

云南会泽东北部地区重金属环境污染评价

黄家鑫¹⁾, 许胜超²⁾, 龚庆杰^{1)*}, 陈子万²⁾, 黄 钊²⁾

1) 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2) 云南省地质调查院, 云南昆明 650216

摘 要: 按照多目标地球化学填图计划, 云南省地质调查院开展了“云南省滇中-滇东北地区 1:25 万土地质量地球化学调查”工作, 获得了 54 项元素或氧化物的含量数据。本文基于此次调查中云南会泽东北部地区的 182 件表层土壤样品, 参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管制标准(试行)》(GB15618—2018), 基于新标准本文提出农用地重金属单项污染指数和综合污染指数的计算及其定性赋值方法。对于标准中背景级、筛选级、管制级的定性分级, 在单项污染指数中分别赋值 0、1、10, 而综合污染指数取值为单项污染指数取值的累加。针对研究区 5 个重金属 Pb、Cd、As、Cr、Hg 进行了农用地环境质量评价。结果表明, 研究区土壤的 pH 值介于 4.66~8.16, 土壤整体偏酸性; Pb 和 Cd 含量局部高于 GB15618—2018 规定的污染风险管制值; Cr 和 As 含量局部高于土壤污染风险筛选值, 但均低于管制值; Hg 含量均低于污染风险筛选值。为便于重金属单项污染指数和综合污染指数的计算, 本文开发了 EGAPI-GB15618 软件供参考使用。

关键词: 云南会泽; 重金属; 环境评价; 污染指数; EGAPI-GB15618

中图分类号: X825; P595 **文献标志码:** A **doi:** 10.3975/cagsb.2022.010701

Environmental Assessment of Heavy Metal Contamination in the Northeast of Huize County, Yunnan Province

HUANG Jia-xin¹⁾, XU Sheng-chao²⁾, GONG Qing-jie^{1)*}, CHEN Zi-wan²⁾, HUANG Zhao²⁾

1) China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;
2) Yunnan Geological Survey Institute, Kunming, Yunnan 650216

Abstract: According to the National Multi-Purpose Regional Geochemical Survey (NMPRGS) project, the geochemical survey project of land quality with a scale of 1: 250 000 in the center and northeast of Yunnan province has been completed. Fifty-four items (including pH, major oxides, and elements) were analyzed in each composite surface soil sample per 4 km² in this project. Based on the 182 surface soil samples collected in the northeast of Huize county in Yunnan province and the Soil Environmental Quality (SEQ) risk control standard for soil contamination of agricultural land in China (GB15618-2018), the environmental quality of the study area was evaluated on 5 heavy metals (Pb, Cd, As, Cr and Hg) using a new single pollution index and integrated pollution index proposed in this paper with qualitative descriptions. For samples with no pollution, screening pollution or controlling pollution, the single pollution index is set to 0, 1 or 10 respectively, and the integrated pollution index is set to the sum of the single pollution index values. The soil in this area is generally acidic, and its pH varies from 4.66 to 8.16. Some contents of Pb and Cd are higher than the environmental pollution control values stipulated in GB15618-2018 for agricultural land. Both Cr and As contents are all lower than the control values although some contents are higher than the screening values of pollution risk. In addition, all contents of Hg were lower than the screening value for agricultural lands. Therefore, it is suggested to control the environmental pollution of Pb and Cd and to monitor the contents of Cr and As in the soil if the area is used for agriculture.

本文由中国地质调查局地质调查项目“云南省滇中-滇东北地区 1:25 万土地质量地球化学调查项目”(编号: DD20160313-04)资助。

收稿日期: 2021-11-18; 改回日期: 2021-12-26; 网络首发日期: 2022-01-08。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 黄家鑫, 男, 1997 年生。硕士研究生。地球化学专业。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。

E-mail: hjxcugb@163.com。

*通讯作者: 龚庆杰, 男, 1972 年生。博士, 教授, 博士生导师。主要从事元素地球化学和勘查地球化学的教学与科研工作。

通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。E-mail: qjiegong@cugb.edu.cn。

Meanwhile, the pollution risk of Hg in the soil could be ignored according to the survey results. To calculate the single and integrated pollution indices proposed in this paper, software named EGAPI-GB15618 was developed non-commercially.

Key words: Huize county of Yunnan province; heavy metals; environmental assessment; pollution indices; EGAPI-GB15618

土壤重金属环境问题一直受到人们的重视(王英辉等, 2007; 陈翠华等, 2008; 刘青枰等, 2018; Liu et al., 2018; Xu et al., 2021), 2014 年国家环境保护部和国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示, 西南地区土壤重金属超标范围较大, 工矿业(尤其是金属矿的开采和冶炼)、农业等人为活动以及土壤环境背景值高是造成土壤污染或超标的主要原因(李瑞萍等, 2009; 国土资源部和环境保护部, 2014; 骆永明和滕应, 2018)。

按照全国多目标地球化学填图计划, 为进一步调查西南地区土壤重金属状况, 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所开展了“西南重金属高背景区 1:25 万土地质量地球化学调查”项目, 其子项目“云南省滇中-滇东北地区 1:25 万土地质量地球化学调查”工作由云南省地质调查院于 2016—2018 年完成, 获得了 54 项元素或氧化物的含量数据(云南省地质调查院, 2019)。本文基于这次调查数据和新颁布的国家标准(GB15618—2018), 针对会泽东北部地区开展重金属污染环境评价研究。

1 区域地质背景

研究区位于云南省曲靖市会泽县东北部, 地理坐标范围为东经 103°35′30″—103°53′49″, 北纬 26°28′22″—26°50′12″, 面积约 740 km²(图 1)。研究区地貌以山地为主(陆泗进等, 2015), 属亚热带高原季风气候, 夏无酷暑, 冬无严寒, 气候宜人, 年平均气温 12.6℃, 降水比较充沛, 年平均降雨量 817.7 mm(山成栋, 2020)。

