

doi: 10.12029/gc20220829001

赵岩, 郭常来, 崔健, 张艳飞, 李莹, 李旭光, 于慧明. 2024. 辽宁省锦州市北镇农业区土壤重金属分布特征、生态风险评价及源解析[J]. 中国地质, 51(5): 1469-1484.

Zhao Yan, Guo Changlai, Cui Jian, Zhang Yanfei, Li Ying, Li Xuguang, Yu Huiming. 2024. Distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil of Beizhen agricultural area, Jinzhou City, Liaoning Province[J]. Geology in China, 51(5): 1469-1484(in Chinese with English abstract).

辽宁省锦州市北镇农业区土壤重金属分布特征、生态风险评价及源解析

赵岩¹, 郭常来¹, 崔健¹, 张艳飞¹, 李莹², 李旭光¹, 于慧明¹

(1. 中国地质调查局沈阳地质调查中心, 辽宁 沈阳 110000; 2. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司, 辽宁 沈阳 110034)

摘要:【研究目的】查明辽宁省锦州市北镇农业区重金属分布特征, 可以为当地特色农业开发、全域旅游和土壤重金属污染管控提供科学依据。【研究方法】本文通过地质调查查明成土母质, 采集表层土壤样品, 以元素含量分布特征、富集程度为基础, 开展土壤环境质量评价, 利用地累积指数法进行重金属污染程度评价, Hakanson 生态风险指数法识别研究区潜在生态风险程度, 并通过 Pearson 相关性分析和聚类分析, 定量分析不同重金属的主要来源。【研究结果】北镇农业区土壤中 Cr 和 Pb 的均值低于辽宁省辽河流域背景值, 表层土壤重金属富集程度由大到小排序为 Hg>As>Cd>Pb>Zn>Cu>Cr>Ni。研究区土壤质量总体良好, 在超标样品中 Cd、Cu 和 Zn 含量超过风险筛选值的占比分别为 45.56%、29.11% 和 11.47%, 占总超标数的 86.12%; As 和 Cd 为轻度污染状态, 大部分土壤样品的重金属为无—轻度的污染状态, 仅 Hg 元素个别采样点位为强—极强污染。单指标潜在生态风险由高到低排序为: Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn, 土壤潜在生态风险综合指数 RI 分布范围为 29.7~2358.16, 平均值为 141.9, 以低度风险为主, 其次中度风险。相关性分析和聚类分析结果表明, Ni、Cr、As、Pb 主要受母岩自然风化影响, Cu、Zn、Cd、Hg 受农业生产、工业生产、交通运输, 甚至建筑活动等多种来源影响。【结论】农用物质的不合理施用、大气沉降、工业生产、生活垃圾和煤炭燃烧等产生的物质在土壤中富集可能对研究区生态环境质量造成污染风险, 未来需要加强对 Hg、Cd、Cu 和 Zn 元素在不同地块中富集趋势监测和研究。

关键词: 土壤; 重金属; 分布特征; 源解析; 生态风险; 环境地质调查工程; 北镇农业区; 锦州市; 辽宁省

创新点: (1) 基于 GIS 空间数据分析方法, 分析北镇农业区表层土壤重金属分布影响因素; (2) 评价了重金属分布特征对生态环境造成的潜在影响, 使用多种统计方法定量确定不同地块中污染物的主要来源, 为支撑该地区发展全域旅游, 地质文化村建设, 环境质量潜在风险研究及监测管控提供参考依据。

中图分类号: X53; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1469-16

Distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil of Beizhen agricultural area, Jinzhou City, Liaoning Province

ZHAO Yan¹, GUO Changlai¹, CUI Jian¹, ZHANG Yanfei¹, LI Ying², LI Xuguang¹, YU Huiming¹

收稿日期: 2022-08-29; 改回日期: 2023-03-06

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20189711)资助。

作者简介: 赵岩, 男, 1982 年生, 硕士, 高级工程师, 主要从事水工环地质调查与研究工作; E-mail: 174856865@qq.com。

通讯作者: 李莹, 女, 1993 年生, 工程师, 主要从事土壤地球化学研究; E-mail: 171140821@qq.com。

(1. *Geological and Mineral Resources Institution of Shenyang, Shenyang 110000, Liaoning, China*; 2. *Liaoning Provincial Institute of Geology and Mineral Resources Co., Ltd., Shenyang 110034, Liaoning, China*)

Abstract: This paper is the result of environmental geological survey engineering.

[Objective] To investigate the distribution characteristics of heavy metals and provide a scientific basis for local characteristic agricultural development, comprehensive tourism, and soil heavy metal pollution control. **[Methods]** Through geological investigation, the soil parent material was identified, and topsoil samples were collected. Soil environmental quality evaluation was carried out based on the distribution characteristics and enrichment degree of element content. The degree of heavy metal pollution was evaluated using the ground accumulation index method. The Hakanson ecological risk index method was used to identify the degree of potential ecological risk in the study area. Furthermore, Pearson correlation analysis and cluster analysis were employed to quantitatively determine the main sources of different heavy metals. **[Results]** The average values of Cr and Pb in the soil of the Beizhen agricultural area were lower than the background values of the Liaohe River Basin in Liaoning Province. The enrichment degree of heavy metals in the topsoil, from high to low, was $Hg > As > Cd > Pb > Zn > Cu > Cr > Ni$. The soil quality in the study area is generally good. The proportion of Cd, Cu, and Zn contents exceeding the risk screening values in the exceeding standard samples was 45.56%, 29.11%, and 11.47%, respectively, accounting for 86.12% of the total number of exceeding standards. The evaluation results of heavy metal pollution showed that As and Cd were in a mildly polluted state, most heavy metals in soil samples were in no to mild pollution, and only Hg elements had strong to extremely strong pollution at individual sampling points. The order of potential ecological risk of single indices from high to low is $Hg > Cd > As > Cu > Ni > Pb > Cr > Zn$. The distribution range of the potential ecological risk comprehensive index (RI) of surface soil in the whole region is 29.7 to 2358.16, with an average value of 141.9, primarily indicating low risk, followed by moderate risk. The results of correlation analysis and cluster analysis show that Ni, Cr, As, and Pb are mainly affected by the natural weathering of the parent rock, while Cu, Zn, Cd, and Hg are influenced by agricultural production, industrial production, transportation, and even construction activities. **[Conclusions]** The enrichment of substances produced by the unreasonable application of agricultural substances, atmospheric deposition, industrial production, domestic garbage, and coal combustion in the soil may pose pollution risks to the ecological environment quality of the study area. In the future, it is necessary to strengthen the monitoring and research on the enrichment trend of Hg, Cd, Cu, and Zn elements in different plots.

Key words: soil; heavy metal; distribution characteristics; source analysis; ecological risk; environmental geological survey engineering; Beizhen agricultural area; Jinzhou City; Liaoning Province

Highlights: (1) Based on GIS spatial data analysis method, the influencing factors of heavy metal distribution in topsoil of Beizhen agricultural area were analyzed; (2) The potential effects of the distribution characteristics of heavy metals on the ecological environment was evaluated, and a variety of statistical methods are used to quantitatively determine the main sources of pollutants in different plots, so as to provide a reference basis for supporting the development of global tourism, the construction of geological and cultural villages, and the research, monitoring and control of potential risks of environmental quality.

About the first author: ZHAO Yan, male, born in 1982, master, senior engineer, mainly engaged in geological survey and research of hydraulic environment; E-mail: 174856865@qq.com.

About the corresponding author: LI Ying, female, born in 1993, engineer, mainly engaged in soil geochemistry research; E-mail: 171140821@qq.com.

Fund support: Supportec by the project of China Geological Survey (No.DD20189711).

1 引 言

土壤是支撑国家粮食安全与生态文明建设的重要战略资源,是农业之本。随着经济社会高速发展,污染物排放激增,不断损害土壤生态环境,导致土壤污染问题越发突出(马正虎等, 2022),在土壤污

染的众多来源中,重金属污染高居首位。近年来,由于土壤重金属污染造成的儿童血铅中毒事件、农作物镉超标等事件接连发生(黄勇等, 2022),给生态环境和食品安全带来了严重的威胁,因此,土壤重金属污染引起国内外学者的广泛关注(于锐等, 2017; 刘同等, 2022),查明土壤重金属污染并探寻

其污染源成为研究热点 (Xiao et al., 2010; 吕建树等, 2012)。

土壤中重金属元素来源复杂, 往往是多种成因来源和作用途径叠加综合的结果 (王中阳等, 2018)。一般情况下, 土壤中重金属元素不仅受到风化和淋滤作用的影响, 同时叠加了人为活动的影响 (张宪依等, 2020), 大致可分为自然源、人为源和复合源三大类 (严洪泽等, 2018; 黄勇等, 2022; 刘同等, 2022; 尹德超等, 2022)。成土母质是土壤形成的物质基础, 土壤对成土母质地球化学特征具有很强的“继承”性 (唐将等, 2005)。而农业生产、矿业开采、工业生产、交通排放、污水灌溉等多种多样的人为活动, 是土壤重金属的重要来源。众多学者针对重金属来源, 对重金属空间分布特征、迁移特征及评价重金属毒性生态风险等进行了大量研究 (宁增平等, 2017; Yang et al., 2018; Sun et al., 2019; Tume et al., 2019), 为指导土壤污染定性源识别和定量源解析提供了大量的研究信息 (林燕萍等, 2011), 从而为土壤保护和指导政策制定及落实提供科学支撑 (Yuan et al., 2013; Wang et al., 2019)。

