



移动阅读

程琰勋, 赵萌生, 张亚, 等, 2024. 滇中姚安地区土壤重(类)金属来源分析及生态风险评价[J]. 沉积与特提斯地质, 44(1): 172–184. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02005)

CHENG Y X, ZHAO M S, ZHANG Y, et al., 2024. Sources analysis and ecological risk assessment of soil heavy metals and metalloids in Yao'an area of central Yunnan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 44(1): 172–184. doi: [10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02005](https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02005)

滇中姚安地区土壤重(类)金属来源分析及生态风险评价

程琰勋^{1,2}, 赵萌生^{1,2}, 张亚^{1,2}, 徐磊^{1,2}, 徐杰^{1,2}, 黄加忠^{1,2}, 杨明龙^{1,2},
涂春霖^{1,2,3}, 李怡颖^{1,3}

(1. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 云南 昆明 650100; 2. 自然资源部自然生态系统碳汇工程技术创新中心, 云南 昆明 650100; 3. 西南山地生态地质演化与保护修复创新基地, 云南 昆明 650100)

摘要: 为了解滇中姚安地区表层土壤重(类)金属的污染特征、来源及生态风险状况, 在研究区共采集表层土壤样品428件, 对其中As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb和Zn元素的含量进行测试分析。通过数据统计分析和地球化学图说明了这些重(类)金属元素的含量分布特征和空间分布特征。运用相关性分析、主成分分析和聚类分析方法探究了重(类)金属的来源。运用地累积指数法、富集系数法和潜在生态危害指数法对研究区土壤重(类)金属污染程度及潜在生态风险进行了评价。研究表明, As、Cu、Pb和Zn受自然背景与矿产开采共同影响; Cr、Ni主要来源于成土母质; 而Cd受矿产开采和农业施肥的影响较大; Hg则受周边工厂以及煤炭燃烧的影响。地累积指数和富集系数分析表明, 研究区污染程度普遍不高, 但局部地区有重(类)金属元素的污染富集, 代表元素为Cd和Hg。而潜在生态危害指数法分析结果也表明Cd和Hg是研究区最主要的风险元素, 但以轻度和中度生态危害为主, 强生态危害分布面积较小, 研究区生态风险整体较低, 风险可控。本研究对滇中地区的土壤重(类)金属的污染评价和土地利用发展规划有一定的参考作用。

关键词: 土壤; 重(类)金属; 来源分析; 风险评价; 滇中

中图分类号: P596

文献标识码: A

Sources analysis and ecological risk assessment of soil heavy metals and metalloids in Yao'an area of central Yunnan

CHENG Yanxun^{1,2}, ZHAO Mengsheng^{1,2}, ZHANG Ya^{1,2}, XU Lei^{1,2}, XU Jie^{1,2},
HUANG Jiazhong^{1,2}, YANG Minglong^{1,2}, TU Chunlin^{1,2,3}, LI Yiyang^{1,3}

(1. Kunming General Survey of Natural Resources Center of China Geological Survey, Kunming 650100, China; 2. Technology Innovation Center for Natural Ecosystem Carbon Sink, Ministry of Natural Resources, Kunming 650100, China; 3. Innovation Base for Eco-geological Evolution, Protection and Restoration of Southwest Mountainous Areas, Geological Society of China, Kunming 650100, China)

Abstract: A suite of 428 surface soil samples were collected in the Yao'an area of central Yunnan area to evaluate the pollution characteristics, sources, and ecological risks associated with the heavy metals and metalloids such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn. The concentrations and spatial distribution characteristics of these heavy metal elements are illustrated through statistical data analysis and geochemical maps. The sources of heavy metals and metalloids were explored using correlation analysis, principal

收稿日期: 2022-09-08; 改回日期: 2022-12-26; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 刘洪

作者简介: 程琰勋(1991—), 男, 工程师, 主要从事地球化学相关工作, E-mail: 2553407445@qq.com

资助项目: 中国地质调查局项目(ZD20220211, DD20242312)

component analysis, and cluster analysis methods. The degree of heavy metal pollution and potential ecological risks were evaluated by the geo-accumulation index method, the enrichment factor method, and the potential ecological risk index method. The results show that As, Cu, Pb and Zn are influenced by the natural background and mineral mining. Cr and Ni mainly reflect soil parent materials; Cd enrichment is associated with mineral mining and agricultural fertilizer use. Hg is affected by surrounding factory emissions and coal combustion. The analysis of the Geo-accumulation Index and Enrichment Factor showed that the pollution degree in the study area was generally not high; however, there was local enrichment of the heavy metals such as Cd and Hg. The potential ecological risk index method also showed that Cd and Hg are the most important risk elements in the study area, but they are mainly mild and moderate ecological hazards. The distribution area of strong ecological hazards is small, and the overall ecological risk in the study area is low and controllable. Our study provides a current assessment of soil heavy metal and metalloid pollution in the study area that can be used to guide future land-using plan in central Yunnan.

Key words: soil; heavy metal and metalloid; source analysis; risk assessment; central Yunnan

0 引言

土壤是人类社会的宝贵资源,它与农业生产和人类生活息息相关,其形成与演化过程与自然环境有着密不可分的关系,同时也受到人类活动的影响。随着工业化的不断发展和城市化进程的加快,土壤重(类)金属污染问题越来越突出(Hu et al., 2017; Zhu et al., 2017)。重(类)金属具有难降解、易蓄积、毒性大以及残留久等特点,对农作物的生长具有严重危害,还可能通过食物链进入人体,这对生态环境系统和人类的健康构成了严重威胁(Liu et al., 2015; Mwesigye et al., 2016),土壤重(类)金属污染问题已引起了全社会的关注与研究(Shi et al., 2018)。

土壤中的重(类)金属来源主要分为“地质成因”和“人为来源”两类(Liang et al., 2017)。地质成因主要为土壤母质,表现为对成土母岩矿物元素的继承性和母岩风化成土过程中重(类)金属元素的次生富集作用;人为来源可分为工业源(采矿、冶炼、化工等)、农业源(肥料、农药、废水灌溉等)和生活源(汽车尾气、生活垃圾、生活燃煤等)。所以,对重(类)金属来源的识别和风险评价就显得愈加重要,这对于减少重(类)金属的污染尤为关键(Padoan et al., 2017)。当前,关于评价土壤中重(类)金属污染的方法较多,如富集系数法(赵庆令等, 2015; N'GUESSAN, 2009)、地累积指数法(陈航等, 2022)、单因子指数法(Ogunkunle and Fatoba, 2013; 柳云龙等, 2012)、内梅罗综合指数法(王玉等, 2022)、污染负荷指数法(Tomlinson et al., 2019; 徐争启等, 2004)、层次分析法(岑静等, 2008)、潜在生态危害指数法(李苹等, 2018; Tian et al., 2017)、

健康风险评价方法(Jin et al., 2019; Khan et al., 2013)等。由于每种评价方法都有其优点和局限性,所以有必要采用多种方法进行综合评价,以便相互借鉴和补充,使评价结果更符合实际情况(周亚龙等, 2019)。

有关滇中地区的土壤重(类)金属的空间分布特征、污染评价方法和来源分析等,已有学者进行过研究(秦元礼等, 2020; 余小芬等, 2012)。但目前关于滇中西部地区的土壤的研究较少,尤其是姚安地区。本文以滇中地区的姚安县为研究区,通过分析8种重(类)金属元素(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)的含量特征、空间分布特征,运用相关性分析、主成分分析以及聚类分析方法探究重(类)金属的可能来源,运用地累积指数法和富集系数法对土壤的重(类)金属污染程度进行分析与评价,采用潜在生态危害指数法对重(类)金属潜在生态风险进行评价,以期对滇中地区的土壤重(类)金属的污染防治和土地利用发展规划提供基础数据和参考依据。

