soils of Guizhou Province

KONG Xiang-yu^{1,2}, HUANG Guo-pei², CHENG Tian-jin^{3*}, JIANG Fan¹, WANG Zhi-wei⁴,
LI Qiu-hua¹, YU Zi-heng², ZHANG Hua², YAO Heng²

1. Guizhou Provincial Key Laboratory of Mountain Environment Information System and Ecological Environment Protection, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 3. Center for International Cooperation of Environmental Protection, Ministry of Environmental Protection, Beijing 100083, China; 4. Guizhou Provincial Grass Industry Research Institute, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China

Abstract: To understand the pollution status and spatial distributions of heavy metals in paddy soils of the Guizhou province, China, a total of 92 paddy soil samples were collected from Guizhou and heavy metals concentrations of these samples were measured by ICP-MS. The data were analyzed statistically by the methods of single factor index, enrichment factor index and spatial geographic analysis in accordance to the environmental quality standard for soils of China (GB 15618-1995). The results showed that average concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, Sb and Zn in paddy soil samples were (19.7±17.1), (0.577±0.690), (91.1±38.6), (40.5±32.8), (37.1±20.3), (35.5±32.0), (3.59±8.81) and (135±128) mg/kg, respectively; heavy metals exceeding their national standard levels were found in 89.1% of the sampling sites, and 67.4% of which either exceeded the standards slightly (1-2 times exceeding the standards) or mildly (2-3 times exceeding the standards); the high geological backgrounds of Ni, As and Cd, especially Cd, could account for their exceeding of the standards; in areas of metallogenic zone and belt, heavy metals exceeded the standards moderately (3-5 times exceeding the standards) even severely (more than 5 times exceeding the standards) at some sites and regions, which attributed mainly to anthropic activities.

Key words: heavy metals; paddy soils; Guizhou Province

收稿编号: 2018-008 2018-01-11 收到 2018-02-13 改回

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0800302); 贵州省科技厅科技支撑计划项目(黔科合支撑[2017]2967 黔科合J字[2011]2358)

第一作者简介: 孔祥宇(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 环境分析化学。E-mail: 529071182@qq.com.

* 通讯作者简介: 程天金(1963-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 环境保护。E-mail: cheng.tainjin@mepfeco.org.cn.

农田重金属污染是国内外普遍关注的环境问题(孟飞等,2008;Liu *et al.*,2018),流域尺度上表层土壤中重金属分布主要受地质背景、气候条件等因素控制,区域和田块尺度还受人为污染源的影响(国家环境保护局,1990;魏复盛等,1991)。2014年环保部和国土部公布的《全国土壤污染状况调查公报》指出我国耕地土壤重金属超标严重,其中地质高背景是造成土壤重金属超标的主要原因之一(环境保护部和国土资源部,2014)。地质高背景指重金属的土壤环境背景值偏高,重金属高背景的区域大体有3种类型,第一种类型来自于土壤的母质;第二种类型发生在冲积平原;第三种类型发生在重金属成矿区周边(陈能场等,2015)。贵州省位于我国西南大面积低温成矿域(孙国胜等,2003;黄智龙等,2011)地质高背景是不同成土母质风化与重金属成矿带共同作用的结果,其土壤重金属超标问题突出,全国土壤污染状况调查结果显示贵州省是重金属超标最严重的省份之一,而已有的研究较多地关注人为污染却忽视地质高背景问题(宋春然等,2005;张莉和周康,2005;张清海等,2008;丁玉娟等,2013;胡国成等,2015),因此亟需开展针对贵州省地质高背景成因土壤重金属超标问题的相关研究。

稻田是贵州省重要的耕地类型,稻米是主粮,

食用稻米是人体重金属的重要暴露途径之一(王小燕,2010;Huang *et al.*,2018)因此本文选取稻田为研究对象,在贵州省采集稻田土壤样品92个,测定重金属含量,运用单因子污染指数法、富集因子法和空间分析法,分析地质高背景条件下贵州省稻田土壤重金属的超标状况和空间分布特征,为地质高背条件下农田土壤重金属超标风险管控和防治技术研究提供重要数据,为贵州省农业产业规划和全面管控土壤风险提供科学信息。

1 材料与方法

1.1 样品采集与前处理

根据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T166-2004)2014年9月至10月在贵州省30个县采集了92个水稻根系土壤样品(0~20 cm,图1)。每个样品采集5个分样,均匀混合后用四分法取1 kg样品装于聚乙烯密封袋(王娟等,2011)。样品运回实验室后置于阴凉通风处自然风干,去除砂石、植物残渣等杂物,玛瑙研钵研磨,过200目筛后室温保存于聚乙烯袋中(陈岩等,2012)。