区内发育自震旦纪至第四纪各时代地层, 具体岩性简述于图 1 的图注中。区内岩浆岩中侵入岩不发育, 但大面积出露峨眉山玄武岩(P₂₋₃)。研究区构造较发育, 褶皱以北东复式背斜为主, 断裂以近南北向、北东向、北西向断裂为主(韩润生等, 2012)。区内金属矿产以铅锌多金属矿床为主(张长青, 2008; 杨斌等, 2018), 代表性矿床为位于矿山镇境内的会泽超大型铅锌矿(黄智龙等, 2004)。会泽超大型铅锌矿主要包括矿山厂和麒麟厂两个矿段(张艳等, 2017; 李志平等, 2018; 江小均等, 2018)。

前人对会泽地区土壤重金属环境评价主要集中在重金属元素含量特征、对照《土壤环境质量标准》(GB15618—1995)(原来的标准)评价重金属超标

程度并探索可能的污染来源等方面, 其数据处理方法包含污染指数的计算和统计分析(房辉和曹敏, 2009; 陆泗进等, 2014, 2015; 吴劲楠等, 2018)。2018 年生态环境部和国家市场监督管理总局联合发布新的《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管制标准(试行)》(GB15618—2018)(生态环境部和国家市场监督管理总局, 2018), 重金属污染环境状况需要基于新的标准进行评价, 如叶金利等(2019)对云南会泽县者海镇矿区 226 个土壤样品按照新标准中污染风险筛选值针对 Pb、As、Cd、Zn、Cu、Cr、Hg 共计 7 个重金属进行了污染评价, 结果发现 Pb、Cd、Cu、Zn 平均值均超标, 而 As、Cr、Hg 的平均值均达标。叶金利等的研究区位于本次研究区西南部的新店子村—胡家坡一带(图 1)。

2 样品与方法

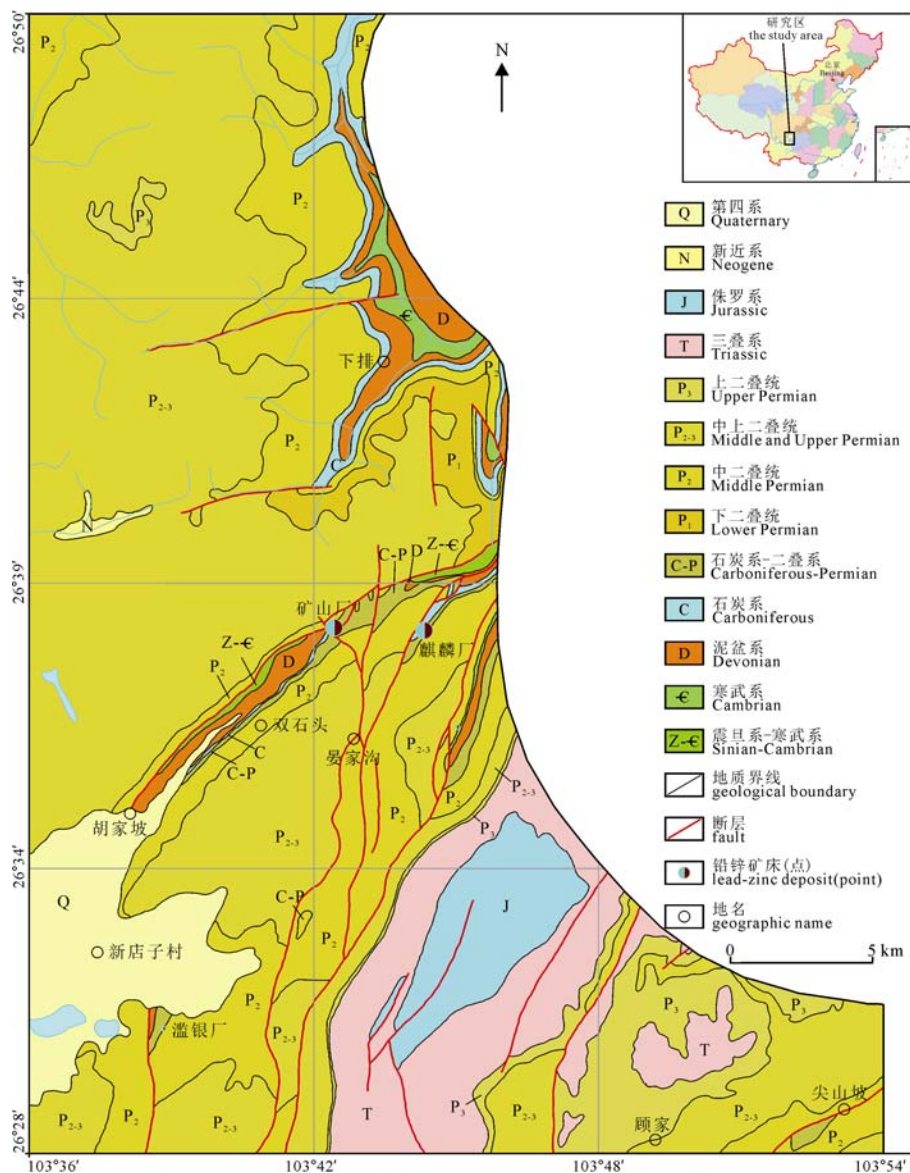
2.1 样品

在研究区共采集 182 件表层土壤样品, 表层土壤样品采样点的布设工作遵循《多目标区域地球化学调查规范(1:25 万)》(DZ/T 0258—2014)的要求。野外采样工作参照叠加了土地利用类型图的 1:5 万地形图, 采样密度一般为 1 点/km²。采样位置的选择根据地形地貌、土壤类型、土地利用分布等实际情况而定, 基于手持卫星导航仪(GPS)定点。