1 研究区概况

研究区姚安县位于云南省楚雄彝族自治州西北部,调查面积为1803 km²,是一个以高中山和低山丘陵为主的地区,属亚热带季风气候,总体气候特征是冬夏季短、春秋长,日温差大、年温差小,年均气温为14.8~21.9℃。年均降水量为800~1000毫米,雨季主要集中在7月至10月。研究区地处青藏高原东南缘哀牢山—金沙江断裂带东侧和扬子板块西缘楚雄凹陷带内(严清高等, 2017),其地质简图如图1所示,区内出露地层有侏罗系的张河组、蛇店组、妥甸组,白垩系的高峰寺组、普昌河

组、马头山组、江底河组,以及第三系和第四系沉积物,区内岩性以紫红色、紫色和灰白色砂岩、泥岩为主。研究区南部出露小面积的岩浆岩,主要为碱性粗面岩和正长斑岩,南部的老街子 Au-Pb-Ag 多金属矿床与出露的碱性岩岩具有密切关系(罗晨皓等,2019)。土壤类型主要为紫色土、黄棕壤、水稻土,面积占比分别为 68.71%、17.15% 和 10.14%。受地形地貌复杂性的影响,土地利用类型呈现出多样性,区内主要为林地,其次为耕地、草地,零星分布有少量工矿用地、园地、水利设施用地及交通运输用地。

2 样品采集与分析

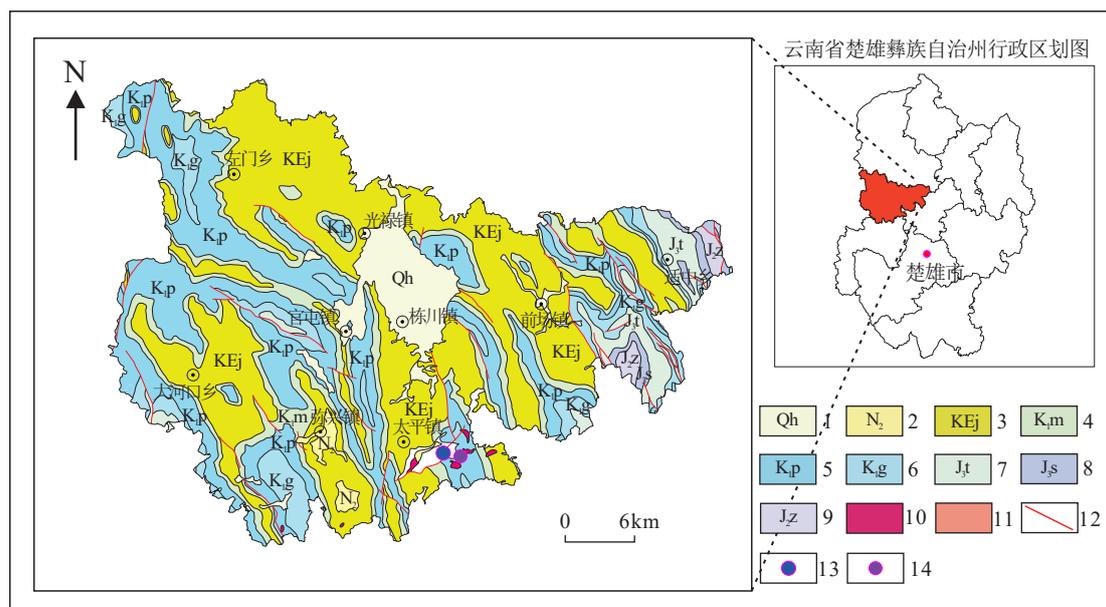
本次样品采样工作的采样密度为 1 个点/ km^2 ,采样深度 0~20 cm,为了减少随机误差的影响,每个点由 4~5 个子样等量混合组成 1 件样品,每件土壤样品原始质量大于 1 kg,每 4 km^2 组合成一个样品分析,在研究区内共采集土壤组合样品 428 件。在样品采集过程中,先用不锈钢铁铲挖好样坑,然后用竹片将与铁铲接触的土壤剥去,再用竹铲采集样品,并去除杂草、砾石、肥料团块等杂物,用 GPS 记录采样点的坐标。样品过 20 目(0.8 mm)尼龙筛,送样至昆明自然资源综合调查中心分析测试

室测试,共测定 Ag、As、Au 等 54 项指标。本文采用了其中 10 项指标(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn、 Fe_2O_3 、MgO),其中 As、Hg 用原子荧光光谱法(AFS)测定,检出限分别为 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.0005 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Pb、Zn、Cr 用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,检出限分别为 $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $2.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cu、Cd、Ni 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,检出限分别为 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Fe_2O_3 用 X 射线荧光光谱法(XRF)测定,检出限为 0.05%; MgO 用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定,检出限为 0.02%。通过采用外部质量监控和内部质量监控结合的方法控制分析质量,分析过程中采用密码样、标准样、监控样等多种监控手段,保证了样品分析质量的准确性和可靠性。

3 重(类)金属污染评价方法

3.1 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})法起初被用于定量评价水环境沉积物中的重(类)金属污染程度,由于它既考虑了自然成岩作用对背景值的影响,也考虑了人类活动对环境的影响,近年来被国内外学者广泛应用于人为活动产生的重(类)金属对土壤污染的评价



1—第四系; 2—第三系; 3—江底河组; 4—马头山组; 5—普昌河组; 6—高峰寺组; 7—妥甸组; 8—蛇店组; 9—张河组; 10—正长斑岩; 11—碱性粗面岩; 12—断层; 13—老街子铅矿床; 14—老街子金矿床。

图 1 姚安地区地质简图

Fig. 1 The geological map of Yao'an area

(Gasiorek et al., 2017)。其计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)]$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为重(类)金属 i 元素含量的实测浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_i 为重(类)金属 i 元素含量的背景值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); k 为修正系数, 一般取 1.5。重(类)金属地累积指数污染程度评价的分级标准见表 1。

3.2 富集系数法

富集系数(EF)法是评价人类活动对土壤及沉积物中重(类)金属富集程度影响的重要方法。它将样品中元素的浓度与背景中元素的浓度进行对比, 来判断土壤环境中元素的污染状况, 可以较为准确地判断是自然污染还是人为污染。当 $EF \leq 1$ 时, 表明土壤元素基本未发生富集; $EF > 1$, 则表明发生了土壤元素富集或受到一定程度人类活动的影响。一般来说, 自然成土过程中的 EF 值不大于 2, 所以较高的 EF 值可能表明人为输入的影响 (Szolnoki et al., 2013)。其计算公式如下:

$$EF = \frac{(C_i/C_n)_{\text{sample}}}{(C_i/C_n)_{\text{background}}}$$

式中: $(C_i/C_n)_{\text{sample}}$ 是土壤中重(类)金属 i 元素与标准化元素 n 的测定含量比, $(C_i/C_n)_{\text{background}}$ 是土壤中金属 i 元素与标准化元素 n 的背景值含量比。标准化元素通常选择地球化学性质较稳定的元素作为参比元素, 如 Fe、Ti、Al、Sc 等 (Chen et al., 2015)。重(类)金属富集系数污染程度评价的分级标准见表 2。