1.2 土壤 pH 测定

参照我国农业行业标准 NY/T 1377-2007,按土水比1:2.5的比例称取5.0 g土壤样品,加入12.5

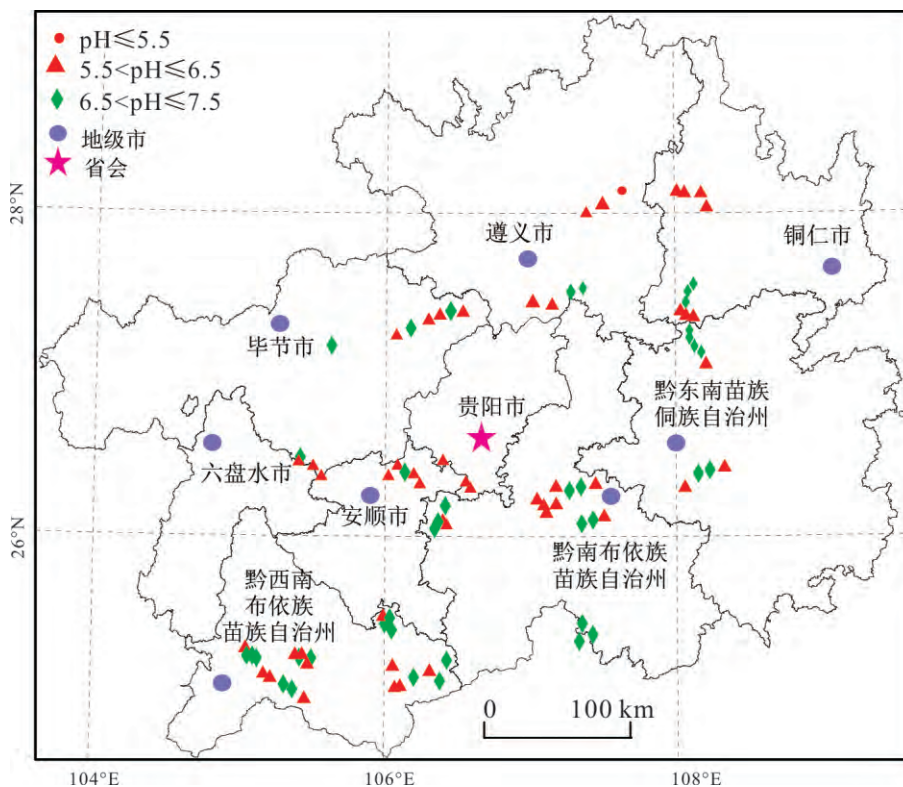


图1 采样点位置及其 pH 值

Fig.1 The sampling sites and pH values of paddy soils in Guizhou

mL 超纯水, 振荡平衡后用 pH S-3C 型 pH 计(上海雷磁)测定上清液 pH 值。

1.3 重金属含量分析

用精度万分之一天平称取 0.1000 g 样品于特氟龙消解罐中, 用 HNO₃-HF 高温高压密闭消解(严莎等 2008), 冷却后消解液加入 H₂O₂ 以充分消解有机物(90 °C), 然后加热赶酸、稀释定容。As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb、Zn 等重金属元素利用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, 美国 PE 公司, NexION 300X) 进测定。实验用试剂均为工艺超纯或优级纯, 其中 HNO₃ 和 HF 进行二次亚沸蒸馏, 实验用水为超纯水(18.2 MΩ)。实验用器皿用 20% 硝酸浸泡 48 h, 去离子水冲洗后用超纯水润洗 3 次。每批实验设置 3 个空白样和 10% 的平行样, 并用国家土壤标准物质 GSS-5 进行质量控制。

1.4 污染评估方法

1.4.1 单因子污染指数法

由于《土壤环境质量标准》(GB 15618-1995) 二级标准未规定 Sb 的标准值, 因此本文中 Sb 采用《农用地土壤环境质量标准》(GB 15618-2018 第三次征求意见稿于 2016 年 3 月发布), 用单因子污染指数法评估重金属的超标状况(郭笑笑等 2011), 单因子污染指数计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中 P_i 为重金属 i 的单因子污染指数; C_i 为样品中重金属 i 的测量值(mg/kg); S_i 为重金属 i 的标准值(mg/kg)。超标等级分为 5 级: I 级, $P_i < 1$, 未超标; II 级, $1 < P_i \leq 2$, 轻微超标; III 级, $2 < P_i \leq 3$, 轻度超标; IV 级, $3 < P_i \leq 5$, 中度超标; V 级, $P_i > 5$, 重度超标。

1.4.2 富集因子法

富集因子(Enrichment Factor, EF) 是另一个评估土壤重金属污染状况的指数, 以环境背景值为参比(郑永红等 2013), 公式为:

$$EF_i = \frac{(C_i/C_{Rb})_{\text{sample}}}{(C_i/C_{Rb})_{\text{baseline}}} \quad (2)$$

式中 C_i 表示重金属 i 的含量, $(C_i/C_{Rb})_{\text{sample}}$ 表示样品中重金属 i 和 Rb 含量的比值, $(C_i/C_{Rb})_{\text{baseline}}$ 表示

环境背景中重金属 i 和 Rb 含量的比值。

本文采用贵州省土壤背景值为环境背景值(国家环境保护局, 1990)。根据富集因子, 将重金属污染水平分为 5 级(Zhang *et al.*, 2012): ① $EF_i < 2$, 表示没有或极少污染; ② $2 \leq EF_i < 5$ 表示中度污染; ③ $5 \leq EF_i < 20$ 表示显著污染; ④ $20 \leq EF_i < 40$ 表示为强污染; ⑤ $EF_i \geq 40$ 表示极端污染。

2 结果与讨论

2.1 质量控制数据

国家标准物质 GSS-5 的测定值和参考值见表 1, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb、Zn 的回收率分别为 89%±1.4%、91%±2.4%、96%±2.8%、95%±2.0%、92%±2.2%、113%±2.2%、89%±1.5% 和 95%±2.3%, 测定结果均处于参考值范围内, 3 次平行测定的偏差小于 10%。