北镇特色农业区位于下辽河平原西部, 是辽宁省粮食、花生、葡萄、蔬菜生产基地, 但由于长期的粗放型传统经济发展模式, 高强度的种养殖业生产和自然资源的消耗, 生态环境受到了不同程度的污染和破坏。此前较少的样品尚不能很好地刻画研究区土壤重金属元素地球化学特征和生态风险影响情况, 土壤重金属来源分析研究工作不足, 亟需在研究区开展全面系统的调查研究, 查明重金属地球化学特征、分布规律及潜在生态风险。

本次开展了研究区表层土壤环境质量全面调查, 取样密度、调查精度远高于过往, 系统查明了 8 种土壤重金属元素的地球化学特征。并采用多种方法开展土壤环境质量及生态风险评价, 确定土壤重金属的潜在来源, 以期对研究区土壤重金属污染防治、生态环境保护与修复提供参考。

2 研究区概况

研究区北镇市位于辽宁西部东端, 医巫闾山东麓, 东距沈阳 200 km, 西南距锦州 120 km, 行政区划包括沟帮子街道、正安镇、大屯乡等 13 个乡镇 (区), 面积约 1121 km²。坐标范围: 121°33'~

122°12'E, 41°19'~41°48'N。地势由西北向东南自然倾斜, 中部为平原, 西南部为洼地 (图 1)。中部平原地势平坦, 土质肥沃, 是粮、油棉产区, 正建设优质粮食、出口花生、葡萄、蔬菜四大基地, 形成了独具特色的农业化基地, 被辽宁省确定为“北镇模式”。

研究区西部为林业分布区, 山间盆地和山间河流阶地种植玉米, 同时又是矿业及果木种植区。中部平原区是辽宁省的主要农业生产区, 西北部种植有较多的杂粮, 北部风沙土区有大片的花生, 中部平原区种植大面积的玉米并间种大豆。中、南部辽河两岸低洼平原和下辽河平原种植大面积水稻。从地域上看土壤中元素含量状况与西部和北部低山丘陵区的基岩有密切的联系, 物质主要来源于北部低山丘陵和西部山区 (李秋燕等, 2021)。西北部丘陵山区分布前第四纪地层, 以鞍山群及侏罗世侵入岩为主, 山前倾斜平原的后缘局部出露元古界高于庄组、大洪峪组、串岭沟组; 白垩系零星分布于东北部。区内第四系沉积物发育, 层位齐全, 成因类型较复杂。综观全区, 第四纪沉积物的形成与分布、岩性特征等, 受新构造运动、地貌条件、基底构造、物质来源以及沉积环境等因素控制, 具有较明显的变化规律 (赵岩等, 2021)。自新生代以来, 研究区受新构造运动的控制, 西北部缓慢上升, 遭受风化剥蚀, 东南部缓慢下降接受沉积。地势分带性明显, 西北高东南低, 由西北部的低山丘陵至中部的山前倾斜平原到南部的冲洪积平原。

研究区属温带半湿润季风大陆性气候, 四季分明, 年平均气温 8.2℃, 年平均降水量 604.8 mm。研究区以农业用地为主, 农用地面积达到 802.7 km², 占整个调查区土地面积的 80.27%; 其次为村庄用地, 占 9.59%。从 1:100 万土壤图看, 工作区土壤类型包括草甸土、棕壤、红黏土等, 以草甸土为主。

3 研究方法

3.1 样品采集及测试

综合土地利用现状、土壤类型和地质条件, 按照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018) 和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016) 采样要求, 能够代表采样单元格土壤性质为原则, 采样密度为 4 个点/km², 采样深度 0~20 cm, 共采集土壤样品 4033 件。样品经晾

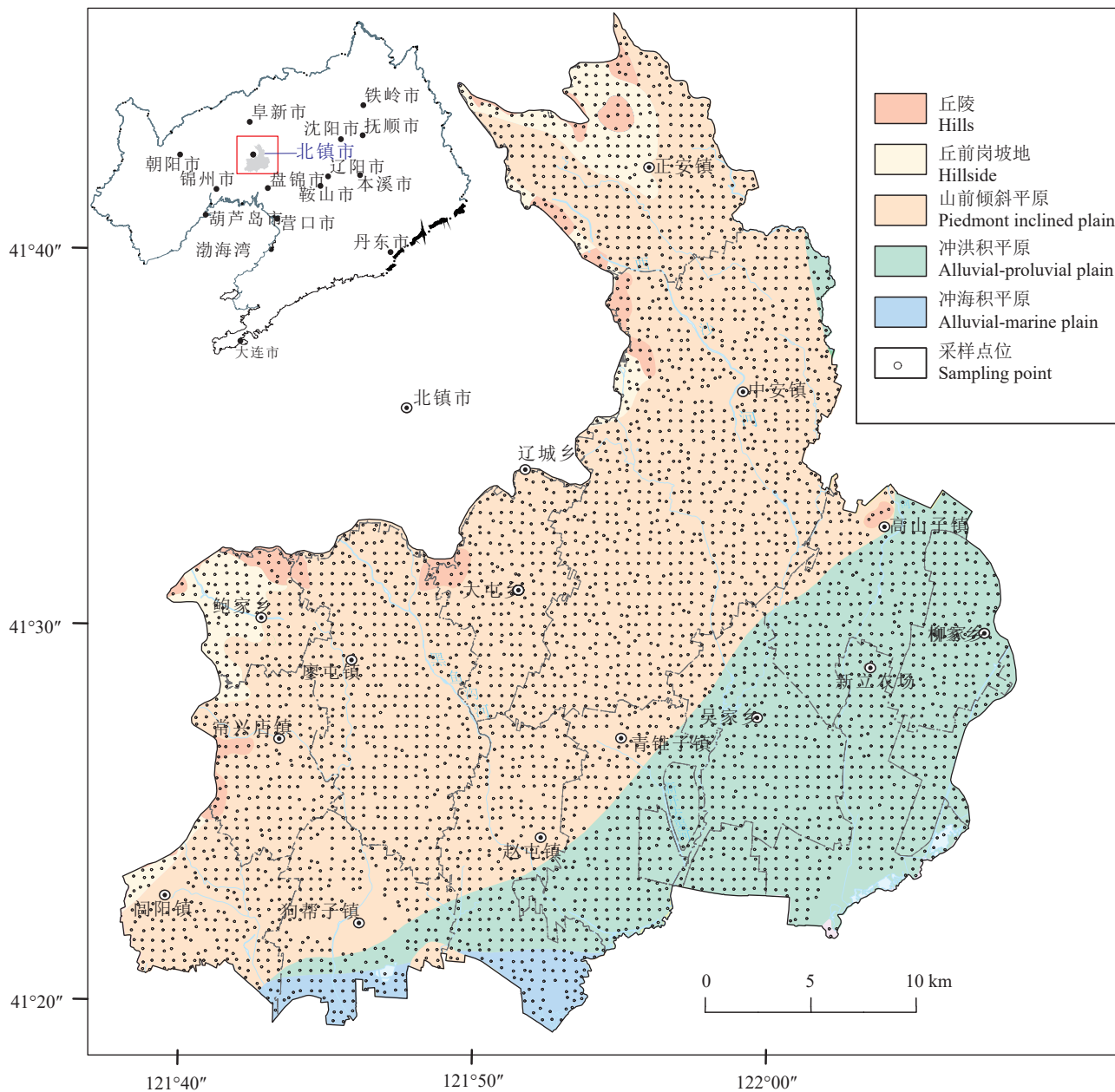


图1 研究区地貌类型及采样点分布图

Fig.1 Geomorphic types and sampling point distribution of the study area

晒干、碾碎后过10目的尼龙筛。

土壤重金属样品由辽宁省地质矿产研究院实验室分析测定完成,项目包括砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、镍(Ni)、锌(Zn)和pH等9项。测试过程执行《地质矿产实验室测试质量管理规范》(DZ/T0130.1—2006),采取实验室内部检查、密码抽查、外部检查等手段,严格监控分析测试准确度、精密度,重复性检验样品合格率均高于90%,各项质量指标均符合规范要求,分析

数据质量可靠。

3.2 评价方法

3.2.1 环境质量评价

环境质量评价参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)和《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)。GB 15618规定了农用地土壤污染风险筛选值和风险管制值两个指标,具体如表1和表2所示。

DZ/T 0295在GB15618风险筛选值基础上

给出了环境地球化学等级划分标准以及划分方法(表 3)。污染物 i 的单项污染指标 P_i 计算公式如下:

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

式中: P_i 为重金属元素的污染指数; C_i 为重金属含量实测值; S_i 为土壤环境质量标准值(农用地土壤污染风险筛选值)。

在单指标土壤环境地球化学等级基础上, 按照从劣不从优原则进行土壤环境地球化学综合等级划分。

3.2.2 重金属污染程度评价

采用德国学者 Muller(1969), 提出的地累积指数法(I_{geo})对研究区表层土壤重金属污染程度进行评价(Forstner et al.,1993), 该方法具有高效、定量、

准确的特点, 被广泛用于土壤重金属污染评价, 其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / kBE_i] \quad (2)$$