3.3 重(类)金属生态风险评价方法

潜在生态危害指数法在考虑土壤重(类)金属含量的基础上, 结合了重(类)金属元素的协同作用、生物毒性系数、生态效应以及环境对重(类)金属

污染敏感性等因素, 综合反映了重(类)金属对生态环境的影响, 可系统全面地反映土壤重(类)金属的污染状况, 目前已成为较为常用的对土壤或沉积物中重(类)金属污染程度和生态风险进行评价的方法。其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^r = \sum_{i=1}^n (T_i^r \times C_i^r) = \sum_{i=1}^n (T_i^r \times C_i^r / C_n^i)$$

式中: RI 为某点土壤多金属综合潜在生态风险指数; E_i^r 为土壤中重(类)金属 i 元素的潜在生态风险系数; C_i^r 为重(类)金属 i 元素的污染系数; T_i^r 为重(类)金属 i 元素的毒性响应系数, 反映重(类)金属的毒性强度及环境敏感程度, 相关重(类)金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 的毒性响应系数分别为 10、30、2、5、40、5、5、1 (Hakanson, 1980)。 C_i^r 为土壤中第 i 种重(类)金属的实测浓度 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), C_n^i 为重(类)金属 i 元素的土壤背景值, 本文取云南省土壤背景值 (中国环境监测总站, 1990)。重(类)金属潜在生态风险系数与潜在生态风险指数的分级标准见表 3。

3.4 数据分析与制图

采用 Excel 2007 和 SPSS 23.0 统计软件进行数据处理和统计分析, 运用相关性分析、主成分分析和聚类分析方法研究重(类)金属来源, 其中主成分

表 2 富集系数评价指标

Table 2 Enrichment factor and contamination grades

等级	EF值	富集(污染)程度
I	≤ 0	无富集(无污染)
II	1~2	轻微富集(轻微污染)
III	2~5	中度富集(中度污染)
IV	5~20	显著富集(中强污染)
V	20~40	强烈富集(强污染)
VI	>40	极强富集(较强污染)

表 1 地累积指数评价指标

Table 1 Geo-accumulation index and contamination grades

等级	I_{geo} 值	富集(污染)程度
I	≤ 0	无富集(无污染)
II	0~1	轻微富集(轻微污染)
III	1~2	中度富集(中度污染)
IV	2~3	中强富集(中强污染)
V	3~4	强富集(强污染)
VI	4~5	较强富集(较强污染)
VII	>5	极强富集(极强污染)

表 3 重(类)金属的生态风险系数和潜在生态风险指数

Table 3 Potential ecological risk coefficient and its indices of the heavy metals and metalloids

E_i^r 值	潜在生态危害程度	RI值	潜在生态风险程度
<40	轻度	<150	轻度
40~80	中度	150~300	中度
80~160	强	300~600	强
160~320	很强	>600	很强
>320	极强		

分析采用最大方差旋转法。采用 ArcGIS10.7 软件绘制研究区土壤重(类)金属含量空间分布图。

4 测试结果分析

4.1 土壤重(类)金属含量特征

研究区 428 件土壤样品的重(类)金属含量的变化及平均值见表 4。由表 4 可见, As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 含量平均值分别为 11.53、0.31、99.53、34.50、0.04、43.50、41.53、84.92 mg/kg, 与云南省土壤背景值(中国环境监测总站, 1990)的比值分别为 0.63、1.41、1.53、0.75、0.70、1.02、1.02 和 0.95, 与全国表层土壤环境背景值(魏复盛等, 1991)的比值分别为 1.03、3.10、1.63、1.53、0.60、1.62、1.60 和 1.14。与土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值和管制值(中华人民共和国生态环境部, 2018)相比, 研究区 428 件土壤样品中除 Hg 含量小于该筛选值外, 其余 7 种元素均有部分样品含量超过该筛选值, 可以得出 8 种元素超标率排序为: Cd(23.36%)>Pb(4.91%)>Cu(3.50%)>As(1.17%)>Ni(0.93%)=Zn(0.93%)>Cr(0.47%)>Hg(0), 其中 Cd、Pb 超管制值的比例分别为 0.47% 和 0.70%。由此可见, 研究区土壤样品的 8 种重(类)金属元素中有 1 种未超标, 6 种超标幅度较小, Cd 的超标幅度

较大。从峰度、偏度和百分位数来看, Cr、Ni 近似服从正态分布, 说明其在土壤中的浓度几乎没有受到人为活动的干扰, 可能主要为成土母质自然风化而成; 其余元素呈非正态分布, 说明可能受到了外源输入的影响。

从变异系数看, 8 种重(类)金属的变异系数大小为: Cd>Pb>Hg>As>Cu>Zn>Ni>Cr。根据 Wilding (1985)对变异系数的分级方法, 除 Cr、Ni、Cu、Zn 属中度变异外, 其余元素都为高度变异, 其中 Cr、Ni 变异系数较低, 说明其在空间中的含量分布相对均匀; 而 Cd、Pb 变异系数较其他元素高出较多, 其值分别高达 2.39、2.33, 说明二者土壤在形成过程中有明显的元素迁移或外来聚集, 可能受到地质背景或外源输入的影响而导致其分布不均匀。总体上研究区表层土壤重(类)金属的空间变异性以中高度变异为主。

4.2 表土中重(类)金属的空间分布

研究区重(类)金属含量空间分布如图 2 所示, 从其分布特征可以分析重(类)金属来源和可能产生重(类)金属污染的高值区域(Mamat et al., 2014)。由图 2 可见, 研究区内 Cr、Ni 呈现了相似的分布特征, 基本呈现西北部浓度高、东南部浓度低的特点。As、Cu、Pb 和 Zn 元素则呈现出不同的分布特征,

表 4 土壤重(类)金属元素含量分析统计
Table 4 Statistics of heavy metal and metalloid concentration in soils

项目	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Fe
平均值/mg·kg ⁻¹	11.53	0.31	99.53	34.50	0.04	43.50	41.53	84.92	5.69
最小值/mg·kg ⁻¹	3.11	0.06	47.20	8.06	0.01	10.80	12.20	22.00	1.85
25%	8.90	0.19	91.30	27.93	0.03	38.73	24.80	71.80	5.26
百分位数 50%	10.60	0.24	99.85	33.15	0.03	43.95	27.25	81.60	5.80
75%	12.80	0.31	107.00	39.10	0.05	48.60	31.20	92.25	6.29
最大值/mg·kg ⁻¹	38.10	14.20	187.00	148.00	0.45	78.10	1 819.00	268.00	8.11
标准偏差/mg·kg ⁻¹	4.66	0.74	14.62	11.89	0.04	9.24	96.78	26.51	0.86
变异系数	0.40	2.39	0.15	0.34	0.86	0.21	2.33	0.31	0.15
偏度	2.01	16.59	0.23	3.61	7.31	-0.12	15.28	3.08	-1.08
峰度	6.30	299.40	3.96	26.14	72.85	1.44	270.50	16.83	2.55
云南省土壤背景值/mg·kg ⁻¹	18.4	0.22	65.2	46.3	0.06	42.5	40.6	89.7	5.22
全国土壤背景值/mg·kg ⁻¹	11.2	0.10	61	22.6	0.07	26.9	26	74.2	2.94
土壤风险筛选值/mg·kg ⁻¹	30	0.3	150	50	0.5	60	70	200	pH≤5.5
	30	0.3	150	50	0.5	70	90	200	5.5<pH≤6.5
	25	0.3	200	100	0.6	100	120	250	6.5<pH≤7.5
	20	0.6	250	100	1	190	170	300	pH>7.5
超标率/%	1.17	23.36	0.47	3.50	0	0.93	4.91	0.93	