2.2 土壤 pH 值

贵州省稻田土壤样品的 pH 为 5.40~7.05, 均值为 6.41±0.37, 其中 pH<5.5 的土壤样品 1 个, 5.5<pH≤6.5 的土壤样品 51 个, 6.5<pH≤7.5 的土壤样品 40 个, pH>7.5 的土壤样品 0 个。土壤样品的 pH 值分布情况见图 1。

2.3 土壤重金属含量和超标状况

贵州省稻田土壤样品重金属含量的统计结果见表 2, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Sb、和 Zn 的含量范围分别为 1.08~129、0.157~6.23、25.4~228、4.03~158、7.92~102、0.320~78.7 和 48.8~907 mg/kg, 平均值分别为 (19.7±17.1)、(0.577±0.690)、(91.1±38.6)、(40.5±32.8)、(37.1±20.3)、(35.5±32.0)、(3.59±8.81) 和 (135±128) mg/kg。

根据《土壤环境质量标准》(GB15618-1995) 二级标准, 贵州省稻田土壤 92 个样品中, 除 Cr 外其他 7 个重金属均有点位超标, 超标点位数从高到低分别为: Cd、Ni、Sb、Cu、As、Zn 和 Pb, 大部分为轻度超标和轻微超标(表 3)。超标较严重的为: Cd 有 2 个样品重度超标、10 个样品中度超标; Sb 有 3 个样品重度超标、4 个样品中度超标; As 有 1 个样品重度超

表 1 土壤标准物质重金属含量的参考值和测量值

Table 1 The certificated and measured concentrations of heavy metals in the National Soil Reference Material

| | (mg/kg, n=3) | | | | | | | |
|-------|--------------|-----------|-------------|-------------|------------|--------------|------------|--------------|
| 元素 | As | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Sb | Zn |
| 参考值 | 412.00±16.00 | 0.45±0.06 | 118.00±7.00 | 144.00±6.00 | 40.00±4.00 | 552.00±29.00 | 35.00±5.00 | 494.00±25.00 |
| 测量值 | 366.80±5.22 | 0.41±0.01 | 113.55±3.18 | 136.43±2.73 | 36.96±0.83 | 625.12±13.69 | 30.98±0.48 | 473.83±10.69 |
| 回收率/% | 89±1.4 | 91±2.4 | 96±2.8 | 95±2.0 | 92±2.2 | 113±2.2 | 89±1.5 | 95±2.3 |

表 2 贵州省稻田土壤重金属含量
Table 2 Concentrations of heavy metals in paddy soils of Guizhou (mg/kg)

| 元素 | 范围 | 平均值 | 25%位置值 | 中值 | 75%位置值 |
|----|------------|-------------|--------|-------|--------|
| As | 1.08~129 | 19.7±17.1 | 9.83 | 15.1 | 23.6 |
| Cd | 0.157~6.23 | 0.577±0.690 | 0.317 | 0.416 | 0.577 |
| Cr | 25.4~228 | 91.1±38.6 | 62.7 | 86.4 | 113 |
| Cu | 4.03~158 | 40.5±32.8 | 20.8 | 29.1 | 47.8 |
| Ni | 7.92~102 | 37.1±20.3 | 23.4 | 31.8 | 44.3 |
| Pb | 12.4~290 | 35.5±32.0 | 22.8 | 27.0 | 37.5 |
| Sb | 0.320~78.7 | 3.59±8.81 | 1.01 | 1.23 | 2.13 |
| Zn | 48.8~907 | 135±128 | 81.4 | 94.5 | 134 |

标; Zn 有 1 个样品中度超标(表 3)。用最大单项指数法评估($P_{i\max}$)各点位的超标情况,10 个点位重金属未超标($P_{i\max} \leq 1$),47 个点位轻微超标($1 < P_{i\max} \leq 2$),15 个点位轻度超标($2 < P_{i\max} \leq 3$),15 个点位中度超标($3 < P_{i\max} \leq 5$),5 个点位重度超标($P_{i\max} > 5$)。总计有 89.1% 的点位受到了重金属污染,其中轻微和轻度超标的点位占 67.4%。

以贵州省土壤背景值为参考值(国家环境保护局,1990),计算出贵州省稻田土壤样品重金属的富集因子(表 3),结果表明,1 个点位 Sb 处于极端污染状态($EF = 51.6$),其他点位重金属的富集因子均小于 20,42 个点位(45.6%)所有重金属的富集因子均小于 2(没有或极少有污染)。

2.4 土壤重金属的空间分布

土壤重金属超标通常为地质成因和人为活动共同作用的结果(栾文楼等,2008)。富集因子法以环境背景值进行归一化,因此富集因子的大小可识别地质成因和人为污染源,普遍认为 $EF < 2$ 可判定为地质成因, $EF \geq 2$ 表明受到了人为污染。单因子污染指数(P_i)和富集因子(EF_i)结合分析可分为 4 种情形:① $P_i \leq 1, EF_i < 2$,指示重金属 i 未受人为污染且未超标;② $P_i > 1, EF_i < 2$,指示地质成因导致重金属 i 超标;③ $P_i > 1, EF_i \geq 2$,指示重金属 i 受到人为污染并超标;④ $P_i \leq 1, EF_i \geq 2$,指示重金属 i 受到