式中, I_{geo} 为地质累积指数; C_i 为样品中元素 i 的实测值 (mg/kg); BE_i 为地球化学背景值 (mg/kg), 以辽河流域土壤环境背景值作为评价标准; k 为消除各地岩石差异可能引起背景值的变动而采用的系数, 一般为 1.5。地累积指数污染等级划分如表 4 所示(李凤果等, 2020)。

3.2.3 潜在生态风险评价

潜在生态风险指数法(Hakanson, 1980)能够基于表层土壤重金属毒性、各污染物的生态效应和环境效应及环境金属元素背景值差异, 对单项和多种重金属元素的生态危害做出评估(张丁等, 2022), 计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \cdot \frac{C_i}{B_i} \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=0}^n E_r^i \quad (4)$$

式中: T_r^i 为重金属 i 的毒性系数, 毒性系数分别为 Hg=40、Cd=30、As=10、Cu=5、Pb=5、Ni=5、Cr=2 和 Zn=10(Hakanson, 1980; 徐争启等, 2008); C_i 为重金属 i 的实际测量值 (mg/kg); B_i 为重金属 i 的参比值 (mg/kg), 文中采用辽河流域农业地质调查中土壤重金属背景值作为参照, 涉及元素 Ni、Cu、Zn、Cd、Cr、Pb、As、Hg 区域背景值分别为 23 mg/kg、18.7 mg/kg、54 mg/kg、0.13 mg/kg、60 mg/kg、24 mg/kg、6.7 mg/kg、0.03 mg/kg; E_r^i 为第 i 种重金

表 1 农用地土壤污染风险筛选值

Table 1 Pollution risk screening value of agricultural land soil

序号	项目	风险筛选值/(mg/kg)			
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
1	水田	0.3	0.4	0.6	0.8
	其他	0.3	0.3	0.3	0.6
2	水田	0.5	0.5	0.6	1.0
	其他	1.3	1.8	2.4	3.4
3	水田	30	30	25	20
	其他	40	40	30	25
4	水田	80	100	140	240
	其他	70	90	120	170
5	水田	250	250	300	350
	其他	150	150	200	250
6	果园	150	150	200	200
	其他	50	50	100	100
7	镍	60	70	100	190
8	锌	200	200	250	300

表 2 农用地土壤污染风险管制值

Table 2 Pollution risk control value of agricultural land soil

序号	项目	风险管制值/(mg/kg)			
		pH≤5.5	5.5<pH≤6.5	6.5<pH≤7.5	pH>7.5
1	Cd	1.5	2.0	3.0	4.0
2	Hg	2.0	2.5	4.0	6.0
3	As	200	150	120	100
4	Pb	400	500	700	1000
5	Cr	800	850	1000	1300

表 3 土壤环境地球化学等级划分

Table 3 Geochemical classification of soil environment

等级	一等	二等	三等	四等	五等
土壤环境	$P_i \leq 1$ 清洁	$1 < P_i \leq 2$ 轻微污染	$2 < P_i \leq 3$ 轻度污染	$3 < P_i \leq 5$ 中度污染	$P_i > 5$ 重度污染

表4 地质累积指数分级标准

Table 4 Classification standard of geological accumulation index

等级	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级
I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5
描述	无污染	无到中度污染	中度污染	中度到强度污染	强度污染	强度到极强污染	极强污染

属的潜在生态风险系数;RI为多种重金属元素综合潜在生态风险指数。潜在生态风险等级划分标准见表5。

3.3 数据处理及图件编制

使用 ArcGIS 10.2 和 MapGIS 6.5 软件进行重金属元素空间插值、空间数据分析及图件绘制;采用 Excel 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计处理、Person 相关性分析及主成分分析等。

4 结果与分析

4.1 土壤重金属元素含量特征分析

对土壤中8种重金属元素含量进行描述性统计,结果见表6。土壤中As、Cd、Cr、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn元素含量范围分别为0.001~75.5 mg/kg、0.03~1.98 mg/kg、17.4~112.7 mg/kg、0~1.73 mg/kg、10.1~134.5 mg/kg、5.7~95.2 mg/kg、2.4~313.2 mg/kg、14.8~712.4 mg/kg,含量均值分别为7.23 mg/kg、0.17 mg/kg、55.3 mg/kg、0.05 mg/kg、23.54 mg/kg、23.08 mg/kg、24.13 mg/kg、65.82 mg/kg。8种重金属含量的中位数值均都小于平均值,反映出研究区

内土壤中8种重金属元素含量明显存在极大值。与辽宁省辽河流域土壤背景值相比,8种重金属中Cr和Pb的平均值均低于背景值,Ni的平均值约等于背景值,As、Cd、Hg、Cu和Zn的平均值分别为背景值的1.08、1.31、1.67、1.29和1.22倍,说明这5种元素在该区域农田土壤表层中存在一定的富集趋势(杨宇等,2023)。虽然Pb的含量平均值低于辽宁省辽河流域土壤背景值,但部分样品中的测定值远超背景值。因此,以上数据表明,土壤重金属元素累积主要是来自农业活动、工业活动、交通运输等方面(喻超等,2014),观察它们的极大值与极小值发现,各元素的极大值与极小值的差值甚为显著。

偏度系数是指描述数据分布情况的统计数据,其绝对值越小,表示数据分布趋势的偏斜度越小。峰度系数是指描述全部数据中取值分布情况陡斜程度的统计数据(凡生,2014;魏晓,2017),其绝对值越小,表示数据分布趋势的陡缓度与正态分布的差异程度越小(孙超,2010)。从表6可以看出,土壤中Hg、Pb、Cu、Zn、Cd、As含量的偏度系数与峰度系数较大,表示在部分土壤样品中Hg、Pb、Cu、Zn、Cd、As含量及累积状况较高。变异系数(CV)用于描述样品中金属元素平均变异度,其值越小,表示金属元素在空间分布越均匀,出现点源污染情况的概率越低(雷国建等,2013),同时也可反映土壤重金属受人为干扰程度(鲍丽然等,2020),变异系数

表5 重金属潜在生态风险等级

Table 5 Potential ecological risk levels of heavy metals

生态风险指数	生态风险等级			
	低度	中度	重度	严重
E_r^i	<40	40~80	80~160	>160
RI	<150	150~300	300~600	>600

表6 表层土壤重金属元素地球化学参数特征

Table 6 Characteristics of chemical parameters of heavy metal elements in surface soil

元素	最大值	最小值	平均值	中位数	标准差	偏度	峰度	变异系数	剔除3倍离差后平均值	富集系数	辽河流域背景值
As	75.5	0.001	7.23	6.8	2.63	6.27	124.44	0.36	7.03	1.05	6.70
Cd	1.98	0.03	0.17	0.16	0.09	6.37	84.28	0.55	0.16	1.23	0.13
Cr	112.7	17.4	55.3	53.1	13.24	0.64	0.21	0.24	55.04	0.92	60.00
Hg	1.73	0	0.05	0.05	0.06	14.87	321.78	1.15	0.045	1.50	0.03
Pb	134.5	10.1	23.54	23.1	4.04	8.52	207.99	0.17	23.34	0.97	24.00
Ni	95.2	5.7	23.08	21.7	7.38	0.88	2.13	0.32	22.94	1.00	23.00
Cu	313.2	2.4	24.13	20.8	17.56	7.21	78.26	0.73	21.1	1.13	18.70
Zn	712.4	14.8	65.82	56.6	43.52	6.88	69.79	0.66	58.37	1.08	54.00

注:标准差/富集系数/变异系数/偏度/峰度均无量纲;其他指标值的质量分数单位为mg/kg;土壤背景值来自于辽宁省辽河流域农业地质调查数据背景值。

越大,其差异与离散程度越大,土壤受外界干扰越显著,重金属在土壤中的分布越不均(Wang and Lu, 2011; 孙文贤等, 2021)。本研究区域内 8 种重金属元素的变异系数大小为: Hg(115%)>Cu(73%)>Zn(66%)>Cd(55%)>As(36%)>Ni(32%)>Cr(24%)>Pb(17%),其中 Hg、Cu、Zn 和 Cd 属于强度变异($CV>0.5$),表明 Hg、Cu、Zn 和 Cd 重金属元素离散程度较高,分布不均匀,在不同点位的含量差异较大,受某些局部污染源影响较为明显; As 和 Ni 属于中等程度变异($0.25<CV<0.5$),表明 As 和 Ni 重金属元素离散程度中等,人为因素对于 As 和 Ni 的累积有一定影响; Cr 和 Pb 属于弱变异 $CV<0.25$,表明 Cr 和 Pb 重金属元素离散程度较低,分布均匀,基本不受人造因素影响,主要与成土母岩的地球化学背景有关。从这 8 种重金属元素的变异系数来看, CV-Hg 最大(1.15),属于极度变异,说明该区域 Hg 元素的分布受外在因素影响显著。

研究区表层土壤各重金属元素地球化学分布如图 2 所示。Hg 元素含量较高区集中分布在研究区中部青堆子镇、中安镇、大屯乡一带,在高山子镇、闫阳镇、柳家乡零星分布,低值区分布在西部和北部地区。Cd 元素零星分布在全区,低值区主要分布在北部和西部地区。As 元素总体分布特征为东高西低,低值区主要分布在研究区北部和西部大部分地区。Ni 和 Cr 元素分布特征相似,青堆子镇到新立农场一带水田种植区周边为主要富集区,其次为高山子镇,西部和北部其他区相对较低。Cu 和 Zn 元素分布规律相似,青堆子镇—吴家镇—中安镇南部和柳家乡北部周边均明显富集,其次为大屯乡等地零星分布,北部、东部等区相对较低。Pb 元素主要在研究区南部水田种植区,条带状分布。