注: Fe含量单位为%。

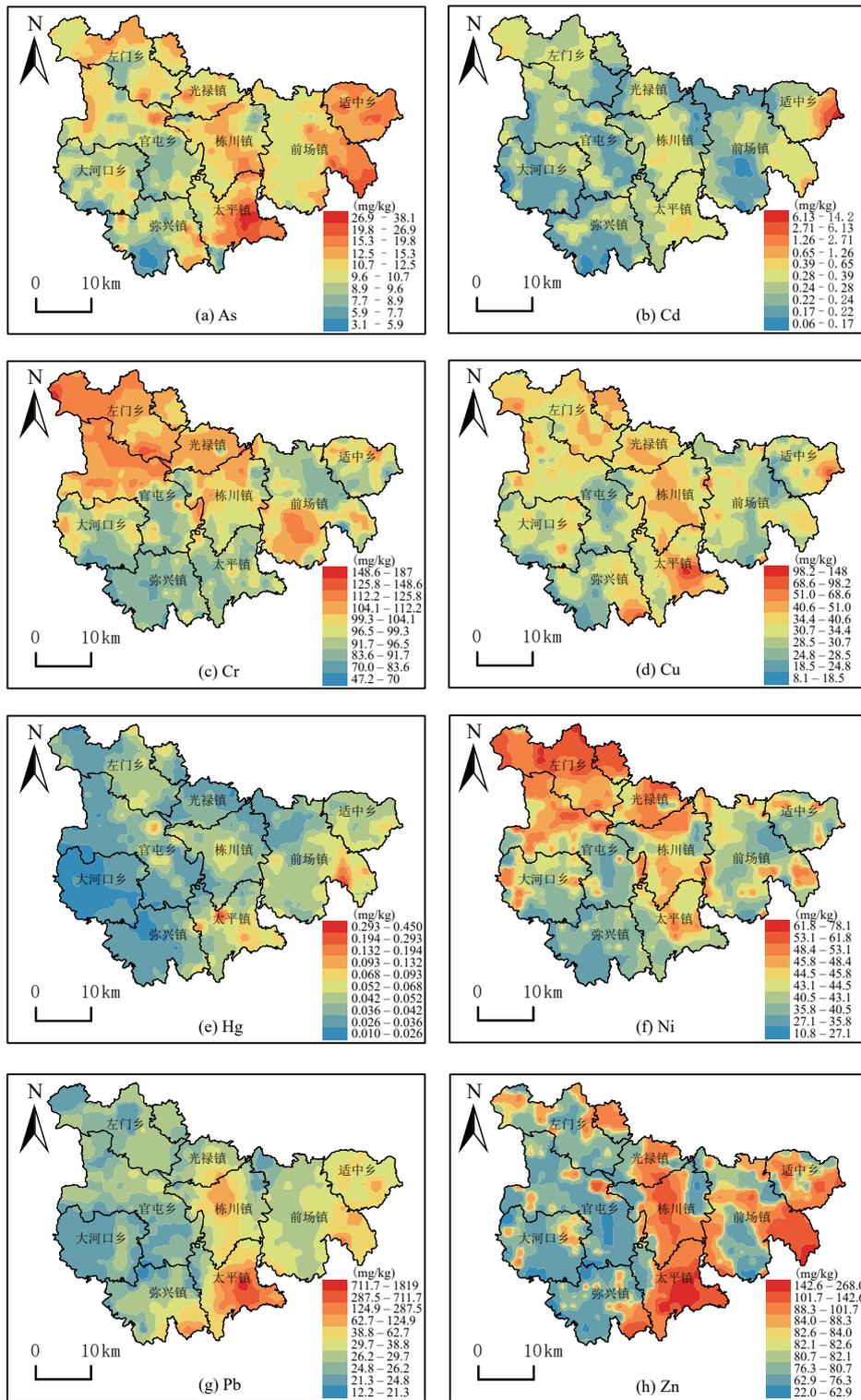


图2 土壤重(类)金属含量空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of the heavy metals and metalloids in soils

相较于前两种元素,其在乡镇居民区浓度增大,说明其可能受到人类活动一定的影响;而其在研究区南部皆存在一个浓集中心,主要分布在太平镇东侧的老街子铅矿区,其富集可能与区内的矿业开采有

关。Hg元素的分布在居民区浓度相对增大,说明人类活动可能也对其产生了一定的影响。Cd元素的来源可能有多种,在研究区内,其浓度在人类活动区相对增大,在研究区东部存在一个未闭合的浓

集中心,推测可能受到农业活动、工业活动等多种因素的共同影响。

5 讨论

5.1 重(类)金属来源解析

5.1.1 相关性分析

重(类)金属元素间的相关性分析可以反映其是否有同源性,相关性较强的元素,可能具有共同来源。研究区土壤重(类)金属元素间的相关性见表5。由表5可知,Cr-Ni、Cr-Cu、Ni-Cu均呈显著正相关($P < 0.01$),相关系数分别为0.783、0.252、0.374。 Fe_2O_3 、MgO是成土过程中形成的重要氧化物,自然来源的元素通常与其有较强的相关性(蔡立梅等,2008)。与 Fe_2O_3 、MgO均呈显著正相关关系的元素有Cr、Ni、Cu、Zn,而Cr、Ni除了与 Fe_2O_3 、MgO呈现显著正相关外,与其他元素只表现出弱相关或无相关,说明Cr、Ni主要来源为自然来源,而Cu、Zn除了有自然来源外,还受到了人类活动的影响。As-Cu-Pb-Zn之间表现出显著的正相关关系,有共同变化的趋势,说明这些元素有共同的人为来源。Hg与As-Pb-Zn表现出显著的弱相关关系,而与Cu表现出弱相关关系,而Cd与其他元素只表现出弱相关或无相关,且Cd、Hg二者间不具有相关性。可以看出,Hg、Cd分别还有其他不同的来源。

5.1.2 主成分分析

Bartlett球形度检验结果($0.00 < 0.05$)与KMO度量值检验结果($0.630 > 0.5$)表明各个元素间相关性强,适合进行主成分分析,分析结果见表6。采用Kaiser标准化的正交旋转法,提取出了4个主成分,贡献率分别为36%、22.48%、12.37%和10.59%。

累积贡献率为81.44%。虽然只有前两个主成分特征值大于1,但考虑到解析的总方差只有58.48%,信息丢失较多,前3个主成分累积总方差也只有70.85%,勉强满足70%的要求,因此,提取前4个主成分可满足要求。各元素的变量共同度均较高,介于0.648~0.985之间,说明元素的大部分信息可以被4个主成分解释,提取的效果较好。

第一主成分(F1)贡献率(36%)远高于其他主成分,载荷较高的重(类)金属为As、Cu、Pb和Zn,分别为0.748、0.760、0.699、0.831。除Zn的变异系数为中度变异外,Cu、As、Pb均为高度变异,而As、Cu、Pb和Zn在居民区浓度相对增大也表明其受人类社会活动一定程度的影响,推断这4种重(类)金属既有自然来源,也有人为来源。结合其元素的空间分布图和相关性分析综合判断,F1主要受自然背景与矿产开采共同影响。