人为污染但还未超标。对各个重金属的 P_i 和 EF_i 组合类型进行投点得到贵州省稻田土壤重金属的超标状况及空间分布特征(图 2)。

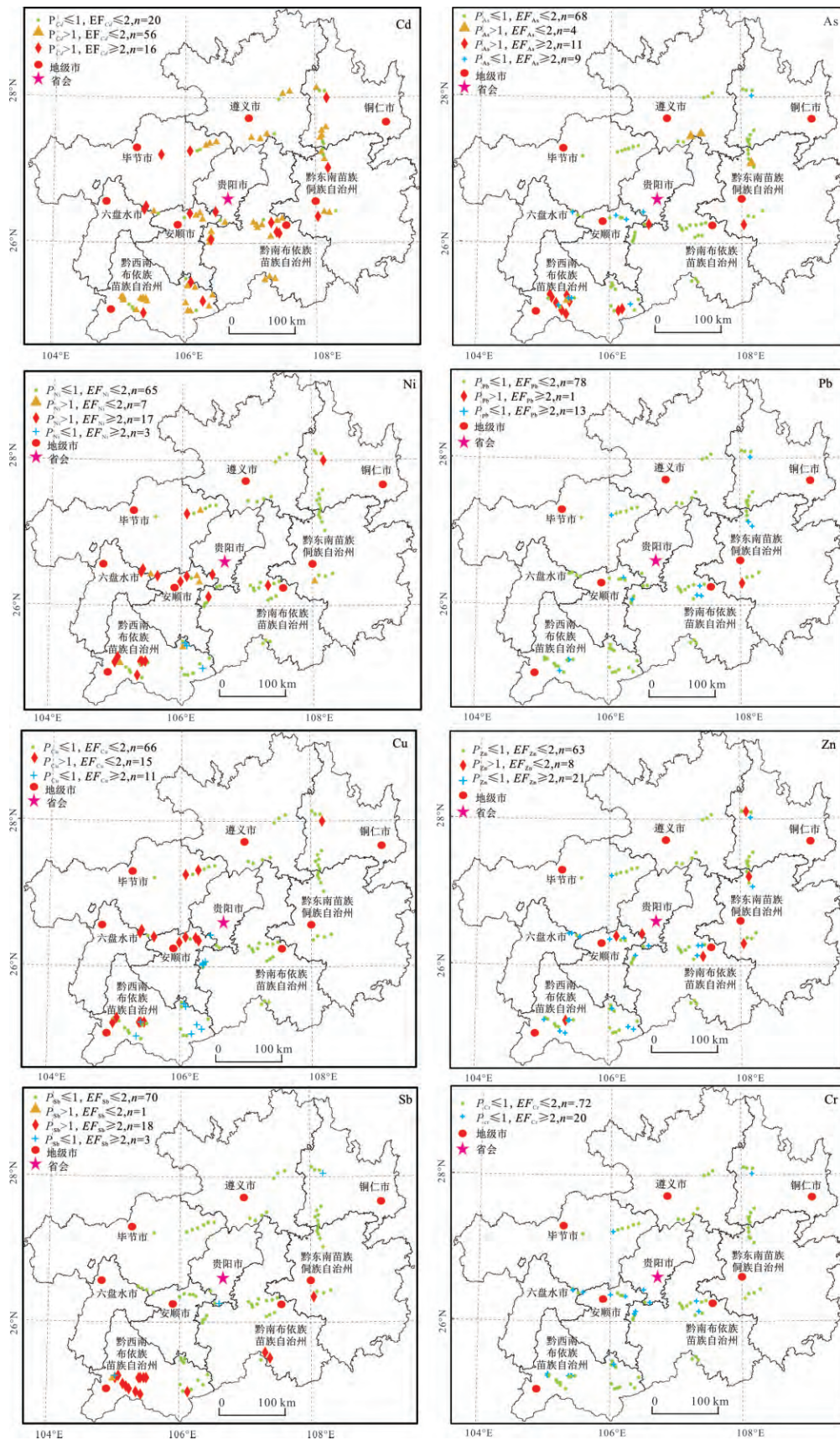
Cd 有 56 个点 是地质因素导致超标($P_{Cd} > 1, EF_{Cd} < 2$);16 个点受人为污染超标($P_{Cd} > 1, EF_{Cd} \geq 2$),其中 10 个点达到中度超标($3 < P_{Cd} \leq 5$),分别为黔东南苗族侗族自治州西北部施秉县(108.2116°E, 27.0721°N, $P_{Cd} = 3.22$)和西南部雷山县(108.0325°E, 26.3648°N, $P_{Cd} = 3.45$),六盘水市六枝特区梭嘎苗族彝族乡(105.4243°E, 26.4356°N, $P_{Cd} = 3.69$);2 个点达重度超标($P_{Cd} > 5$),均位于黔南布依族苗族自治州都匀市(107.3237°E, 26.2839°N, $P_{Cd} = 5.03$; 107.4014°E, 26.1408°N, $P_{Cd} = 15.6$)。都匀市已探明 Cd 储量达大型规模的富镉锌矿(叶霖和刘铁庚,2001),都匀市 Cd 重度超标很可能与镉矿开采密切相关。从空间上看,贵州省六市三州均出现 Cd 超标点位,表明贵州省在镉地质高背景下叠加人为污染造成镉超标的情况普遍存在(Liu et al., 2017)。