表层土壤样品主要采集耕作层的表层土壤, 为增强样品的代表性, 一个表层土壤样品一般由多个子样组合而成。首先在中心子样点垂直向地下挖掘深大于 20 cm 的采样坑, 通过专用采集镐沿坑壁垂直以刻槽方式均匀采集 0~20 cm 段土壤样品, 去除植物根系、砾石、砖瓦块、肥料团块等杂物后装入布袋中。在中心子样点周围 100 m 范围内 3~5 处多点采集子样, 将子样组合成一个样品, 并保证原始样品重量大于 1000 g。样品采好后系紧布袋口, 外套聚乙烯塑料袋。

通过日光自然晾晒及 50℃ 以下低温烘干样品, 在干燥过程中经常揉搓或用木棒轻轻敲打, 使土壤样品恢复自然粒级状态。清除杂质后过 20 目筛, 在干净的蜡光纸或塑料薄膜上充分拌匀、缩分、称重后, 装入聚乙烯瓶中。

表层土壤样品采用大格组合样测试分析, 即把 4 km² 内的所有样品取出、单个混匀后, 称取等量组



据中国地质调查局中国陆域 1:25 万分幅建造构造图 G48C002002(左群超等, 2018)修编, 图中灰色网格线间距为 10 km。

岩性简述: 第四系黏土与砂砾; 新近系砂岩、砾岩; 侏罗系砂岩、泥岩; 三叠系灰岩、黏土岩、砂岩、泥-页岩; 上二叠统灰岩、碎屑岩; 中上二叠统峨眉山玄武岩组拉斑玄武岩; 中二叠统灰岩、碎屑岩; 下二叠统灰岩; 石炭系—二叠系灰岩; 石炭系白云岩、灰岩; 泥盆系灰岩、白云岩、砂岩; 寒武系泥岩、砂岩、页岩; 震旦系—寒武系磷块岩、白云岩。

According to the spatial database of serial suite-tectonic map-sheets of mainland China G48C002002 (1: 250, 000) (ZUO et al., 2018) of China Geological Survey. The spacing of gray grid lines in the map is 10 km. Lithology description: Quaternary clay and gravel; Neogene sandstone and conglomerate; Jurassic sandstone and mudstone; Triassic limestone, clay rock, sandstone, mudstone and shale; Upper Permian limestone and clastic rock; Middle and Upper Permian Emeishan basalt tholeiite; Middle Permian limestone and clastic rocks; Lower Permian limestone; Carboniferous-Permian limestone; Carboniferous dolomite and limestone; Devonian limestone, dolomite and sandstone; Cambrian mudstone, sandstone and shale; Sinian-Cambrian phosphatic rock and dolomite.

图 1 研究区地质简图

Fig. 1 Regional geological sketch map of the study area

合为一件组合样, 组合样混匀后, 再次过 20 目筛后取 30 g 样品装袋用作 pH 分析, 另取 80 g 左右样品在 60℃ 以下的烘箱中烘干后用无污染的行星球磨机粉碎至 200 目粒度, 以备元素含量测试分析使用。

2.2 样品分析测试方法

样品分析测试在中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所分析测试研究中心和四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心完成, 测定

样品中 54 项指标, 包含本文研究所需的 Pb、Cd、As、Cr、Hg 和 pH。Pb 和 Cd 的含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定, Cr 含量采用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定, As 和 Hg 的含量采用原子荧光光谱法(AFS)测定, pH 采用电位法(POT)测定。具体检测方法详见《多目标区域地球化学调查规范(1:250000): DZ/T 0258—2014》(国土资源部, 2014)。

上述测试方法中 Pb、As、Cr 的检出限分别为 2 μg/g、1 μg/g、5 μg/g, Cd 和 Hg 的检出限分别为

30 ng/g 和 0.5 ng/g。分析质量采用土壤国家一级标样和重复样进行监控,样品分析的准确度、精密度以及重复样分析合格率均达到了多目标地球化学调查所要求的标准。

3 结果与讨论

3.1 含量特征

会泽东北部地区 182 件土壤组合样的 pH 值和 5 项重金属含量的统计参数如表 1 所示。

研究区土壤 pH 介于 4.66~8.16, 其中 96 件样品 $\text{pH} \leq 5.5$, 47 件样品 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$, 28 件样品 $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$, 11 件样品 $\text{pH} > 7.5$, 土壤整体偏酸性。

参照土壤环境质量农用地土壤污染风险管制标准 (GB15618—2018): ① Pb 含量介于 19~1360 $\mu\text{g/g}$, 其中 7 件样品 Pb 含量高于污染风险管制值, 37 件样品含量介于污染风险筛选值和管制值之间, 138 件样品 Pb 含量低于污染风险筛选值; ② Cd 含量介于 440~21700 ng/g, 其中 45 件样品 Cd 含量高于污染风险管制值, 137 件的含量介于污染风险筛选值和管制值之间; ③ As 含量介于 2.89~50.7 $\mu\text{g/g}$, 其中 6 件样品 As 含量介于污染风险筛选值和管制值之间, 176 件含量低于污染风险筛选值; ④ Cr 含量介于 59.3~431 $\mu\text{g/g}$, 其中 66 件样品 Cr 含量介于污染风险筛选值和管制值之间, 116 件含量低于污染风险筛选值; ⑤ Hg 含量介于 28~1280 ng/g, 182 件样品 Hg 含量均低于污染风险筛选值。