第二主成分(F2)方差贡献率为22.48%,载荷较高的重(类)金属为Cr和Ni,分别为0.859、0.790,其余元素除Cu为较小正载荷,其他元素均为负荷载。Cr、Ni变异系数较低且近似服从正态分布,其可能受人类活动影响较小,主要受成土母质自然风化的影响。而严明书等(2018)的研究也表明成土母质是土壤中Cr、Ni主要来源。因此F2主要受自然因素影响,受控于成土母质和地质背景。

第三主成分(F3)方差贡献率为12.37%,载荷较高的重(类)金属为Cd,载荷为0.956,其余元素荷载均较小。Cd的变异系数为高度变异且不服从正态分布,其浓度在人类活动区相对增大,也表明其可能受到了人类活动的影响。周艳等(2018)在对铅锌矿周围土壤的研究中发现土壤中Cd的含量主要受有色金属开采和选冶的影响。研究区Cd

表5 土壤重(类)金属相关性分析
Table 5 Correlation analysis of heavy metals and metalloids in soils

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	Fe_2O_3	MgO
As	1	0.103**	0.079	0.408**	0.339**	0.164**	0.475**	0.607**	0.283**	-0.067
Cd		1	-0.029	0.165**	0.089	0.03	0.032	0.206**	-0.002	0.001
Cr			1	0.252**	-0.120*	0.783**	-0.054	0.092	0.653**	0.368**
Cu				1	0.123*	0.374**	0.529**	0.477**	0.459**	0.311**
Hg					1	-0.048	0.245**	0.280**	0.028	-0.111*
Ni						1	0.014	0.335**	0.760**	0.651**
Pb							1	0.564**	0.093	-0.070
Zn								1	0.451**	0.271**

注: *表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$ 。

表6 土壤重(类)金属含量的主成分分析
Table 6 Principal component analysis of the heavy metal and metalloid concentrations in soils

重(类)金属元素	主成分				变量共同度
	1	2	3	4	
As	0.748	-0.241	-0.102	0.138	0.648
Cd	0.231	-0.115	0.956	-0.070	0.985
Cr	0.336	0.859	-0.026	0.165	0.878
Cu	0.760	0.091	0.002	-0.330	0.695
Hg	0.376	-0.444	0.001	0.747	0.896
Ni	0.504	0.790	0.024	0.152	0.902
Pb	0.699	-0.372	-0.252	-0.324	0.796
Zn	0.831	-0.147	0.031	-0.027	0.715
初始特征值	2.880	1.798	0.989	0.847	
方差贡献率/%	36.00	22.48	12.37	10.59	
累计方差贡献率/%	36.00	58.48	70.85	81.44	

与 As、Cu、Zn 表现出的显著弱相关关系显示出其可能具有一定程度的同源性, 而其在第一主成分(F1)上具有一定载荷(0.231)也表明了 Cd 可能受到了矿产开采的影响。王美等(2014)对肥料重(类)金属的研究发现长期施用磷肥、有机肥易造成耕地中 Cd 的富集, 陈志凡等(2020)对农田重金属的研究也发现土壤 Cd 多来源于农业生产中化肥、农药等的使用。研究区内耕作所施肥料以有机肥、复合肥和磷肥为主, 而少数地区存在农药使用过度的情况。故 F3 主要受矿产开采和农业活动的共同影响。

第四主成分(F4)方差贡献率为 10.59%, 载荷较高的重(类)金属为 Hg, 载荷为 0.747, 其余元素载荷均较小。同 Cd 一样, Hg 也为高度变异且不服从正态分布, 同样也可能受到了外源输入的影响。土壤中 Hg 的累积可有多方面来源, 通常工业排放、煤炭燃烧是主要来源, 还可能来源于大气沉降(从源等, 2008)。Madrid 等(2002)的研究指出含 Hg 化肥、农药的使用也会导致 Hg 的污染。而 Cd 与 Hg 不具有相关性, 且 F4 中 Cd 的荷载较小, 因此 F4 主要受工业活动和煤炭燃烧的影响。

5.1.3 聚类分析

对研究区土壤中的 8 种重(类)金属元素进行聚类分析, 通过分层聚类树状图可直观了解土壤元素间的相关性, 可有效探究土壤重(类)金属的来源(Zheng et al., 2008)。本文采用组间连接的方法, 避免了异常值的影响。根据标准距离 15~20 大致将 8 种重(类)金属元素分为 4 类, 聚类分析结果如图 3 所示。第一类为 As、Cu、Pb 和 Zn, 第二类为

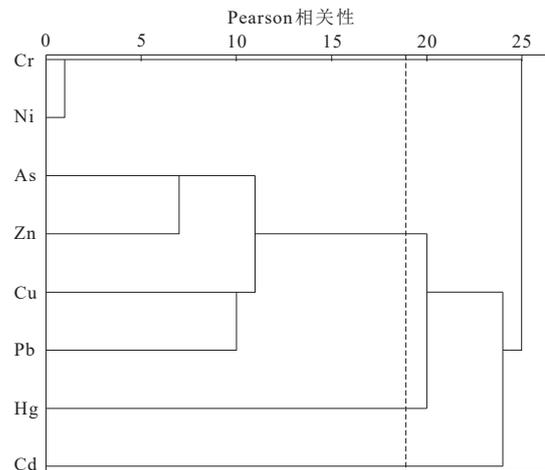


图3 土壤中重(类)金属的系统聚类分析

Fig.3 Hierarchical clustering of the heavy metals and metalloids in soils

Cr 和 Ni, 第三类为 Hg, 第四类为 Cd, 聚类分析结果和主成分分析一致。

5.2 重(类)金属污染程度评价

5.2.1 地累积指数分析

以云南省土壤背景值数据作为背景值进行计算, 8 种重(类)金属的地累积指数统计结果如表 7 所示, 可以得出 8 种元素 I_{geo} 排序为: Cr(0.009)>Cd(-0.431)>Ni(-0.589)>Zn(-0.719)>Pb(-0.958)>Cu(-1.074)>Hg(-1.313)>As(-1.356)。除 Cr 元素外, 其他元素均属无污染。虽然 Cr 区域富集污染程度为轻微污染, 但其平均值只是略大于 0, 基本也可认为其无污染。超过 99% 采样点的 As、超过 98% 采样点的 Cu、超过 96% 采样点的 Hg、

超过 98% 采样点的 Ni、超过 92% 采样点的 Pb、超过 95% 采样点的 Zn 为无富集; Hg、Pb、Zn、Cd 存在 2.570%~19.392% 的采样点为元素轻微富集; Hg、Pb、Cd 存在 0.467%~3.505% 的采样点为中度富集, 这表明该地区 Hg、Pb、Cd 元素在人类生产、生活活动的影响下积累明显, 其中 Cd 和 Pb 的积累尤为显著。Pb 有 0.467% 的采样点存在强污染, 0.234% 的采样点存在较强污染; Cd 均有 0.234% 的采样点存在较强污染和极强污染。

5.2.2 富集系数分析

仍以云南省土壤背景值数据作为背景值进行计算, 考虑到 Fe 在地壳中丰度较高, 在环境中不易淋溶迁移且生物利用度也较低的特点, 其性质较为稳定, 故采用 Fe 元素作为校准元素进行对比计算富集系数。对 8 种重(类)金属的富集系数(EF)进行分析比较, 分析结果如表 8 所示, 可以得出 8 种元素富集污染程度排序为: Cr(1.416)>Cd(1.330)>Ni(0.937)>Pb(0.935)>Zn(0.871)>Cu(0.684)>Hg(0.660)>As(0.581)。Cr、Cd 表现为轻微富集,