从图 2 中可以看到 Ni 与 Cu 的空间分布十分相似,另外 Spearman 相关性分析也表明 Ni 与 Cu 存在很强的正相关性($r = 0.84$)。Ni 有 2 个点由于地质成因导致超标,均位于安顺市;17 个点受到人为影响而超标,主要分布于贵州西南部的六盘水市、安顺市、贵阳市、黔南布依族苗族自治州和黔西南布依族苗族自治州;3 个点受到人为影响但还未超标,位黔西南布依族苗族自治州。Cu 有 15 个点受到人为影响而导致超标,与 Ni 的分布相似,主要分布于六盘水市、安顺市和黔西南布依族苗族自治州,其中 2 个点位达到了中度超标,分别位于安顺市(106.0149°E, 26.3655°N, $P_{Cu} = 3.15$)和六盘水市六枝特区梭嘎苗族彝族乡(105.4243°E, 26.4356°N, $P_{Cu} = 3.07$);11 个点受到人为影响但还未超标,也与 Ni 一样位于黔西南。安顺市和六盘水市 Cu 与

表 3 贵州省稻田土壤重金属单因子污染指数和富集因子统计表

Table 3 Statistical analyses of single factor indexes and enrichment factors of heavy metals in paddy soils of Guizhou

| 元素 | 单因子污染指数 | | | | | 富集因子 | | | | |
|----|--------------|------------------|------------------|------------------|-----------|------------|-------------------|--------------------|---------------------|----------------|
| | $P_i \leq 1$ | $1 < P_i \leq 2$ | $2 < P_i \leq 3$ | $3 < P_i \leq 5$ | $P_i > 5$ | $EF_i < 2$ | $2 \leq EF_i < 5$ | $5 \leq EF_i < 20$ | $20 \leq EF_i < 40$ | $EF_i \geq 40$ |
| As | 77 | 12 | 2 | 0 | 1 | 72 | 18 | 2 | 0 | 0 |
| Cd | 20 | 51 | 9 | 10 | 2 | 76 | 13 | 3 | 0 | 0 |
| Cr | 92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 72 | 19 | 1 | 0 | 0 |
| Cu | 77 | 10 | 3 | 2 | 0 | 66 | 16 | 10 | 0 | 0 |
| Ni | 68 | 21 | 3 | 0 | 0 | 72 | 19 | 1 | 0 | 0 |
| Pb | 91 | 1 | 0 | 0 | 0 | 78 | 12 | 2 | 0 | 0 |
| Sb | 73 | 8 | 4 | 4 | 3 | 71 | 13 | 7 | 0 | 1 |
| Zn | 84 | 4 | 3 | 1 | 0 | 63 | 24 | 5 | 0 | 0 |



图例中的数字表示样点数 如 $P_{Cd} \leq 1, E_{Cd} < 2, n = 46$: 表示有 46 个样点 $P_{Cd} \leq 1, E_{Cd} < 2$

图 2 贵州省稻田土壤重金属超标状况及空间分布

Fig.2 The status and spatial distribution of heavy metals pollutions in paddy soils of Guizhou

Ni 污染很可能是铜镍矿采矿活动及相关工业生产所致,研究表明在贵州西部安顺-六盘水一带存在铜镍硫化物矿床(刘应忠,2008;胡江良等,2014;张玉涛等,2014)。

Sb 有 18 个点受到人为影响而超标,分别位于黔西南布依族苗族自治州的安龙县(13 个点)、兴义市(1 个点)和望谟县(1 个点)及黔南布依族苗族自治州的独山县(2 个点)和黔东南苗族侗族自治州的雷山县(1 个点);其中 4 个点达到中度超标,分别位于安龙县(3 个点)和独山县(1 个点),3 个点达到重度超标(P_{Sb} 分别为 5.40、8.09 和 26.22),均位于安龙县。土壤中 Sb 含量超标与相应地区富含锑矿及锑矿开采活动密切相关。黔西南地区是滇黔桂金锑矿成矿区“金三角”最重要组成部分,大致以贞丰-安龙-兴义-新寨一线为界(张志杰,1985;钱汉东等,1995;胡煜昭,2011;刘建中等,2015;陈江,2017;余冲,2017),其中晴隆大厂锑矿是目前正在开采的锑矿(余冲,2017)。黔南布依族苗族自治州独山县独山锑矿田是我国华南锑成矿带的重要组成部分,也是贵州省重要的 Sb 生产基地之一(罗艳碧等,2014;潘金权和伍登浩,2017;卫永华和张小强,2017)。黔东南雷山县有火烧寨金锑砷矿床,位于雷公山多金属成矿带之双尧-火烧寨金锑砷成矿亚带中(陈兴龙等,2009;陈兴龙,2010)。

As 有 4 个点是地质因素导致的超标,分别位于遵义市(2 个点)、黔东南(1 个点)和黔西南地区(1 个点),其中遵义市和黔东南广泛分布富含 Cd、As 元素的黑色页岩,是这两个区域 As 超标的主要原因(张庆华等,2012;王兴富和顾秉谦,2016)。As 有 11 个点受人为因素影响而超标,分别位于黔西南的安龙县(9 个点)、贵阳市花溪区(1 个点)和黔东南的雷山县(1 个点),其中安龙县和雷山县 As、Sb 受人为污染超标的点位位置重合,表明这两个区域 As 与 Sb 一样受到了金锑砷矿的影响,此外安龙县的高砷煤矿也很可能是 As 的另外一个重要污染源(黄志勇,2008)。