3.2 污染指数

目前有关土壤重金属污染风险评价的研究多集中在含量测定或污染指数计算方面(高瑞英, 2012)。污染指数可分为单项污染指数和综合污染指数(Gong et al., 2008), 单项污染指数主要有污染因子、生态风险因子(Hakanson, 1980)、富集因子(Zoller et al., 1974)、地累积指数等, 综合污染指数主要有内梅罗综合污染指数(Cheng et al., 2007)以及其他基于单项污染指数进行不同运算获得的综合污染指数(Gong et al., 2008)。

参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管

制标准(试行)》(GB15618—2018)中的其他农用地标准对会泽东北部地区土壤进行重金属污染风险评价。依据 GB15618—2018, 可将土壤样品的重金属污染风险划分为 3 级: 当重金属含量低于污染风险筛选值时可以忽略其风险而将其划分为无风险级, 或称为背景级; 当介于筛选值和管制值之间时认为可能存在污染风险而将其划分为监测级; 当大于或等于管制值时认为污染风险高而将其划分为管制级(李金哲等, 2021)。本文提出基于筛选值和管制值的重金属单项污染指数和综合污染指数, 以便实现从定量计算到定性描述的土壤重金属污染评价等级, 并将其应用于研究区以查明会泽东北部地区重金属的污染状况。

3.2.1 单项污染指数

依据 GB15618—2018 中风险筛选值(Risk Screen value)和风险管制值(Risk Intervention value)的划分, 单项污染指数 PI (Pollution Index)的定义为:

$$PI = \begin{cases} 0 & C < C_{RS} \\ 1 & C_{RS} \leq C < C_{RI} \\ 10 & C_{RI} \leq C \end{cases} \quad (1)$$

式中, PI 为单项污染指数, C 为样品中元素的含量, C_{RS} 为元素的农用地土壤污染风险筛选值, C_{RI} 为元素的农用地土壤污染风险管制值。即元素含量大于其风险管制值时 PI 赋值为 10, 介于管制值和筛选值之间时赋值为 1, 低于筛选值时赋值为 0。

按照式(1)针对 Pb、Cd、As、Cr、Hg 这 5 种元素对研究区 182 件样品计算其单项污染指数, 进而绘制单项污染指数地球化学图, 通过不同色阶直观表达区域内重金属污染的空间分布(An et al., 2022)。研究区 5 中元素的单项污染指数地球化学剖析图如图 2 所示。

会泽东北部地区 182 件土壤样品中, 5 种重金属的单项污染指数结果表明:

①对于 Pb 元素, 7 件样品的 PI 值为 10, 属于管制级; 37 件样品的 PI 值为 1, 属于监测级; 138 件样品的 PI 值为 0, 属于无风险级。这表明会泽东北部地区仅局部属于农用地管制级, 主要出现在会泽超大型铅锌矿的矿山厂和麒麟厂矿段以及胡家坡西部

表 1 会泽东北部地区土壤地球化学测试指标统计参数

Table 1 Statistical parameters of the analytical values of soil samples in the northeast of Huize area

元素	最小值	中位值	最大值	平均值	标准差	变异系数
pH	4.66	5.43	8.16	5.76	0.875	0.15
Pb	19.0	45.3	1360	98.3	164	1.67
Cd	440	1120	21720	1709	2205	1.29
As	2.89	9.91	50.7	12.3	8.41	0.68
Cr	59.3	128	431	158	81.3	0.52
Hg	28	97	1277	152	171	1.13