4.2 表层土壤环境质量评价

与环保部颁布的耕地土壤污染风险筛选值(表 7)相比,共发现 292 个点位超标。其中,存在 16 个土壤样点的 As 含量超标,超标率为 0.40%; Cd 有 136 个点位超标,超标率为 3.37%; Cu 有 85 个点位超标,超标率为 2.02%; Zn 有 51 个点位超标,超标率为 1.27%; Hg 和 Ni 有 1 个点位超标,超标率为 0.025%; Pb 有 2 个点位超标,超标率为 0.05%; Cr 不存在点位超标现象。各元素超标率大

小为 $Cd>Cu>Zn>As>Pb>Hg=Ni>Cr$,其中只有 1 个土壤样点 Cd 超过土壤污染风险管制值(表 8),表明研究区 Cd 污染情况严重,污染范围广,并且存在局部重度污染,主要原因是研究区农田施用含有 Cd 的农药和肥料造成的 Cd 超标(鲍士海, 2013); Cu 和 Zn 污染来源于成土母质和化肥,但化肥中 Cu 和 Zn 含量较低; As 污染范围集中分布在灌溉河渠两侧,表明研究区 As 污染来源是污染河水灌溉; Pb、Hg、Ni 污染比例小于 0.05%,仅有个别点存在污染,主要来源为燃煤、大气沉降、过量的化肥施加、汽车尾气排放(于锐等, 2017); Cr 不存在污染,主要来源为成土母质。

总体来看,研究区表层土壤环境地球化学综合等级以清洁无污染为主,剔除重复采样点,共有 217 组样品存在不同程度的重金属污染情况,超标比率为 5.4%,超标点全区都有分布,绘制研究区地表土壤环境地球化学综合等级分布图(图 3),每个评价单元的土壤环境地球化学综合等级等同于单指标划分出的环境等级最差的等级。土壤环境综合等级结果(表 9)显示,调查区 97.683% 土地为清洁状态。受 Pb、As、Cu、Cd、Hg 和 Zn 影响,有 2.093% 土地为轻微污染状态。受 Cu、Cd 和 Zn 影响,有 1.406% 土地为轻度污染状态。受 Cu、Cd 和 Zn 影响,有 1.038% 土地为中度污染状态。受 Cu 和 Cd 单点污染影响,0.072% 土地表现为重度污染。可以看出,所采集的样品中,Cd 污染最为严重,Cu 和 Zn 污染情况也不容忽视。

4.3 重金属污染程度评价

以辽宁省辽河流域背景值为标准,对研究区土壤重金属污染程度进行地累积指数评价(表 10)。重金属污染指数均值从高至低为: $As(0.04)>Hg(0.03)>Cd(-0.33)>Cu(-0.38)>Zn(-0.44)>Pb(-0.63)>Ni(-0.65)>Cr(-0.74)$,土壤 As 和 Hg 污染现象最为突出,总体处于轻污染水平。所有土壤样都受到不同程度的 Hg 污染,仅个别点位土壤为重—极重污染。8 种重金属污染等级主要在 1~3 级之间,按照受污染点位占比降序排列为 As(51.90%)、Hg(49.39%)、Cd(25.59%)、Cu(19.84%)、Zn(15.72%)、Ni(8.28%)、Cr(1.09%)、Pb(0.37%),单元素污染程度以轻度—中度污染为主,强污染土壤点位较少,仅 Hg 元素个别点位土壤为强—极强污染。因此,

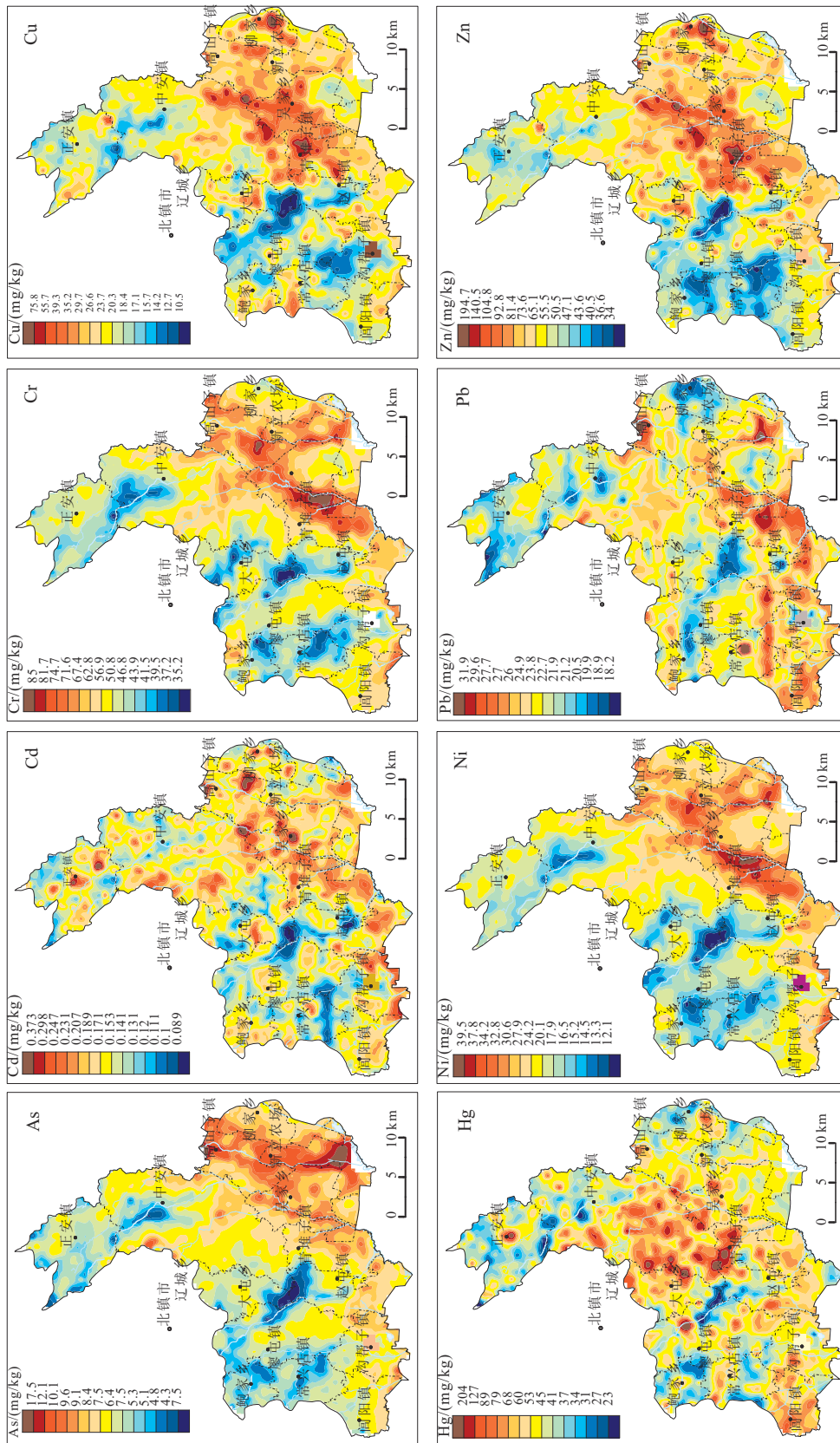


图 2 北镇农业区表层土壤重金属元素地球化学分布图
Fig.2 Geochemical distribution of heavy metals in surface soil of Beizhen agricultural area

表 7 农用地土壤污染风险筛选情况统计

Table 7 Statistics of pollution risk screening of agricultural land soil

pH值范围	样品数量/个	重金属风险筛选超标数/个							
		As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
≤5.5	1308	0	32	0	11	1	1	1	2
5.5~6.5	1091	1	54	0	59	0	0	1	34
6.5~7.5	881	0	49	0	15	0	0	0	14
>7.5	753	15	1	0	0	0	0	0	1
合计	4033	16	136	0	85	1	1	2	51
超标率/%	—	0.40	3.37	0	2.12	0.025	0.025	0.05	1.27

表 8 农用地土壤污染风险管制情况统计

Table 8 Statistics of pollution risk control of agricultural land soil

pH值范围	Cd		Hg		As		Pb		Cr	
	管制值	超标数/个	管制值	超标数/个	管制值	超标数/个	管制值	超标数/个	管制值	超标数/个
≤5.5	1.5	1	2	0	200	0	400	0	800	0
5.5~6.5	2	0	2.5	0	150	0	500	0	850	0
6.5~7.5	3	0	4	0	120	0	700	0	1000	0
>7.5	4	0	6	0	100	0	1000	0	1300	0
合计		1		0		0		0		0
超标率/%		0.025		0		0		0		0

金属元素在空间分布越均匀, 出现点源污染情况的概率越低(雷国建等, 2013), 研究区农田土壤 As 和 Hg 的累积受某些局部污染源影响较为明显, Cd、Cu 及 Zn 的累积受人因素有一定影响。锦州市北镇农业区土壤 Ni、Cr、Pb 含量的变异系数均呈弱变异性, 表明自然因素对这 3 种重金属元素的累积影响较为不明显。因此, As 和 Hg 为研究区土壤主要相对高风险元素, Cd、Cu、Zn 次之, Pb、Ni 极个别样点可达到中度污染, 其余全为无污染—中度污染。