Pb 与 Zn 分别有 1 个点和 8 个点受人为影响而导致超标,超标点位主要分布在万山-玉屏-镇远-凯里-丹寨-三都-荔波一线,以及向西突出宽数十公里的狭长铅锌矿带上(龚智等,2017;吴从文,2017)和黔西南金锑矿“金三角”区(张志杰,1985;钱汉东等,1995;胡煜昭,2011;刘建中等,2015;陈江,2017;余冲,2017),其中有 1 个点位 Zn 达中度超标,位于都匀市($107.401^{\circ} E, 26.141^{\circ} N, P_{Zn} = 4.54$)。Pb 与 Zn 分别有 13 个点和 21 个点受到了

人为影响但尚未超标。

所有采样点 Cr 均未超标,但有 20 个点受到一定程度的人为影响,与 Pb 和 Zn 受人为影响的点位基本重合,其中有 1 个点位达中度污染($EF_{Cr} = 8.61$),位于铜仁市思南县($108.19^{\circ} E, 28.032^{\circ} N$)。

从行政区域来看,各地的重金属污染状况不同。遵义市存在地质高背景的 Cd、As 超标;铜仁市存在地质高背景 Cd 超标、人为因素 Ni、Cu、Zn 超标,人为因素造成的 Sb、As、Pb、Cr 污染有增强趋势;毕节市存在地质高背景 Cd、Ni 超标、人为活动 Cd、Cu 超标,人为活动造成的 Pb、Zn、Cr 污染有增强趋势;贵阳市存在人为活动导致的 Cd、Ni、As、Zn 超标,人为活动造成的 Sb、Cu、Cr 污染有增强趋势;黔东南存在地质高背景 Cd、Ni、As 超标、人为活动 Cd、Sb、As、Pb、Zn 超标;六盘水市存在地质高背景 Cd、Ni 超标、人为活动 Cd、Ni、Cu 超标,人为活动造成的 As、Zn、Cr 污染有增强趋势;安顺市存在地质高背景 Cd、Ni 超标、人为活动 Cd、Ni、Cu、Zn,人为活动造成的 As、Pb、Zn、Cr 污染有增强趋势;黔南存在地质高背景 Cd 超标、人为活动 Cd、Ni、Sb、Pb、Zn 超标,人为活动造成的 Cu、Pb、Zn、Cr 污染有增强趋势;黔西南存在地质高背景 Cd、Ni、Sb、As 超标、人为活动 Cd、Ni、Cu、Sb、As 超标,人为活动造成的 Pb、Zn、Cr 污染有增强趋势。

综上所述,贵州省面临着地质高背景和人类活动造成的高比率重金属超标的问题,但值得注意的是贵州省绝大部分地区位于碳酸岩岩溶区,土壤呈弱酸性至碱性(相对于我国南方及其他地区偏碱性),土壤重金属生物有效性往往较低(阮玉龙等,2015;周长松等,2015;朱丹尼,2016),通常出现土壤重金属超标而农作物不超标的情况(喻子恒等,2017)。我国农田重金属污染形势严峻,其中相当部分农田重金属超标是由特殊的区域地质背景高造成的,主要集中于西南和华南地区,具有分布面积广、超标率高、成因复杂等特点。我国地质高背景农田普遍存在着重金属污染机理不清、生态风险不明、评价标准缺乏和防控技术不足等问题。本文采样点数量也有限,仅能部分揭示贵州省稻田土壤重金属的污染状况,全面揭示贵州省土壤重金属的污染状况仍需更全面、更深入的研究,如结合重金属有效态分析、农作物重金属分析等,研究重金属从母质到土壤的迁移-富集机制、从土壤到作物的迁移-转化机制、风险评估方法体系、重金属阻控机理和工程技术等,从识别技术、评价技术和防控技术等多维一体综合研究,保障农作物安全生产和

人民群众的身体健康。

3 结论

贵州省稻田土壤重金属超标率高(达 89.1%),但大多数(67.4%)以轻微超标和轻度超标为主。存在 Cd、Ni、As 地质高背景超标问题,尤其是 Cd。在成矿区和成矿带上,由于采矿及相关人类活动,出现主要源于人为活动的重金属超标问题,个别点位和区域达到了中度甚至重度超标的情况。Cu 和 Ni、As 和 Sb 超标状况的空间分布特征相似,除 Cd 外其他重金属超标趋势表现为西部超标较严重、东部超标较弱的空间分布特征。

贵州省具有重金属地质背景高和喀斯特地质两个特征,偏碱性的土壤环境有利于降低重金属的活性,需要开发新方法准确评估土壤污染的风险。贵州省矿产资源丰富,在矿产的开发利用过程中也可造成土壤重金属污染,需要采取有效措施防止新污染产生。针对贵州省在地质高背景条件下土壤重金属超标问题的研究相还相当有限,亟需开展包括污染源识别技术、风险评估方法和修复治理技术等系统的理论、方法和技术研究,以保障贵州省的粮食、作物安全和人民身体健康,护航贵州省“大生态”发展战略。

参考文献(References):

Huang Y, Chen Q Q, Deng M H, Japenga J, Li T Q, Yang X E, He Z L. 2018. Heavy metal pollution and health risk assessment of agricultural soils in a typical peri-urban area in southeast China. *Journal of Environmental Management*, 207: 159-168