为 II 级, 属轻微污染。其中 Cr 有 98.832% 的样点处于轻微污染状态, 其 EF 最大值为 2.613。Cd 元素有 3.271% 样点为中度富集, 还分别有 0.467% 的样点为显著富集和极强富集。Ni、Pb、Zn、Cu、Hg、As 总体表现为无富集, 为 I 级, 属无污染。但其中 Ni、Pb、Cu、Hg、As 有 0.234%~1.402% 的样点为中度富集, Pb、Hg 分别有 0.234%、0.467% 的样点为显著富集。可见, 研究区总体上除 Cd、Cr 轻微富集外, 其余元素均无富集, 但局部地区存在重(类)金属元素的局部点状或小片状的显著和极强富集, 代表元素为 Cd、Hg、Pb。

5.2.3 研究区生态风险评价

土壤重(类)金属单元素潜在生态危害系数统计结果如表 9 所示, 可以得出土壤重(类)金属潜在生态危害程度排序为: Cd(42.24)>Hg(27.94)>As(6.27)>Ni(5.12)>Pb(5.11)>Cu(3.73)>Cr(3.05)>Zn(0.95)。元素 As、Cu、Pb、Ni、Cr、Zn 在研究区域的平均值均小于 40, 表明这些重(类)金属元素都处于轻度生态危害程度, 并且各采样点生态危害

表 7 土壤重(类)金属元素地累积指数等级分布情况
Table 7 Class distribution of I_{geo} for heavy metals and metalloids in soils

元素	I_{geo}		$I_{geo}<0$	$0<I_{geo}<1$	$1<I_{geo}<2$	$2<I_{geo}<3$	$3<I_{geo}<4$	$4<I_{geo}<5$	$5<I_{geo}$
	变化范围	平均值	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%
As	-3.150~0.465	-1.356	99.065	0.935	0	0	0	0	0
Cd	-2.459~5.427	-0.431	79.206	19.392	0.690	0.234	0	0.234	0.234
Cr	-1.051~0.935	0.009	44.159	55.841	0	0	0	0	0
Cu	-3.107~1.092	-1.074	98.598	1.168	0.234	0	0	0	0
Hg	-3.170~2.322	-1.313	96.496	2.570	0.467	0.467	0	0	0
Ni	-2.561~0.293	-0.589	98.364	1.636	0	0	0	0	0
Pb	-2.320~4.901	-0.958	92.757	3.037	3.505	0	0.467	0.234	0
Zn	-2.613~0.994	-0.719	95.794	4.206	0	0	0	0	0

表 8 土壤重(类)金属元素富集系数等级分布情况
Table 8 Class distribution of enrichment factors for heavy metals and metalloids in soils

元素	EF		EF < 1	1 < EF < 2	2 < EF < 5	5 < EF < 20	20 < EF < 40	40 < EF
	变化范围	平均值	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%
As	0.176~2.803	0.581	93.458	6.308	0.234	0	0	0
Cd	0.253~56.722	1.330	48.832	46.963	3.271	0.467	0	0.467
Cr	1.003~2.613	1.416	0	98.832	1.168	0	0	0
Cu	0.326~3.299	0.684	96.495	3.038	0.467	0	0	0
Hg	0.130~11.757	0.660	91.122	7.009	1.402	0.467	0	0
Ni	0.539~1.674	0.937	75.935	24.065	0	0	0	0
Pb	0.389~36.259	0.935	87.383	11.448	0.935	0.234	0	0
Zn	0.516~3.930	0.871	89.720	10.280	0	0	0	0

表9 土壤重(类)金属潜在生态风险系数等级分布情况
Table 9 Class distribution of potential ecological risk coefficient of heavy metals and metalloids in soils

元素	E_r^i		$E_r^i \leq 40$	$40 < E_r^i \leq 80$	$80 < E_r^i \leq 160$	$160 < E_r^i \leq 320$	$320 < E_r^i$
	变化范围	平均值	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%
As	1.69~20.71	6.27	100	0	0	0	0
Cd	8.18~1 936.36	42.24	72.43	25.93	0.70	0.47	0.47
Cr	1.45~5.74	3.05	100	0	0	0	0
Cu	0.87~15.98	3.73	100	0	0	0	0
Hg	6.67~300.00	27.94	91.59	7.01	0.93	0.47	0
Ni	1.27~9.19	5.12	100	0	0	0	0
Pb	1.50~224.01	5.11	99.30	0.47	0	0.23	0
Zn	0.25~2.99	0.95	100	0	0	0	0

程度相差不大。虽然元素 Hg 的指数均值小于 40, 但是其在“中度”“强”“很强”生态危害等级中均有分布, 分别占总数的 7.01%、0.93%、0.47%。土壤中 Cd 的生态危害最大, “中度”生态危害的样品数占总数的 25.93%, “强”“很强”“极强”生态危害的样品数分别占总数的 0.7%、0.47%、0.47%, 其指数均值为 42.24, 为“中度”潜在生态危害等级, 其最高值竟达 1 936.36。各元素对土壤潜在生态危害程度的贡献率如图 4 所示, 可知其排序为: Cd(44.74%)>Hg(29.60%)>As(6.64%)>Ni(5.421%)>Pb(5.417%)>Cu(3.95%)>Cr(3.23%)>Zn(1.00%), 与各元素潜在生态危害程度排序一致。Cd、Hg 两种元素对土壤综合潜在生态危害的贡献率之和达到了 74.34%, 也表明 Cd 和 Hg 是研究区最主要的风险元素。

研究区土壤重(类)金属生态风险指数空间分布如图 5 所示, 土壤重(类)金属综合潜在生态危害指数统计结果如表 10 所示。研究区 94.86% 的样品为轻度生态危害, 3.74% 的样品为中度生态危害。强生态危害和很强生态危害的样品较少, 分别为 0.93% 和 0.47%, 主要集中在太平镇老街子铅矿地区和适中乡东部地区, 分布面积较小, 可见研究区内局部地区的矿业开采、农业施肥和工业活动对周边土壤造成了一定程度的污染。但总体上, 研究区生态风险较低, 风险可控。

6 结论

(1) 研究区内 Cd、Cr、Ni 和 Pb 的含量平均值是云南省表层土壤背景值的 1.41、1.53、1.02 和 1.02 倍, As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 的含量平均值是全国表层土壤背景值的 1.03、3.10、1.63、1.53、1.62、1.60 和 1.14 倍。与土壤环境质量农用地土壤

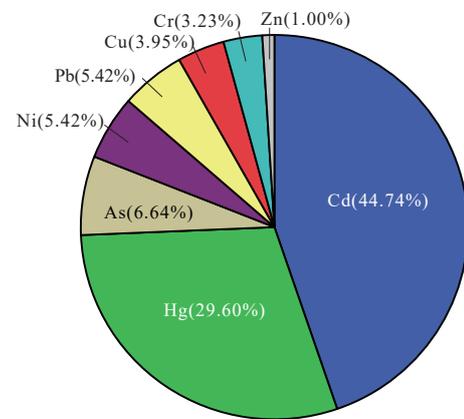


图4 重(类)金属元素对潜在生态危害贡献率示意图
Fig. 4 Contribution characteristics of heavy metals and metalloids to potential ecological risk