4.4 重金属潜在生态风险评价

研究区土壤重金属潜在生态危害指数评价风险指数分级统计结果(表 11)显示, 单指标潜在生态风险由高到低排序为: Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn, 全区地表土壤样品潜在生态风险综合指数 RI 分布范围为 29.7~2358.16, 平均值为 141.9, 以低度风险为主, 其次中度风险。

Hg 的生态风险级别在强风险及以上的样点占比为 8 种重金属元素中最高, 潜在生态风险指数范围为 0.0013~2311.42, 存在低度至严重潜在生态风险, 以中度为主, 占比为 54.37%, 有 689 组样品存在重度潜在生态风险, 有 156 组样品存在严重潜在生态风险。Cd 潜在生态风险指数范围为 7.25~455.85, 存在低度至严重潜在生态风险, 以低度和中度为主, 分布占样本总数的 62.39% 和 34.91%, 有 16 组样品存在严重潜在风险; As 和 Cu 潜在生态风

险指数均值分别为 10.79 和 6.45, 以低度风险等级为主, 分别有 5 组和 16 组样品生态风险指数大于 40; Cr、Pb、Ni 和 Zn 潜在风险指数均小于 40, 为低度生态风险。

各重金属潜在生态风险等级分区图(图 4)显示, 高风险样点在空间分布上的特征基本与地累积污染指数得到的结果保持一致: 中风险区连片分布在研究区中部和南部地区, 重度到严重风险区主要零星分布在研究区中部。因此, Hg 为研究区土壤主要相对高风险元素, Cd 次之, Cu、As 极个别样点可达到中度至重度风险, 其余全为低风险—无风险。主要高风险重金属为 Hg、Cd, 其他大片区域, 生态风险低。

4.5 重金属污染来源解析

土壤表层重金属超标常常是母岩自然风化与人为活动共同影响的结果。对研究区表层土壤重金属含量进行 Pearson 相关性分析, 分析结果表明(表 12), As、Cr、Ni 这 3 种元素两两之间均为极显著相关($P<0.01$), 说明具有相似的污染源, Cr 和 Pb 呈显著正相关; Cu 和 Zn 呈显著正相关, 具有相似的污染源; Cd 和 Hg 为显著相关($P<0.05$)与其他重金属相性较弱, 可能有不同污染源(李秋燕等, 2021)。为了更加准确地识别重金属来源, 进一步用主成分分析和聚类分析对土壤中重金属进行分析。

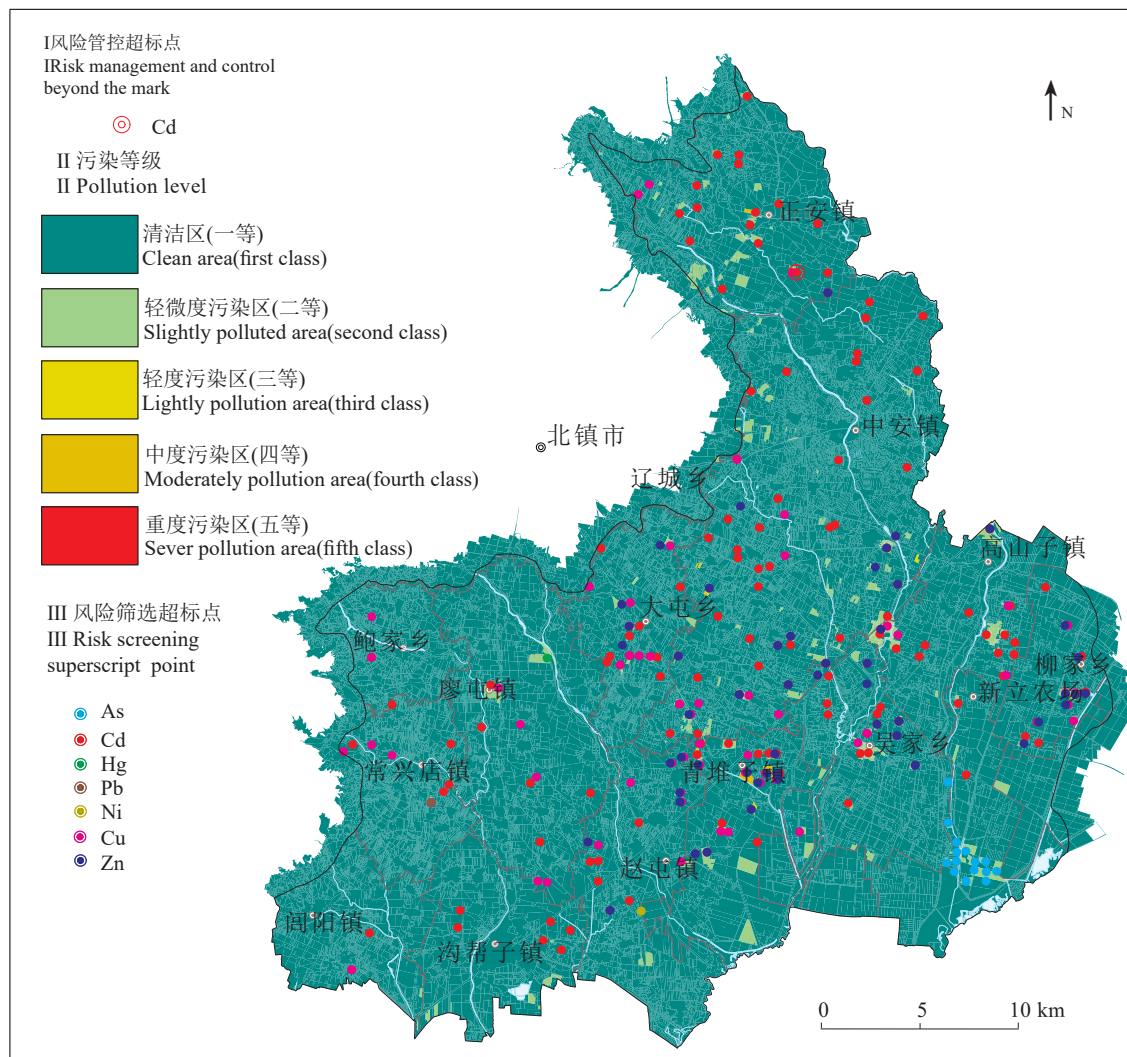


图3 研究区环境地球化学综合等级分布图

Fig.3 Distribution of the comprehensive level of environmental chemistry in the study area

主成分分析能够有效判别重金属元素来源,同一主成分分组元素或聚类分析中同类以及距离较近元素性质相似或来源相同(王伟鹏等, 2020)。通过主成分分析可以达到以较少的变量代替原先数量较多变量的目的,可以认为同一主成分上有较高载荷的元素可能有着相似的来源。对研究区表层土壤重金属的主成分分析提取出 2 个主成分(表 13),其累积贡献率达到 64.68%,此 2 种主成分代表了土壤重金属的主要影响因素。

第一主成分(F1)贡献率达 43.58%, As、Cr、Ni、Pb 载荷均较高(As 0.828、Cr 0.902、Ni 0.914、Pb 0.636),结合前期实地调研及收集到的资料可以初步判断,研究区内重金属最大的污染来源为自然

源、人为源和复合源三大类,母岩风化、道路交通、耕地施肥和采矿活动“三废”排放,通过大气降尘、随降雨冲刷和污水灌溉等过程导致的重金属在水和土两种主要环境介质中的转移扩散(杨宇等, 2023)。本研究表层土壤中 As、Cr、Ni 平均含量与区域背景值接近,因此 As、Cr、Ni 主要受母岩自然风化因素影响(陈小敏等, 2015; Ma et al., 2016),研究区农田土壤 As 的累积受某些局部污染源影响较为明显,南部表水灌溉区及周边土壤污染严重,污水灌溉加剧了土壤中 As 的积累,地累积指数评价结果与潜在生态风险指数评价结果一致(图 2, 图 3);除自然源对 Pb 有所影响外,Pb 含量超标的区域集中于人口密集处(汤金来等, 2023)、水田种

表 9 研究区土壤环境元素等级统计

Table 9 Statistics of soil environmental element levels in the study area

元素		一级	二级	三级	四级	五级
Cu	面积/km ²	1114.199	5.449	0.774	0.673	0.056
	比例/%	99.38	0.486	0.069	0.06	0.005
Ni	面积/km ²	1121.15				
	比例/%	100.00				
Cd	面积/km ²	1105.017	15.337	0.482	0.280	0.022
	比例/%	98.561	1.368	0.043	0.025	0.002
Pb	面积/km ²	1120.99	0.16			
	比例/%	99.99	0.01			
As	面积/km ²	1118.88	2.27			
	比例/%	99.80	0.20			
Hg	面积/km ²	1119.832	1.313			
	比例/%	99.88	0.12			
Zn	面积/km ²	1117.986	2.218	0.912	0.029	
	比例/%	99.72	0.198	0.081	0.003	
Cr	面积/km ²	1121.15				
	比例/%	100.00				
综合	面积/km ²	1095.168	23.461	1.406	0.982	0.078
	比例/%	97.683	2.093	0.125	0.093	0.007