注: pH 无单位, Pb、As、Cr 的含量单位为 $\mu\text{g/g}$, Cd 和 Hg 的含量单位为 ng/g, 变异系数=标准差/平均值。

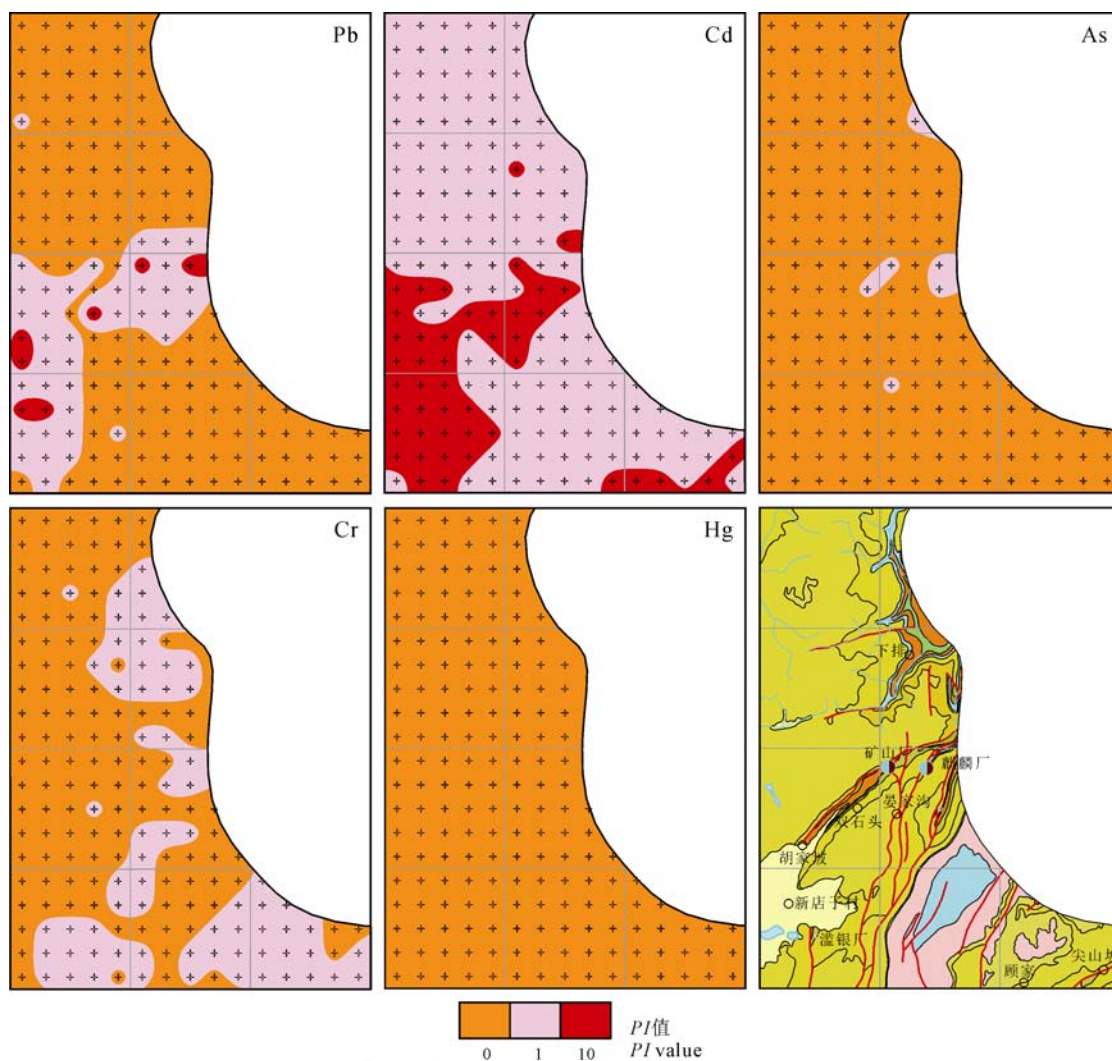


图 2 会泽东北部地区重金属单项污染指数地球化学剖析图

Fig. 2 Geochemical comparison map of single pollution index of heavy metals in the northeast of Huize area

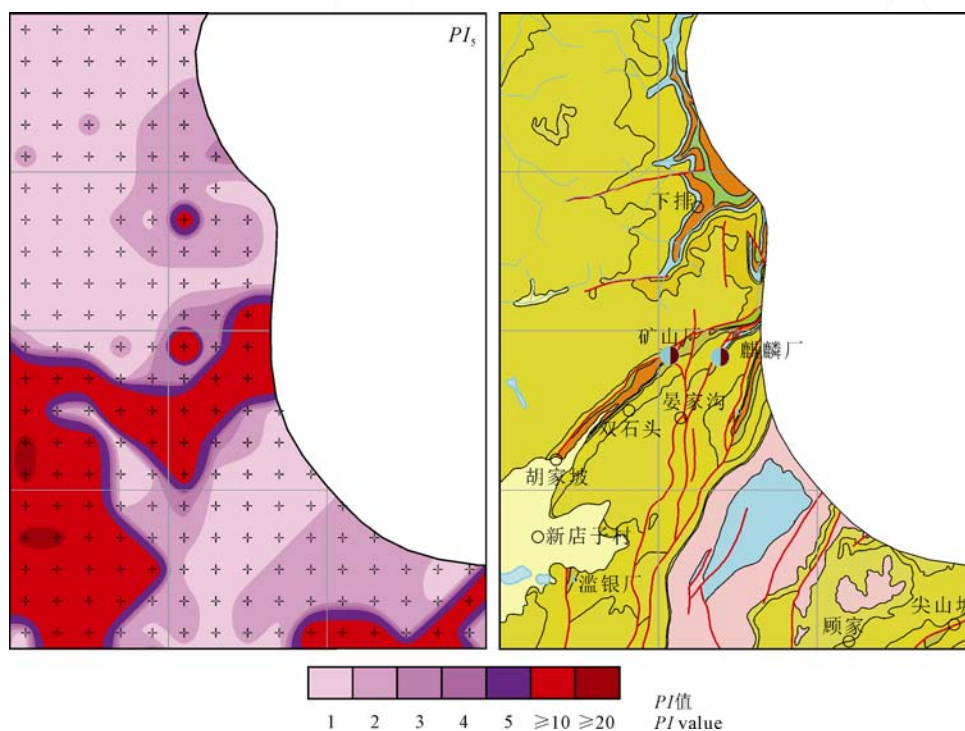


图 3 会泽东北部地区重金属综合污染指数地球化学剖析图

Fig. 3 Geochemical comparison map of integrated pollution index of heavy metals in the northeast of Huize area

和新店子村附近;沿会泽铅锌矿至胡家坡—新店子村的北东向区域农用地属于监测级;其他地区则属于无风险区。

②对于 Cd 元素,45 件样品的 PI 值为 10,属于管制级;137 件样品的 PI 值为 1,属于监测级;无样品的 PI 值为 0。这表明会泽东北部地区农用地整体处于监测级,局部处于管制级,如会泽铅锌矿至胡家坡—新店子村的北东向区域属于农用地管制级。

③对于 As 元素,无管制级样品;6 件样品的 PI 值为 1,其余 176 件样品的 PI 值均为 0。这表明除零星地段外会泽东北部地区整体属于农用地无风险级。

④对于 Cr 元素,无管制级样品;66 件样品的 PI 值为 1;116 件样品的 PI 值为 0。这表明会泽东北部地区局部属于农用地监测级,而大部分区域属于农用地无风险级。

⑤对于 Hg 元素,182 件样品的 PI 值均为 0,属于无风险级。即会泽东北部地区属于农用地无风险级。

综上所述,会泽东北部地区如果均作为非水田的农用地使用,则局部地段如会泽铅锌矿至胡家坡—新店子村的北东向区域属于 Pb、Cd 的污染风险管制级,而 As、Cd 仅在零星或局部地段属于污染风险监测级,Hg 则全区属于无风险级。