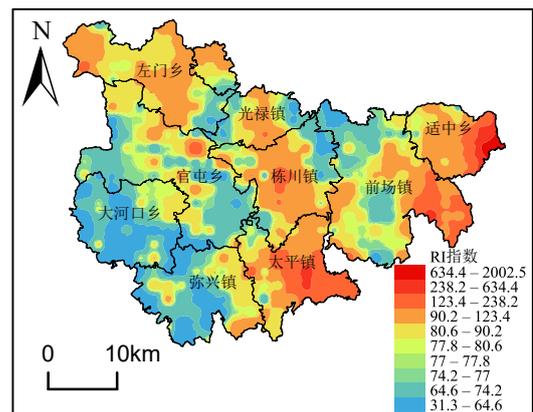


图5 研究区土壤重(类)金属潜在在风险指数的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the potential ecological risk indices for the heavy metals and metalloids in soils of the study area

污染风险筛选值相比, 可以得出 8 种元素超标率排序为: Cd>Pb>Cu>As>Ni=Zn>Cr>Hg, 8 种重(类)金

表 10 土壤重(类)金属潜在生态风险指数等级分布情况
Table 10 Class distribution of potential ecological risk index of heavy metals and metalloids in soils

RI		RI<150	150≤RI<300	300≤RI<600	600<RI
变化范围	平均值	比例/%	比例/%	比例/%	比例/%
31.34~2 002.53	95.00	94.86	3.74	0.93	0.47

属元素中除 Hg 没有超标外,其它 6 种元素超标幅度较小,而 Cd 的超标幅度较大。研究区土壤重(类)金属的空间变异性以中高度变异为主,这反映出其可能受人类活动影响较大。

(2)应用多元统计分析的方法探讨了重(类)金属的来源;As、Cu、Pb 和 Zn 受自然背景与矿产开采共同影响;Cr、Ni 主要来源于成土母质;而 Cd 受矿产开采和农业活动的影响较大,Hg 则受周边工厂以及煤炭燃烧的影响。

(3)运用地累积指数法、富集系数法,结果表明,研究区平均污染程度普遍不高,但局部地区存在重(类)金属元素的污染富集,代表元素为 Cd、Hg,少数区域甚至存在 Cd 元素的极强富集。

(4)研究区土壤环境总体上处于“轻度”潜在生态风险程度。潜在生态危害指数法分析结果也表明 Cd 和 Hg 是研究区最主要的风险元素,但以“轻度”和“中度”生态危害为主,“强”和“很强”生态危害分布面积较小。这些局部元素较为富集的区域主要由矿业开采、农业活动和工业活动所致,尤其是矿产开采活动。所以应注重对矿区周边土壤污染防治工作,防止土壤重(类)金属污染的加重和扩散。

References

- Cai L M, Ma J, Zhou Y Z, et al., 2008. Multivariate Geostatistics and GIS-based Approach to Study the Spatial Distribution and Sources of Heavy Metals in Agricultural Soil in the Pearl River Delta, China[J]. *Environmental Science*, 29 (12): 3496 – 3502 (in Chinese with English abstract).
- Cen J, Chen J W, Yang Z F, et al., 2008. Application of the analytic hierarchy process in the evaluation of land quality of Guangna Town, Tongjiang County, Sichuan, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (2): 277 – 285 (in Chinese with English abstract).
- Chen H, Wang Y, Wang S, 2012. Source Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Farmland Soil Around Tongshan Mining Area[J]. *Environmental Science*, 43 (5): 2719 – 2731 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Y, Teng Y G, Lu S J, et al., 2015. Contamination features and health risk of soil heavy metals in China[J]. *Science of the Total Environment*, 512-513: 143 – 153.
- Chen Z F, Hua Y X, Xu W, et al., 2020. Analysis of heavy metal pollution sources in suburban farmland based on positive definite matrix factor model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 40 (1): 276 – 283 (in Chinese with English abstract).
- Cong Y, Zheng P, Chen Y L, et al., 2008. Ecological risk assessments of heavy metals in soils of the farmland ecosystem of Beijing, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27 (5): 681 – 688 (in Chinese with English abstract).
- Gasiorek M, Kowalska J, Mazurek R, et al., 2017. Comprehensive assessment of heavy metal pollution in topsoil of historical urban park on an example of the Planty Park in Krakow (Poland) [J]. *Chemosphere*, 179: 148-158.
- Hakanson L, 1980. An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control—A Sedimentological Approach[J]. *Water Research*, 14 (8): 975 – 1001.
- Hu W Y, Zhang Y X, Huang B, et al., 2017. Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: Current status and management strategies[J]. *Chemosphere*, 170: 183 – 195.
- Jin Y L, O'Connor D, Ok Y S, et al., 2019. Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis[J]. *Environment International*, 124: 320 – 328.
- Khan K, Lu Y, Khan H, et al., 2013. Heavy metals in agricultural soils and crops and their health risks in Swat District, northern Pakistan[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 58: 449 – 458.
- Li P, Huang Y, Lin Y, et al., 2018. Distribution, Source Identification and Risk Assessment of Heavy Metals in Topsoil of Huairou District in Beijing[J]. *Geoscience*, 32 (1): 86 – 94 (in Chinese with English abstract).
- Liang J, Feng C T, Zeng G M, et al., 2017. Spatial distribution and source identification of heavy metals in surface soils in a typical coal mine city, Lianyuan, China[J]. *Environmental Pollution*, 225: 681 – 690.
- Liu M, Zhang A B, Liao Y J, et al., 2015. The environment quality of heavy metals in sediments from the central Bohai Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 100 (1): 534 – 543.
- Liu Y L, Zhang L J, Han X F, et al., 2012. Spatial Variability and Evaluation of Soil Heavy Metal Contamination in the Urban-transect of Shanghai[J]. *Environmental Science*, 33 (2): 599 – 605 (in Chinese with English abstract).
- Luo C H, Zhou Y, Shen Y, et al., 2019. The Geochemical