植区以及大棚种植区等。其中,主要是因污水灌溉以及化肥等农用物质的不合理施用等因素造成了相应影响。实际上,原生土壤重金属元素含量在空间上的差异受多种因素制约,如元素的化学性质、存在状态和载体矿物的风化作用、气候、水文条件

和生物活动等,都可能影响土壤重金属元素的地球化学行为,从而造成其在空间上的相对富集(郝立波等,2005),人类活动则不同程度地加剧了其空间分布的不均匀性(任宇等,2024)。本研究结果(图 1,图 2)与研究区域的地质背景、土壤地球化学性质以及污染源类型等有着密不可分的关系,因此对该结果的深入解释尚需更多数据辅助验证。

第二主成分(F2)Cu、Zn、Cd、Hg 具有较高载荷(Cu 0.92、Zn 0.92、Cd 0.53、Hg 0.49),其贡献率达 21.1%,

研究表明表层土壤里的 Cu、Zn 含量于人口稠密、人为活动干扰相对剧烈的区域偏高(崔邢涛等,2016),能够认定人为活动为其主导成因,主要受农业活动、交通排放、大气沉降等要素作用。潜在生态风险评价结果与各重金属超标率还发现,Cu 是研究流域内超标率较高的重金属,同时表现出较高的生态风险,Zn 的超标比率仅低于 Cu 但具有较低的生态风险,这可能与两种元素的化学性质有关(杨宇等,2023)。相关研究表明,农田土壤中的重金属易向作物转移并积累;Cd、Hg 元素则具有独特性,Hg 为相对高风险元素,Cd 次之,主要受人为活动影响而进入土壤,主要方式有工业生产、农业生产、交

表 10 研究区单元素地累积指数分级统计

Table 10 Classification statistics of single element ground accumulation index in the study area

等级	1级	2级	3级	4级	5级	6级	7级	I_{geo} 均值	受污染点位占比%
描述	无污染	无—中度污染	中度污染	中度—强度污染	强度污染	强—极强污染	极强污染		
As	1940	2037	51	4	1	0	0	0.04	51.90
Hg	2041	1706	213	53	13	4	3	0.03	49.39
Cr	3989	44	0	0	0	0	0	-0.74	1.09
Pb	4018	13	2	0	0	0	0	-0.63	0.37
Cd	3001	961	59	10	2	0	0	-0.33	25.59
Cu	3233	684	88	22	6	0	0	-0.38	19.84
Zn	3399	540	71	20	3	0	0	-0.44	15.72
Ni	3699	333	1	0	0	0	0	-0.65	8.28

表 11 研究区重金属元素潜在生态风险指数分级统计

Table 11 Classification statistics of potential ecological risk index of heavy metal elements in the study area

风险等级	潜在生态风险指数			各风险等级样本数/个				
	最小值	最大值	平均值	低度	中度	重度	严重	
E_r^i	As	0.0015	112.61	10.79	4028	4	1	0
	Cd	7.25	455.85	39.21	2516	1408	93	16
	Cr	0.58	3.76	1.84	4033	0	0	0
	Hg	0.0013	2311.42	72.48	592	2596	689	156
	Pb	2.1	28.03	4.9	4033	0	0	0
	Ni	1.23	20.69	5.02	4033	0	0	0
	Cu	0.65	83.76	6.45	4017	15	1	0
Zn	0.27	13.19	1.22	4033	0	0	0	
RI		29.7	2358.16	141.9	2842	1091	80	20

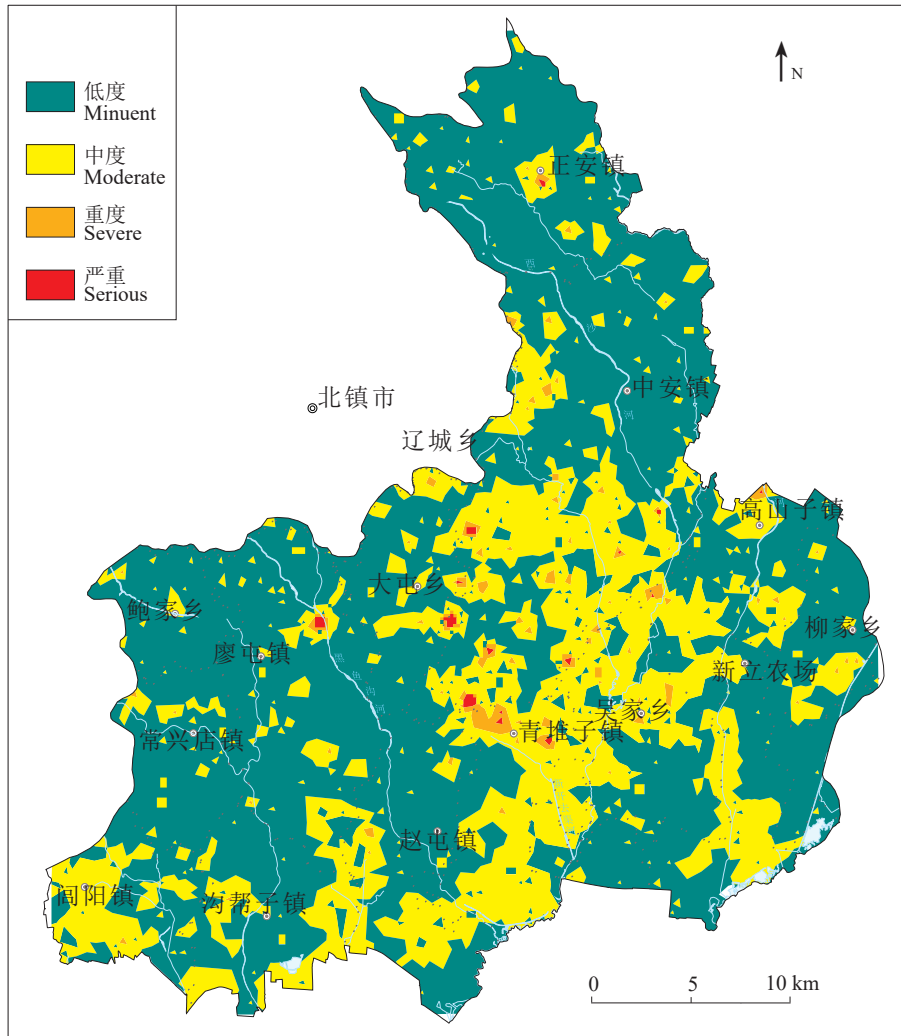


图4 研究区重金属潜在生态风险等级分区图
Fig.4 Classification of potential ecological risks of heavy metals in the study area

表 12 研究区表层土壤重金属元素含量相关性
Table 12 Correlation of heavy metal elements in surface soil of study area

重金属	As	Cd	Cr	Hg	Pb	Ni	Cu	Zn
As	1							
Cd	0.3039	1						
Cr	0.6444**	0.2807	1					
Hg	0.0639	0.1725	0.092	1				
Pb	0.4505*	0.2987	0.4201*	0.0612	1			
Ni	0.7019**	0.2457	0.935**	0.0528	0.3924	1		
Cu	0.2485	0.4099*	0.2797	0.2482	0.1237	0.2776	1	
Zn	0.2729	0.3801	0.2913	0.2729	0.1284	0.2975	0.9304**	1

注: **表示 $P < 0.01$, 为极显著相关; *表示 $P < 0.05$, 为显著相关。

通运输,甚至建筑活动等多种来源。

聚类分析可验证主成分分析结果的准确性,结果反映重金属的类别情况,研究区表层土壤重金属元素的聚类分析如图5所示。在土壤重金属含量

基础上,确定距离为0.5~0.6时,可分为5类:第1类重金属元素包括Cr、Ni和As,根据相关性分析和因子分析的结果,Cr、Ni可能来源于土壤母质,As可能来源于复合源;第2类重金属元素为Pb;第

表 13 表层土壤重金属元素含量主成分

Table 13 Principal component of heavy metal elements content in surface soil

成分	初始特征值			提取平方和荷载			旋转成分矩阵		
	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%	重金属	F1	F2
1	3.49	43.58	43.58	3.49	43.58	43.58	As	0.828	0.145
2	1.69	21.1	64.68	1.69	21.1	64.68	Cd	0.311	0.531
3	0.89	11.09	75.77				Cr	0.902	0.153
4	0.83	10.4	86.17				Hg	-0.031	0.490
5	0.59	7.34	93.52				Pb	0.636	0.050
6	0.39	4.91	98.43				Ni	0.914	0.136
7	0.07	0.86	99.28				Cu	0.147	0.925
8	0.06	0.72	100				Zn	0.16	0.921

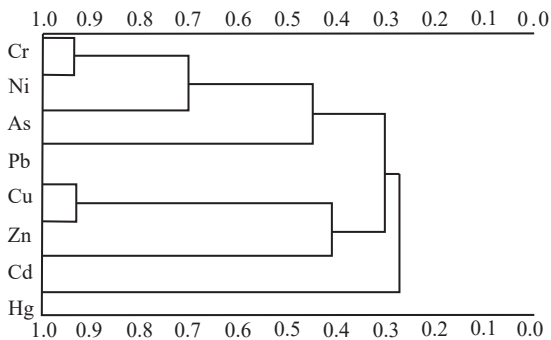


图 5 研究区表层土壤重金属聚类结果

Fig.5 Clustering results of heavy metals in surface soil of the study area

3 类重金属元素为包括 Cu 和 Zn; 第 4 类重金属元素为 Cd; 第 5 类重金属元素为 Hg。这说明 Cr、Ni 和 As 可能有相似的来源, Cu 和 Zn 可能有相似的来源, Cd、Hg 和 Pb 来源较为复杂。