Liu G N, Wang J, Liu X, Liu X H, Li X S, Ren Y Q, Wang J, Dong L M. 2018. Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions. *Geoderma*, 312: 104-113

Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, Zhu J M, Zhu Z J, Xiong Y, Ning Z P. 2017. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale. *Journal of Geochemical Exploration*, 176: 42-49

Zhang H, Wang Z F, Zhang Y L, Hu Z J. 2012. The effects of the Qinghai-Tibet railway on heavy metals enrichment in soils. *Science of the Total Environment*, 439: 240-248

陈江. 2017. 贵州烂泥沟卡林型金矿床成矿流体研究. *世界有色金属*, (12): 167-168

陈能场, 郑煜基, 雷绍荣, 杨定清, 冷小艳, 张东. 2015. 种植业农产品中重金属超标的成因分析. *农产品质量与安全*, (2): 54-60

陈兴龙, 李波, 王尚彦, 金中国. 2009. 黔东南火烧寨金(锑)矿床地质特征及找矿潜力探讨. *矿产与地质*, 23(1): 62-65

陈兴龙. 2010. 黔东南火烧寨金(锑)矿床地球化学特征及矿化富集规律浅析. *地质找矿论丛*, 25(2): 129-133

陈岩, 季宏兵, 朱先芳, 黄兴星, 乔敏敏. 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

丁玉娟, 林昌虎, 何腾兵, 林绍霞, 张珍明. 2013. 贵州草海耕地土壤重金属污染特征及安全评价. *贵州科学*, 31(2): 47-51, 88

龚智, 冯异星, 肖玉勇, 商琮婧, 陈惠, 索芳青. 2017. 贵州省三都县三洞铅锌矿矿化特征与物化探异常解释推断. *世界有色金属*, (5): 164-166

郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 王中良, 李军. 2011. 土壤重金属污染评价方法. *生态学杂志*, 30(5): 889-896

国家环境保护局. 1990. 中国土壤环境背景值. 北京: 中国环境科学出版社, 330-369

胡国成, 张丽娟, 齐剑英, 杨剑, 于云江, 郑海, 陈凤, 陈棉彪, 王程程, 黎华寿. 2015. 贵州万山汞矿周边土壤重金属污染特征及风险评价. *生态环境学报*, 24(5): 879-885

胡江良, 胡恭任, 于瑞莲, 温先华, 何海星, 苏光明. 2014. 六盘水工业区表层土壤的重金属污染及其潜在生态风险评价. *贵州农业科学*, 42(7): 188-192

胡煜昭. 2011. 黔西南拗陷沉积盆地分析与锑、金成矿研究. 博士学位论文. 昆明: 昆明理工大学

环境保护部, 国土资源部. 2014. 全国土壤污染状况调查公报. *中国环保产业*, (5): 10-11

黄志勇. 2008. 黔西南高砷煤与卡林型金矿成因关系研究. 硕士学位论文. 贵阳: 贵州大学

黄智龙, 胡瑞忠, 苏文超, 温汉捷, 刘燊, 符亚洲. 2011. 西南大面积低温成矿域: 研究意义、历史及新进展. *矿物学报*, 31(3): 309-314

刘建中, 王泽鹏, 杨成富, 祁连素, 王大福, 徐良易, 李俊海, 胡承伟, 吴文明. 2015. 贵州西南部 SBT 分布区金锑矿成矿机制与成矿模式. *矿物学报*, 35(S1): 895-896

刘应忠. 2008. 铜镍矿床地球化学模式的应用: 在贵州西部寻找隐伏铜镍矿床(含矿岩体)的探讨. *贵州地质*, 25(3): 208-211, 217

栾文楼, 温小亚, 马忠社, 崔邢涛, 宋泽峰, 杜俊. 2008. 冀东平原土壤中重金属元素的地球化学特征. *现代地质*, 22(6): 939-947

罗艳碧, 黄智龙, 肖宪国, 丁伟. 2014. 贵州独山锑矿田成矿元素含量及其地质意义. *矿物学报*, 34(2): 247-253

孟飞, 刘敏, 崔健. 2008. 上海农田土壤重金属含量的空间分析. *土壤学报*, 45(4): 725-728

潘金权, 伍登浩. 2017. 黔南独山与黔西南晴隆锑矿田成矿流体与物质来源对比研究. *地质科技情报*, 36(4): 123-132

钱汉东, 陈武, 胡勇. 1995. 黔西南、桂北地区微细浸染型金矿床砷、锑、汞、铊元素及矿物组合特征. *高校地质学报*, 1(2): 45-52

阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 陈萍, 连宾. 2015. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害. *地球与环境*, 43(1): 92-97

宋春然, 何锦林, 谭红, 邓秋静, 谢锋, 吉玉碧, 陈安宁. 2005. 贵州省农业土壤重金属污染的初步评价. *贵州农业科学*, 33(2): 13-16

孙国胜, 胡瑞忠, 苏文超, 王国芝, 朱赖民. 2003. 扬子地块西南缘低温成矿域 Au、Sb、Hg、As 矿床区域分布上的共生分异及控制因素. *地质地球化学*, 31(4): 50-55