3.2.2 综合污染指数

基于上述单项污染指数 PI ,此处将综合污染指数 PI_n 的定义为:

$$PI_n = \sum PI \quad (2)$$

式中, PI_n 为 n 个单项污染指数组成的综合污染指数, PI 为单项污染指数。即将单项污染指数的值累加而形成综合污染指数。

按照式(2)依据 Pb、Cd、As、Cr、Hg 这 5 种元素在研究区 182 件样品中的单项污染指数 PI 值即可计算其综合污染指数 PI_5 。依据式(1)和式(2)可知 PI_5 的理论取值范围为 0、1~5、10~14、20~23、30~32、40~41、50。当 $PI_5 = 0$ 时,表示样品的 5 种重金属含量均小于对应的污染风险筛选值,属于无风险级;当 $0 < PI_5 \leq 5$ 时,表示样品的 5 种重金属含量均小于其污染风险管制值,但可能有 1~5 种重金属含量大于污染风险筛选值,属于监测级;当 $10 \leq PI_5 \leq 50$ 时, PI_5 值的十位数 n 表示 5 种重金属中有 n 种重金属含量大于污染风险管制值,可将其称为 n 级管制。

研究区 182 件样品的 PI_5 值实际取值介于 1~23 之间,其中 136 件样品的 PI_5 值介于 1~5,属于监测级;40 件样品的 PI_5 值介于 10~14,属于 1 级管制;

6 件样品的 PI_5 值介于 20~23,属于 2 级管制。依据 PI_5 计算值绘制综合污染指数 PI_5 的地球化学剖析图如图 3 所示。

依据 GB15618—2018,会泽东北部地区整体属于监测级,局部地区如会泽铅锌矿区、滥银厂矿区、胡家坡—新店子村一带和顾家—尖山坡一带属于管制级,尤其是胡家坡西部和新店子村附近则属于 2 级管制区。

综上所述,会泽东北部地区如果均作为非水田的农用地使用,则局部地段如会泽铅锌矿区、滥银厂矿区、胡家坡—新店子村一带和顾家—尖山坡一带属于管制级;而其他地区则属于监测级。

4 EGAPI 软件

基于上文提出的重金属单项污染指数 PI 和综合污染指数 PI_n ,本文开发出软件 EGAPI GB15618(Ecological Geochemistry Assessment-Pollution Index GB15618)以便计算农用地土壤的重金属污染指数。EGAPI GB15618 在 Visual Studio 环境下使用 C#语言开发,并设计为单文档界面(图 4),用户界面主要分为“选择数据(Select Data)”和“农用地国标(GB15618 Agricultural Land)”两部分。

待计算的数据存储为 Access 格式的数据文件,首先在用户界面左侧的“Select Data”区域打开数据文件(Open Database)并选择数据表(Select Table);然后在用户界面右侧“GB15618 Agricultural Land”区域中的“Select the Single Pollution Indices”部分勾选需要计算单项污染指数的元素,在“Select the Integrated Pollution Index”部分勾选是否计算综合污染指数;最后点击“Calculate Indices”按钮即可实现污染指数的计算。



图 4 EGAPI GB15618 软件用户界面

Fig. 4 User interface of the EGAPI GB15618 software

污染指数的计算结果仍保存在界面左侧所选择的数据表中,可单击界面左侧的“Refresh”文字以进行更新,然后在“Select Data Columns”列表框中进行字段查看。

5 结论

(1)基于 GB15618—2018 提出重金属元素单项污染指数 PI 和综合污染指数 PI_n 的计算方法,以便实现从定量计算到定性描述的土壤重金属污染等级评价。

(2)会泽东北部地区如果作为非水田的农用地使用,则局部地段属于管制级,而其他地段则属于监测级。会泽铅锌矿至胡家坡一新店子村的北东向区域属于 Pb、Cd 的污染风险管制级,而 As、Cd 仅在局部地段处于污染风险监测级, Hg 则全区均属于无风险级。

(3)本文开发了单文档界面的 EGAPI GB15618 软件,以便计算农用地土壤重金属单项污染指数 PI 和综合污染指数 PI_n 。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190317).

参考文献:

- 陈翠华,倪师军,何彬彬,张成江. 2008. 江西德兴矿集区水系沉积物重金属污染的时空对比[J]. 地球学报, 29(5): 639-646.
- 房辉,曹敏. 2009. 云南会泽废弃铅锌矿重金属污染评价[J]. 生态学杂志, 28(7): 1277-1283.
- 高瑞英. 2012. 土壤重金属污染环境风险评价方法研究进展[J]. 科技管理研究, 32(8): 45-50.
- 国家环境保护局. 1995. 《土壤环境质量标准》(GB15618—1995) [S]. 北京: 中国标准出版社: 1-44.
- 国土资源部. 2014. 多目标区域地球化学调查规范 (1: 250000)(DZ/T 0258-2014)[S]. 北京: 中国标准出版社: 1-44.
- 韩润生,胡煜昭,王学琨,黄智龙,陈进,王峰,吴鹏,李波,王洪江,董英,雷丽. 2012. 滇东北富锗银铅锌多金属矿集区矿床模型[J]. 地质学报, 86(2): 280-294.
- 环境保护部,国土资源部. 2014. 全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. [2014-04-17]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm.
- 黄智龙,陈进,韩润生,李文博,刘丛强,张振亮,马德云,高德荣,杨海林. 2004. 云南会泽超大型铅锌矿床地球化学及成因——兼论峨眉山玄武岩与铅锌成矿的关系[M]. 北京: 地质出版社: 1-187.
- 江小均,王忠强,李超,郭忠林,柴建华,邱文龙,王加昇. 2018. 滇东北会泽超大型铅锌矿 Re-Os 同位素特征及喜山期成矿作用动力学背景探讨[J]. 岩矿测试, 37(4): 448-461.
- 李金哲,刘宁强,龚庆杰,李承柱. 2021. 广东汕头市内海湾沉积物重金属环境质量调查与评价[J]. 现代地质, 35(5): 1441-1449.
- 李瑞萍,王安建,曹殿华,耿诺,高兰,邹为雷,赵以辛,修群业. 2009. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中 Pb 分布特征[J]. 地球学报, 30(1): 72-78.
- 李志平,余泽章,罗大锋,李永才,魏江,李惠. 2018. 云南会泽