- Characteristics and Petrogenesis of the Mineralized Alkali-Rich Magmatic Rock in Yao'an Au-Pb-Ag Deposit, Yunnan Province[J]. *Earth Science*, 44 (6) : 2063 – 2083 (in Chinese with English abstract).
- Mwesigye A R, Young S D, Bailey E H, et al., 2016. Population exposure to trace elements in the Kilembe copper mine area, western Uganda: A pilot study[J]. *Science of Total Environment*, 573: 366 – 375.
- Madrid L, Díaz-Barrientos E, Madrid F, 2002. Distribution of heavy metal contents of urban soils in parks of Seville[J]. *Chemosphere*, 49 (10) : 1301 – 1308.
- Mamat Z, Yimit H, Ji R Z, et al., 2014. Source identification and hazardous risk delineation of heavy metal contamination in Yanqi basin, northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 493: 1098 – 1111.
- N'guessan Y M, Probst J L, Bur T, et al., 2009. Trace elements in stream bed sediments from agricultural catchments (Gascogne region, S-W France): Where do they come from?[J]. *Science of the Total Environment*, 407: 2939 – 2952.
- Ogunkunle C O, Fatoba P O, 2013. Pollution Loads and the Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals around a Mega Cement Factory in Southwest Nigeria[J]. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22 (2) : 487 – 493.
- Padoan E, Romè C, Ajmone-Marsan F, 2017. Bioaccessibility and size distribution of metals in road dust and roadside soils along a peri-urban transect[J]. *Science of the Total Environment*, 601-602: 89 – 98.
- Qin Y L, Zhang F G, Peng M, et al., 2020. Geochemical distribution characteristics and sources of heavy metals in soils of Wuding County, Yunnan Province[J]. *Geology and Exploration*, 56 (3) : 540 – 550 (in Chinese with English abstract).
- Shi Y H, Huang J H, Zeng G M, et al., 2018. Evaluation of soluble microbial products (SMP) on membrane fouling in membrane bioreactors (MBRs) at the fractional and overall level: A review[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 17 (1) : 71 – 85.
- Szolnoki Z, Farsang A, Puskás I, 2013. Cumulative impacts of human activities on urban garden soils: origin and accumulation of metals[J]. *Environmental Pollution*, 177: 106 – 115.
- Tian K, Huang B, Xing Z, et al., 2017. Geochemical baseline establishment and ecological risk evaluation of heavy metals in greenhouse soils from Dongtai, China[J]. *Ecological Indicators*, 72: 510 – 520.
- Tomlinson D L, Wilson J G, Harris C R, et al., 2019. Problems in the assessment of heavy-metal levels in estuaries and the formation of a pollution index[J]. *Helgoland Marine Research*, 33: 566 – 575.
- Wei F S, Chen J S, Wu Y Y, et al., 1991. Study on soil environmental background value in China[J]. *Environmental Science*, 12 (4) : 12 – 19 (in Chinese with English abstract).
- Wang M, Li S T, 2014. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 20 (2) : 466 – 480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Y, Xin C L, Yu S, et al., 2022. Evaluation of Heavy Metal Content, Sources, and Potential Ecological Risks in Soils of Southern Hilly Areas[J]. *Environmental Science*, 43 (09) : 4756 – 4766 (in Chinese with English abstract).
- Wilding L P, 1985. Spatial variability: its documentation, accommodation, and implication to soil surveys[M]Nielsen D R Bouma J. Soil spatial variability. Wageningen: Pudoc Publishers, 166–194.
- Xu Z Q, Ni S J, Zhang C J, et al., 2004. Assessment on Heavy Metals in the Sediments of Jinsha River in Panzhihua Area by Pollution Load Index[J]. *Sichuan Environment*, 23 (3) : 64 – 67 (in Chinese with English abstract).
- Yan M S, Huang J, He Z X, et al., 2018. The influence of geological background on trace elements of soil, A case study of Yubei area[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 42 (1) : 199 – 205 (in Chinese with English abstract).
- Yan Q G, Jiang X J, W P, et al., 2017. Zircon SHRIMP U-Pb Geochronology and Volcanic Edifice Division of the Laojiezi Intraplate Alkali-rich Volcanic Rocks in Yao'an, Central Yunnan Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 91 (8) : 1743 – 1759 (in Chinese with English abstract).
- Yu X F, Chen J, Peng R Z, et al., 2012. Study on Influencing Factors of Farmland Soil Heavy Metals in Central Yunnan Province[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 25 (5) : 1765 – 1769 (in Chinese with English abstract).
- China Environmental Monitoring Station, 1990. Background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press: 329–472 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2018. GB15618–2018 Soil environmental quality Risk control standard for soil contamination of agricultural land[S].
- Zhao Q L, Li Q C, Xie J K, et al., 2015. Characteristics of Soil Heavy Metal Pollution and Its Ecological Risk Assessment in South Jining District Using Methods of Enrichment Factor and Index of Geoaccumulation[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 34 (1) : 129 – 137 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Y M, Chen T B, He J Z, 2008. Multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils from Beijing, China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 8 (1) : 51 – 58.
- Zhou Y, Chen Q, Deng S P, et al., 2018. Principal Component Analysis and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Farmland Soils around a Pb-Zn Mine in Southwestern China[J]. *Environmental Science*, 39 (6) : 2884 – 2892 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y L, Guo Z J, Wang C W, et al., 2019. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiang

- County, Yunnan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43 (6) : 1358 - 1366 (in Chinese with English abstract).
- Zhu L, Liu J W, Xu S G, et al., 2017. Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of northeast China[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 142: 454 - 463.
- ### 附中文参考文献
- 蔡立梅, 马瑾, 周永章, 等, 2008. 东莞市农业土壤重金属的空间分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 29 (12) : 3496 - 3502.
- 岑静, 陈家玮, 杨忠芳, 等, 2008. 层次分析法在四川省通江县广纳镇土地评估中的应用[J]. *地质通报*, 27 (2) : 277 - 285.
- 陈航, 王颖, 王澍, 2012. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 43 (5) : 2719 - 2731.
- 陈志凡, 化艳旭, 徐薇, 等, 2020. 基于正定矩阵因子分析模型的城郊农田重金属污染源解析[J]. *环境科学学报*, 40 (1) : 276 - 283.
- 从源, 郑萍, 陈岳龙, 等, 2008. 北京农田生态系统土壤重金属元素的生态风险评价[J]. *地质通报*, 27 (5) : 681 - 688.
- 李苹, 黄勇, 林赞, 等, 2018. 北京市怀柔区土壤重金属的分布特征、来源分析及风险评价[J]. *现代地质*, 32 (1) : 86 - 94.
- 柳云龙, 章立佳, 韩晓非, 等, 2012. 上海城市样带土壤重金属空间变异特征及污染评价[J]. *环境科学*, 33 (2) : 599 - 605.
- 罗晨皓, 周晔, 沈阳, 等, 2019. 云南姚安 Au-Pb-Ag 矿床含矿富碱岩岩浆地球化学特征及岩石成因[J]. *地球科学*, 44 (6) : 2063 - 2083.
- 秦元礼, 张富贵, 彭敏, 等, 2020. 云南省武定县土壤重金属地球化学分布特征及其来源浅析[J]. *地质与勘探*, 56 (3) : 540 - 550.
- 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉, 等, 1991. 中国土壤环境背景值研究[J]. *环境科学*, 12 (4) : 12 - 19.
- 王美, 李书田, 2014. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 20 (2) : 466 - 480.
- 王玉, 辛存林, 于爽, 等, 2022. 南方丘陵区土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 43 (09) : 4756 - 4766.
- 徐争启, 倪师军, 张成江, 等, 2004. 应用污染负荷指数法评价攀枝花地区金沙江水系沉积物中的重金属[J]. *四川环境*, 23 (3) : 64 - 67.
- 严明书, 黄剑, 何忠庠, 等, 2018. 地质背景对土壤微量元素的影响—以川渝地区为例[J]. *物探与化探*, 42 (1) : 199 - 205.
- 严清高, 江小均, 吴鹏, 等, 2017. 滇中姚安老街区板内富碱火山岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及火山机构划分[J]. *地质学报*, 91 (8) : 1743 - 1759.
- 余小芬, 陈军, 彭荣珍, 等, 2012. 滇中农用地土壤重金属影响因素研究[J]. *西南农业学报*, 25 (5) : 1765 - 1769.
- 中国环境监测总站, 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 329-472.
- 中华人民共和国生态环境部, 2018. GB 15618-2018 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准[S].
- 赵庆令, 李清彩, 谢江坤, 等, 2015. 应用富集系数法和地累积指数法研究济宁南部区域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *岩矿测试*, 34 (1) : 129 - 137.
- 周艳, 陈楠, 邓绍坡, 等, 2018. 西南某铅锌矿区农田土壤重金属空间主成分分析及生态风险评价[J]. *环境科学*, 39 (6) : 2884 - 2892.
- 周亚龙, 郭志娟, 王成文, 等, 2019. 云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. *物探与化探*, 43 (6) : 1358 - 1366.