王娟, 孙爱平, 王开营, 沈永平, 张延成, 王锦贵. 2011. 土壤样品采集的原则与方法. *现代农业科技*, (21): 300-301

- 王小燕. 2010. 贵州省万山汞矿地区食物、人群重金属暴露及其对人体健康损伤研究. 硕士学位论文. 成都: 四川师范大学
- 王兴富, 顾秉谦. 2016. 贵州地区下寒武统黑色岩系区“多元素”富集矿层分析及土壤重金属污染研究进展. 贵州科学, 34(5): 63-68
- 卫永华, 张小强. 2017. 贵州省独山县半坡-高寨锑矿床地质特征及成因浅析. 低碳世界, (25): 95-96
- 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 郑春江. 1991. 中国土壤环境背景值研究. 环境科学, 12(4): 12-19
- 吴从文. 2017. 铅锌矿床成矿流体特征及矿床成因分析. 资源信息与工程, 32(1): 30-31
- 严莎, 凌其聪, 严森, 鲍征宇, 陈忠大, 彭振宇. 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
- 叶霖, 刘铁庚. 2001. 贵州都匀牛角塘富镉锌矿床中镉的分布及赋存状态探讨. 矿物学报, 21(1): 115-118
- 余冲. 2017. 贵州晴隆大厂锑矿流体包裹体特征研究及意义. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学
- 喻子恒, 黄国培, 张华, 李秋华, 钟顺清, 张玉涛, 商立海. 2017. 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. 生态学杂志, 36(8): 2296-2301
- 张莉, 周康. 2005. 贵州省土壤重金属污染现状与对策. 贵州农业科学, 33(5): 114-115
- 张清海, 陆洋, 罗艳, 谢锋, 舒海霞. 2008. 贵州省典型农业区土壤重金属污染及在蔬菜中的富集研究. 中国环境监测, 24(6): 73-76
- 张庆华, 张伦尉, 杨涛, 刘开坤, 李丙霞. 2012. 贵州遵义地区黑色岩系多金属矿层研究进展. 矿产勘查, 3(5): 583-588
- 张玉涛, 程劲松, 李琳, 赵荣飞, 刘华. 2014. 安顺市煤矿区菜园土壤重金属含量及其赋存特征研究. 蔬菜, (7): 5-9
- 张志杰. 1985. 滇黔桂锑矿成矿规律初步探讨. 贵州地质, 2(3): 193-204
- 郑永红, 张治国, 姚多喜, 陈孝杨. 2013. 煤矿复垦区土壤重金属含量时空分布及富集特征研究. 煤炭学报, 38(8): 1476-1483
- 周长松, 邹胜章, 李录娟, 朱丹尼, 夏日元, 曹建文. 2015. 桂林毛村3种石灰土Cd形态分配特征及影响因素分析. 环境科学与技术, 38(12): 104-109
- 朱丹尼. 2016. 岩溶区典型石灰性土壤对Cd²⁺的吸附解吸特性. 硕士学位论文. 北京: 中国地质大学(北京)

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 肖保华)

(上接第 1061 页)

- Vander Auwera J, Bolle O, Bingen B, Liégeois J P, Bogaerts M, Duchesne J C, De Waele B, Longhi J. 2011. Sveconorwegian massif-type anorthosites and related granitoids result from post-collisional melting of a continental arc root. *Earth-Science Reviews*, 107(3-4): 375-397
- Wang M, Veksler I, Zhang Z C, Hou T, Keiding J K. 2017. The origin of nelsonite constrained by melting experiment and melt inclusions in apatite: The Damiao anorthosite complex, North China Craton. *Gondwana Research*, 42: 163-176
- Westphal M, Schumacher J C, Boschert S. 2003. High-temperature metamorphism and the role of magmatic heat sources at the Rogaland Anorthosite Complex in Southwestern Norway. *Journal of Petrology*, 44(6): 1145-1162
- Wiebe R A. 1990. Evidence for unusually feldspathic liquids in the Nain Complex, Labrador. *American Mineralogist*, 75(1-2): 1-12
- Wiebe R A. 1992. Proterozoic anorthosite complexes. In: *Condie K C, ed. Proterozoic Crustal Evolution*. Amsterdam: Elsevier, 215-261
- Wisniewska J, Claesson S, Stein H J, Vander Auwera J, Duchesne J C. 2002. The north-eastern Polish anorthosite massifs: Petrological, geochemical and isotopic evidence for a crustal derivation. *Terra Nova*, 14(6): 451-460
- Zhang S H, Liu S W, Zhao Y, Yang J H, Song B, Liu X M. 2007. The 1.75 - 1.68 Ga anorthosite-mangerite-alkali granitoid-rapakivi granite suite from the northern North China Craton: Magmatism related to a Paleoproterozoic orogen. *Precambrian Research*, 155(3-4): 287-312
- Zhao T P, Chen W, Zhou M F. 2009. Geochemical and Nd-Hf isotopic constraints on the origin of the ~1.74 Ga Damiao anorthosite complex, North China Craton. *Lithos*, 113(3-4): 673-690
- 陈伟, 赵太平. 2007. 元古宙岩体斜长岩的特征及研究现状. *高校地质学报*, 13(1): 117-126
- 李立兴, 李厚民, 陈正乐, 王登红, 陈伟. 2010. 河北承德黑山铁矿床热液成矿特征及流体包裹体研究. *岩石学报*, 26(3): 858-870
- 赵太平, 陈伟, 卢冰. 2010. 斜长岩体中Fe-Ti-P矿床的特征与成因. *地学前缘*, 17(2): 106-117

(本文责任编辑: 龚超颖; 英文审校: 张兴春)