- 县麒麟厂铅锌矿床构造叠加晕特征及找矿意义[J]. 地质科技情报, 37(2): 109-117.
- 刘青枰,邓时强,赵元艺,李小赛. 2018. 西藏孜尔勒矿床区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. 地球学报, 39(4): 481-490.
- 陆泗进,王业耀,何立环. 2014. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属生态风险评价[J]. 生态环境学报, 23(11): 1832-1838.
- 陆泗进,王业耀,何立环. 2015. 会泽某铅锌矿周边农田土壤重金属风险评价研究[J]. 中国环境监测, 31(6): 77-82.
- 骆永明,滕应. 2018. 我国土壤污染的区域差异与分区治理修复策略[J]. 中国科学院院刊, 33(2): 145-152.
- 山成栋. 2020. 会泽铅锌矿富锗闪锌矿的沉淀机制研究[D]. 北京: 中国地质大学: 1-97.
- 生态环境部,国家市场监督管理总局. 2018. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)(GB15618-2018)[S]. 北京: 中国环境出版社.
- 王英辉,陈学军,赵艳林,祁士华. 2007. 铅锌矿区土壤重金属污染与优势植物累积特征[J]. 中国矿业大学学报, 36(4): 487-493.
- 吴劲楠,龙健,刘灵飞,李娟,廖洪凯,彭四清,万洪富. 2018. 某铅锌矿区农田重金属分布特征及其风险评价[J]. 环境科学, 38(3): 1054-1063.
- 杨斌,金灿海,张巧,冀盘龙,郭阳,王子正. 2018. 云南乌蒙山区毛坪铅锌矿矿床特征及成矿模式研究[J]. 地球学报, 39(5): 592-605.
- 叶金利,田路萍,吴文卫,黄小凤. 2019. 云南会泽者海镇典型矿区场地重金属污染特征及健康风险评价[J]. 环境监测管理, 31(3): 36-40.
- 云南省地质调查院. 2019. 云南省滇中-滇东北地区 1:25 万土地质量地球化学调查成果报告[R]. 昆明: 云南省地质调查院.
- 张艳,韩润生,魏平堂,邱文龙. 2017. 云南会泽矿山厂铅锌矿床流体包裹体特征及成矿物理化学条件[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 47(3): 719-733.
- 张长青. 2008. 中国川滇黔交界地区密西西比型(MVT)铅锌矿床成矿模型[D]. 北京: 中国地质科学院: 1-167.
- 左群超,叶天竺,冯艳芳,葛佐,王英超. 2018. 中国陆域 1: 25 万分幅建造构造图空间数据库[J]. 中国地质, 45(S1): 1-26, 163.

References:

- AN Yong-long, YAN Tao-tao, GONG Qing-jie, WANG Xue-qiu, HUANG Yong, ZHANG Bi-min, YIN Zhi-qiang, ZHAO Xiu-fang, LIU Ning-qiang. 2022. Chromium(Cr) geochemical mapping based on fixed-values' method: Case studies in China[J]. Applied Geochemistry, 136: 105168.
- CHEN Cui-hua, NI Shi-jun, HE Bin-bin, ZHANG Cheng-jiang. 2008. Spatial-temporal variation of heavy metals contamination in sediments of the Dexing Mine, Jiangxi Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 29(5): 639-646(in Chinese with English abstract).
- CHENG Jie-liang, SHI Zhou, ZHU You-wei. 2007. Assessment and mapping of environmental quality in agricultural soils of Zhejiang Province, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 19: 50-54.
- FANG Hui, CAO Min. 2009. Assessment of heavy metals pollution in abandoned lead-zinc mine tailings in Huize of Yunnan Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 28(7): 1277-1283(in Chinese with English abstract).
- GAO Rui-ying. 2012. Progress of environmental risk assessment methods on heavy metal contamination in soil[J]. Science and Technology Management Research, 32(8): 45-50(in Chinese with English abstract).
- GONG Qing-jie, DENG Jun, XIANG Yun-chuan, WANG Qingfei, YANG Li-qiang. 2008. Calculating pollution indices by heavy metals in ecological geochemistry assessment and a case