综合相关性分析、聚类分析和主成分分析进行对比分析, 可以将 8 种重金属的来源划归为 5 类。第 1 类: Cr、Ni 和 As 这 3 种重金属元素, 其主要来源于自然源(陈雅丽等, 2019), 相关性分析、聚类分析和主成分分析都表明这 3 种重金属具有同一来源。统计性分析结果(表 6)表明, Cr、Ni 和 As 这 3 种元素平均值接近辽河流域土壤元素背景值, 元素离散程度较高, 分布不均匀, 在不同点位的含量差异较大, 这反映它们在表层土壤中基本保持了原始背景状态, 主要受土壤环境生物地球化学作用和成土母质的控制, 受人为活动影响较小或基本未受影响。第 2 类: Pb, 分析表明 Pb 与 Hg 来源相反、与 As、Cr、Ni 有同一来源, 平均值低于辽河流域土壤元素背景值, 仅有个别样品有超标现象。因此, 综合判定其主要来源于自然源, 其次为交通源和工农业污染源(姜佰文等, 2020)。第 3 类: Cu 和 Zn,

属于强度变异, 反映受人为活动影响较大, 其主要来源为工农业污染源(邵莉等, 2012), 交通源次之, 存在面源污染。第 4 类: Cd, 相关性分析表明 Cd 与其他几种重金属元素都存在一定的联系, 这说明 Cd 主要来源于交通源、自然源和工农业污染源(汤金来等, 2023)。第 5 类: Hg, 属于极度变异, 其主要来源于工农业污染源, 主要为点源污染, 说明该区域 Hg 元素的受人类活动干扰较为严重。

5 结论

(1) 锦州市北镇农业区土壤质量总体良好, 但存在一定程度的富集现象, 其中 Hg 富集作用最为明显, Cd、Cu、Zn、As 含量超过风险筛选值的比例分别为 45.56%、29.11%、11.47% 和 5.48%, Cr 元素没有超过风险筛选值, 土壤质量中度污染—重度污染区主要受 Cu、Cd 和 Zn 影响, (除 Cd 有 1 个样点超过风险管制值外) 其他均低于土壤环境质量管制值。

(2) 据重金属污染程度评价结果, 单指标重金属污染等级主要在 1~3 级, As 和 Cd 属于轻度污染状态, 大部分土壤样品的重金属属于无—轻度的污染状态, 仅 Hg 元素个别点位土壤为强—极强污染, 受污染点位占比由大到小排序为 As>Hg>Cd>Cu>Zn>Ni>Cr>Pb。

(3) 重金属潜在生态风险评价结果表明, Hg 为研究区土壤主要相对高风险元素, Cd 次之, Cu、As 极个别样点可达到中度至重度风险, 其余全为低风险—无风险, 单指标潜在生态风险由高到低排序为: Hg>Cd>As>Cu>Ni>Pb>Cr>Zn, 全区地表土壤样品潜在生态风险综合指数 RI 分布范围为 29.7~2358.16, 平均值为 141.9, 以低度风险为主, 其次中度风险, 重度及严重风险区零星分布在研究区中部, 其他大片区域为生态风险低区。

(4)研究区表层土壤重金属来源可分为三类:①Ni、Cr、As 和 Pb 具有同源性,Ni、Cr 主要受母岩自然风化因素影响,As、Pb 除受成土母质影响外,还受农业生产和工业生产活动的影响;②Cu 和 Zn 的污染源主要受人类活动的影响,人为源主要为农业生产活动,并且 Cu 的污染来源较为复杂,在一定程度上也受交通排放、工业生产等的影响;③Cd 和 Hg 与其他重金属相关性较弱,有不同污染源,Cd、Hg 元素则具有独特性,农业生产、交通排放、污水灌溉等多种来源。

References

- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological and health risk assessment of heavy metals in farmland soil of northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Bao Shihai. 2013. Current status and analysis of soil environmental quality of basic farmland in Jinzhou City[J]. *Journal of Green Science and Technology*, (12): 184–185(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaomin, Zhu Baohu, Yang Wen. 2015. Sources, spatial distribution and contamination assessments of heavy metals in gold mine area soils of Miyun Reservoir upstream, Beijing, China[J]. *Environmental Chemistry*, 34(12): 2248–2256 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yali, Weng Liping, Ma Jie, Wu Xiaojuan, Li Yongtao. 2019. Research progress on source apportionment of heavy metal pollution in Chinese soil in the past decade[J]. *Journal of Agricultural Environmental Science*, 38(10): 2219–2238 (in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Song Zefeng. 2016. A study of the spatial distribution and source of heavy metals in urban soil in Shijiazhuang City[J]. *Geology in China*, 43(2): 683–690 (in Chinese with English abstract).
- Fan Sheng. 2014. Accumulation and Risk Study of Heavy Metal Element Pollution in Mining Areas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 1–65(in Chinese with English abstract).
- Forstner U, Ahlf W, Calmano W. 1993. Sediment quality objectives and criteria development in Germany[J]. *Water Science and Technology*, 28(8): 307–314.
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control a sediment to logical approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Hao Libo, Lu Jilong, Ma Li. 2005. The relationship and significance between soil chemical composition and bedrock chemical composition in shallow covering areas: A case study of the northern Daxing'an Mountains[J]. *Geology in China*, 32(3): 477–482(in Chinese with English abstract).
- Huang Yong, Duan Xuchuan, Yuan Guoli, Li Huan, Zhang Qinrui. 2022. Geochemistry and source identification of heavy metals in the top and sub-soil of Yanqing District in Beijing[J]. *Geoscience*, 36(2): 634–644 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Baiwen, Lu Lei, Wang Chunhong, Gao Qiang, Zhang Di, Chen Xi, Wang Yanling. 2020. Effect of organic fertilizer application on heavy metals accumulation in soil and risk assessment[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 51(4): 37–44(in Chinese with English abstract).
- Lei Guojian, Chen Zhiliang, Liu Qianjun, Peng Xiaochun, Jiang Xiaolu, Ou Yingjuan, Zhou Ding, Li Fanghong. 2013. Assessment of soil heavy metal pollution level and potential ecological hazards in suburban areas of Guangzhou[J]. *Chinese Journal of Environmental Sciences*, 33(S1): 49–53 (in Chinese with English abstract).
- Li Fengguo, Chen ming, Shi Yanli, Zheng Xiaojun, Liu Yan, Liu Youcun, Tao Meixia, Hu Lanwen. 2020. Spatial distribution and pollution characteristics of heavy metals in sediments of the upper reaches of Ganjiang River[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 39(3): 920–927(in Chinese with English abstract).
- Li Qiuyan, Wei Minghui, Dai Huimin, He Pengfei, Liu Kai. 2021. Characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in Jinzhou City[J]. *Geology and Resources*, 30(4): 465–472 (in Chinese with English abstract).
- Lin Yanping, Zhao Yang, Hu Gongren, Su Guangming. 2011. Application of multivariate statistics in source analysis of soil heavy metal pollution[J]. *Earth and Environment*, 39(4): 536–542(in Chinese with English abstract).
- Liu Tong, Liu Chuanpeng, Deng Jun, Kang Pengyu, Wang Kaikai, Zhao Yuyan. 2022. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in eastern Yinan County, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1497–1508 (in Chinese with English abstract).
- Lü Jianshu, Zhang Zulu, Liu Yang, Dai Jeirui, Wang Xue, Wang Maoxiang. 2012. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in Rizhao City[J]. *Acta Geographica Sinica*, 67(7): 971–984 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhenghu, Qu Xiangning, He Zhirun, Zhao Xini, Liu Yaqing, Zhang Yuxun, Yang Lei. 2022. Spatial distribution characteristics and source analysis of heavy metals in sediments of Ningxia Yuehai Lake[J]. *Journal of Hydroecology*, 43(2): 116–124 (in Chinese with English abstract).
- Ma Z, Chen K, Li Z, Bi J, Huang L. 2016. Heavy metals in soils and road dusts in the mining areas of Western Suzhou, China: A preliminary identification of contaminated sites[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 16(1): 204–214.
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 2: 109–118.