- study in parks of Beijing[J]. *Journal of China University of Geosciences*, 19(3): 230-241.
- HAKANSON L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975-1001.
- HAN Run-sheng, HU Yu-zhao, WANG Xue-kun, HUANG Zhi-long, CHEN Jin, WANG Feng, WU Peng, LI Bo, WANG Hong-jiang, DONG Ying, LEI Li. 2012. Mineralization model of rich Ge-Ag-Bearing Zn-Pb polymetallic deposit concentrated district in northeastern Yunnan, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 86(2): 280-294(in Chinese with English abstract).
- HUANG Zhi-long, CHEN Jin, HAN Run-sheng, LI Wen-bo, LIU Cong-qiang, ZHANG Zhen-liang, MA De-yun, GAO De-rong, YANG Hai-lin. 2004. Geochemistry and genesis of the Huize super large lead-zinc deposit in Yunnan province: in addition to a discussion of relationship between Emeishan Basalt and lead-zinc mineralization[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-187(in Chinese).
- JIANG Xiao-jun, WANG Zhong-qiang, LI Chao, GUO Zhong-lin, CHAI Jian-hua, QIU Wen-long, WANG Jia-sheng. 2018. Re-Os isotope characteristics of the Huize ultra-large lead-zinc deposit, northeastern Yunnan Province: Constraints on the Himalayan metallogenic dynamic background[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 37(4): 448-461(in Chinese with English abstract).
- LI Rui-ping, WANG An-jian, CAO Dian-hua, GENG Nuo, GAO Lan, ZOU Wei-lei, ZHAO Yi-xin, XIU Qun-ye. 2009. Distribution of Pb in soils of the Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(1): 72-78(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-ping, YU Ze-zhang, LUO Da-feng, LI Yong-cai, WEI Jiang, LI Hui. 2018. Characteristics of structural superimposed halos and exploration significance of the Qilinchang Pb-Zn Deposit, Huize, Yunnan[J]. *Geological Science and Technology Information*, 37(2): 109-117(in Chinese with English abstract).
- LI Jin-zhe, LIU Ning-qiang, GONG Qing-jie, LI Cheng-zhu. 2021. Investigation and evaluation on environmental quality of heavy metals in sediments of the inland bay of Shantou City, Guangdong Province[J]. *Geoscience*, 35(5): 1441-1449(in Chinese with English abstract).
- LIU Guan-nan, WANG Juan, LIU Xuan, LIU Xin-hui, LI Xiao-sai, REN Ya-qiong, WANG Jing, DONG Li-ming. 2018. Partitioning and geochemical fractions of heavy metals from geogenic and anthropogenic sources in various soil particle size fractions[J]. *Geoderma*, 312: 104-113.
- LIU Qing-ping, DENG Shi-qiang, ZHAO Yuan-yi, LI Xiao-sai. 2018. Sources analysis and element geochemical characteristics of regional soil heavy metals from the Ga'erqin Ore Deposit, Tibet[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(4): 481-490(in Chinese with English abstract).
- LU Si-jin, WANG Ye-yao, HE Li-huan. 2014. Heavy metal pollution and ecological risk assessment of the paddy soils around a Pb-Zn mine in Huize Country[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 23(11): 1832-1838(in Chinese with English abstract).
- LU Si-jin, WANG Ye-yao, HE Li-huan. 2015. Ecological and health risk of heavy metals in soils near a Pb-Zn mine in Huize Country[J]. *Environmental Monitoring in China*, 31(6): 77-82(in Chinese with English abstract).
- LUO Yong-ming, TENG Ying. 2018. Regional difference in soil pollution and strategy of soil zonal governance and remediation in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 33(2): 145-152(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology And Environment, State Administration for Market Regulation. 2018. Soil environmental quality—Risk control standard for soil contamination of agricultural land(GB15618-2018)[S]. Beijing: China Environmental Press(in Chinese).
- Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land And Resources. Report on the national general survey of soil contamination[EB/OL]. [2014-04-17]. https://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670_wh.htm(in Chinese).
- Ministry of Land and Resources. 2014. Specification of multi-purpose regional geochemistry survey(1: 250000):(DZ/T 0258-2014)[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd: 1-44(in Chinese).
- National Environmental Protection Bureau. 1995. GB15618-1995 the National Soil Environmental Quality Standard[S]. Beijing: Standards Press of China (in Chinese).
- SHAN Cheng-dong. 2020. Study on the precipitation mechanism of germanium-rich sphalerite in Huize lead-zinc mine[D]. Beijing: China University of Geosciences: 1-97(in Chinese with English abstract).
- WANG Ying-hui, CHEN Xue-jun, ZHAO Yan-lin, QI Shi-hua. 2007. Heavy metal pollution in soils and plant accumulation in a restored lead-zinc mineland in Guangxi, South China[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 36(4): 487-493(in Chinese with English abstract).
- WU Jin-nan, LONG Jian, LIU Ling-fei, LI Juan, LIAO Hong-kai, PENG Si-qing, WAN Hong-fu. 2018. Spatial distribution and risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil of a lead-zinc mining area[J]. *China Environmental Science*, 38(3): 1054-1063(in Chinese with English abstract).
- XU Lei, DAI Hui-ping, SKUZA Lidia, WEI Shu-he. 2021. Comprehensive exploration of heavy metal contamination and risk assessment at two common smelter sites[J]. *Chemosphere*, 285: 131350.
- YANG Bin, JIN Can-hai, ZHANG Yu, JI Pan-long, GUO Yang, WANG Zi-zheng. 2018. Ore deposit characteristics and metallogenic model of the Maoping Pb-Zn Deposit in Wumengshan Mountainous area, Yunnan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 39(5): 592-605(in Chinese with English abstract).
- YE Jin-li, TIAN Lu-ping, WU Wen-wei, HUANG Xiao-feng. 2019. Characteristics and health risk assessment of heavy metal pollution in typical mining area in Zhehai, Huize County, Yunnan Province[J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 31(3): 36-40(in Chinese with English abstract).
- Yunnan Geological Survey Institute. 2019. Geochemical Survey Report of Land Quality in northeastern and central Yunnan province(1: 250,000)[R]. Kunming: Yunnan Geological Survey Institute(in Chinese).
- ZHANG Chang-qing. 2008. The genetic model of Mississippi Valley-type deposits in the boundary area of Sichuan, Yunnan and Guizhou provinces, China[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences: 1-167(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yan, HAN Run-sheng, WEI Ping-tang, QIU Wen-long. 2017. Fluid inclusion features and physicochemical conditions of the Kuangshanchang Pb-Zn Deposit, Huize, Yunnan Province[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 47(3): 719-733(in Chinese with English abstract).
- ZOLLER W H, GLADNEY E S, DUCE R A. 1974. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. *Science*, 183(4121): 198-200.
- ZUO Qun-chao, YE Tian-zhu, FENG Yan-fang, GE Zuo, WANG Ying-chao. 2018. Spatial database of serial suite-tectonic map-sheets of mainland China(1: 250, 000)[J]. *Geology in China*, 45(S1): 1-26, 163(in Chinese with English edition).