- Ning Zengping, Lan Xiaolong, Huang Zhengyu, Chen Haiyan, Liu Yizhang, Xiao Tangfu, Zhao Yanlong. 2017. Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang River[J]. *China Environmental Science*, 37(8): 3036–3047 (in Chinese with English abstract).
- Ren Yu, Cao Wengeng, Xiao Shunyu, Li Xiangzhi, Pan Deng, Wang Shuai. 2024. Research progress on distribution, harm and control technology of heavy metals in soil[J]. *Geology in China*, 51(1): 118–142 (in Chinese with English abstract).
- Shao Li, Xiao Huayun, Wu Daixun, Tang Congguo. 2012. Research progress on heavy metal pollution from transportation sources[J]. *Earth and Environment*, 40(3): 445–459 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chao. 2010. Distribution and Accumulation Characteristics of Heavy Metals in Farmland Soil of Chongming Island[D]. Shanghai: East China Normal University, 1–155(in Chinese with English abstract).
- Sun L G, Liu D K, Ke M, Hui Z, Yuan Y J, Zhu F Q, Gang H. 2019. Levels, sources, and spatial distribution of heavy metals in soils from a typical coal industrial city of Tangshan, China[J]. *Catena*, 175: 101–109.
- Sun Wenxian, Niu Xiaoyin, Zheng Jiawen, Liu Aiju, Li Menghong. 2021. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in facility farmland soil in Gaoqing County[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 35(3): 17–23 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jinlai, Zhao Kuan, Hu Ruixin, Xu Tao, Wang Yixuan, Yang Yang, Zhou Baohua. 2023. Characteristics, source apportionment, and pollution assessment of heavy metal content in surface soil of Chuzhou City[J]. *Environmental Science*, 44(6): 3562–3572 (in Chinese with English abstract).
- Tang Jiang. 2005. Study on the Regularity of Move, Enrichment, and Translation of Cadmium and Other Heavy Metals in the District of the Three Gorges Reservoir[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1–117 (in Chinese with English abstract).
- Tume P, González E, Reyes F, Fuentes J P, Roca N, Bech J, Medina G. 2019. Sources analysis and health risk assessment of trace elements in urban soils of Hualpen, Chile[J]. *Catena*, 175: 304–316.
- Wang A T, Wang Q, Li J, Yuan G L, Albanese S, Petrik A. 2019. Geo-statistical and multivariate analyses of potentially toxic elements' distribution in the soil of Hainan Island (China): A comparison between the topsoil and subsoil at a regional scale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 197: 48–59.
- Wang H Y, Lu S G. 2011. Spatial distribution, source identification and affecting factors of heavy metals contamination in urban-suburban soils of Lishui City, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 64(7): 1921–1929.
- Wang Weipeng, Lu Hongwei, Feng Sansan. 2020. Ecological risk assessment of soil heavy metals in the central area of one river and two rivers in Tibet[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 37(6): 970–980 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhongyang. 2018. Cultivated Soil Heavy Metal Pollution Risk Assessment and Analysis of Heavy Metal Sources in chaoyang area[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 1–133 (in Chinese with English abstract).
- Wei Xiao. 2017. Soil geochemistry and heavy metal accumulation characteristics in Jiangxinzhou, Anhui section of the Yangtze River [D]. Nanjing: Nanjing University, 1–68(in Chinese with English abstract).
- Xiao J Q, Yuan X Y, Li J Z. 2010. Characteristics and transformation of heavy metal pollution in soil and rice of Yangtze River Delta Region[J]. *Agricultural Science & Technology*, (4): 148–151.
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, Tuo Xianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 31(2): 112–115 (in Chinese with English abstract).
- Yan Hongze, Zhou Guohua, Sun Binbin, He Ling, Liu Yinfei, Hou Shujun. 2018. Geochemical characteristics of the bayberry producing area in Longhai, Fujian[J]. *Geology in China*, 45(6): 1155–1166 (in Chinese with English abstract).
- Yang Q, Li Z, Lu X, Duan Q, Huang L, Bi J. 2018. A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 642: 690–700.
- Yang Yu, Guo Tingting, Liu Xiaoli, Tie Baiqing. 2023. Spatial distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in farmland soils in typical agricultural small watersheds in southern mining areas[J]. *Environmental Science*, 44(3): 1602–1610 (in Chinese with English abstract).
- Yin Dechao, Qi Xiaofan, Wang Yushan, Xu Rongzhen, An Yonghui, Wang Xuqing, Geng Hongjie. 2022. Geochemical characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Baiyangdian Lake, Xiong'an New District[J]. *Geology in China*, 49(3): 979–992 (in Chinese with English abstract).
- Yu Chao, Wang Hongjin. 2014. Agro-ecological Geochemical Survey and Evaluation in Linyi City, Shandong Province[R]. Jinan: Shandong Institute of Geological Survey.
- Yu Rui, Wang Yang, Wang Chenxu, Wang Qicun, Cui Zhengwu. 2017. Analysis of heavy metal pollution status and sources in black soil of corn planting area in Yushu City[J]. *Journal of Ecological Environment*, 26(10): 1788–1794 (in Chinese with English abstract).
- Yuan G L, Sun T H, Han P, Li J. 2013. Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 130: 15–21.
- Zhang Ding, Huang Rong, Gao Xuesong. 2022. Spatial characteristics and potential ecological risk factors of heavy metals in cultivated land in transition zone of mountain plain[J]. *Environmental Science*, 43(2): 946–956 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Xianyi, Pang Chengbao, Wang Anting, Yuan Guoli, Sang Xuezheng, Li Yuanzhong, Yang Yi. 2020. Distribution characteristics and source identification of heavy metals in topsoils and subsoils of Hainan Island[J]. *Geoscience*, 34(5): 970–978 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Guo Changlai, Li Xuguang, Sun Xiubo. 2021. Geological heritage resource endowment and protective utilization in Jinzhou City, Liaoning Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1688–1696 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 鲍丽然, 邓海, 贾中民, 李瑜, 董金秀, 严明书, 张风雷. 2020. 重庆秀山西北部农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 47(6): 1625–1636.
- 鲍士海. 2013. 锦州市基本农田土壤环境质量现状及分析[J]. *绿色科技*, (12): 184–185.
- 陈小敏, 朱保虎, 杨文, 季宏兵. 2015. 密云水库上游金矿区土壤重金属空间分布、来源及污染评价[J]. *环境化学*, 34(12): 2248–2256.
- 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 武晓娟, 李永涛. 2019. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 38(10): 2219–2238.
- 崔邢涛, 栾文楼, 宋泽峰, 马云超. 2016. 石家庄城市土壤重金属空间分布特征及源解析[J]. *中国地质*, 43(2): 683–690.
- 黄勇, 段续川, 袁国礼, 李欢, 张沁瑞. 2022. 北京市延庆区土壤重金属元素地球化学特征及其来源分析[J]. *现代地质*, 36(2): 634–644.
- 凡生. 2014. 矿集区重金属元素污染累积与风险研究[D]. 广州: 华南理工大学, 1–65.
- 郝立波, 陆继龙, 马力. 2005. 浅覆盖区土壤化学成分与基岩化学成分的关系及其意义——以大兴安岭北部地区为例[J]. *中国地质*, 32(3): 477–482.
- 姜佰文, 陆磊, 王春宏, 高强, 张迪, 陈曦, 王艳玲. 2020. 施用有机肥对土壤重金属累积的影响及风险评价[J]. *东北农业大学学报*, 51(4): 37–44.
- 雷国建, 陈志良, 刘千钧, 彭晓春, 蒋晓璐, 欧英娟, 周鼎, 李方鸿. 2013. 广州郊区土壤重金属污染程度及潜在生态危害评价[J]. *中国环境科学*, 33(S1): 49–53.
- 李凤果, 陈明, 师艳丽, 郑小俊, 刘燕, 刘友存, 陶美霞, 胡兰文. 2020. 赣江上游沉积物重金属空间分布及污染特征[J]. *生态学杂志*, 39(3): 920–927.
- 李秋燕, 魏明辉, 戴慧敏, 贺鹏飞, 刘凯. 2021. 锦州市土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *地质与资源*, 30(4): 465–472.
- 林燕萍, 赵阳, 胡恭任, 苏光明. 2011. 多元统计在土壤重金属污染源解析中的应用[J]. *地球与环境*, 39(4): 536–542.
- 刘同, 刘传朋, 邓俊, 康鹏宇, 王凯凯, 赵玉岩. 2022. 山东省沂南县东部土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 49(5): 1497–1508.
- 吕建树, 张祖陆, 刘洋, 代杰瑞, 王学, 王茂香. 2012. 日照市土壤重金属来源解析及环境风险评价[J]. *地理学报*, 67(7): 971–984.
- 马正虎, 璩向宁, 何志润, 赵希妮, 刘雅清, 张裔勋, 杨蕾. 2022. 宁夏阅海底泥重金属空间分布特征及来源解析[J]. *水生态学杂志*, 43(2): 116–124.
- 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 陈海燕, 刘意章, 肖唐付, 赵彦龙. 2017. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. *中国环境科学*, 37(8): 3036–3047.
- 任宇, 曹文庚, 肖舜禹, 李祥志, 潘登, 王师. 2024. 重金属在土壤中的分布、危害与治理技术研究进展[J]. *中国地质*, 51(1): 118–142.
- 邵莉, 肖化云, 吴代赦, 唐从国. 2012. 交通源重金属污染研究进展[J]. *地球与环境*, 40(3): 445–459.
- 孙超. 2010. 崇明岛农田土壤重金属的分布与累积特征[D]. 上海: 华东师范大学, 1–155.
- 孙文贤, 牛晓音, 郑家文, 刘爱菊, 李梦红. 2021. 高青县设施农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 35(3): 17–23.
- 汤金来, 赵宽, 胡睿鑫, 徐涛, 王宜萱, 杨扬, 周葆华. 2023. 滁州市表层土壤重金属含量特征、源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 44(6): 3562–3572.
- 唐将. 2005. 三峡库区镉等重金属元素迁移富集及转化规律[D]. 成都: 成都理工大学, 1–117.
- 王伟鹏, 卢宏伟, 冯三三. 2020. 西藏一江两河流域中部地区土壤重金属生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 37(6): 970–980.
- 王中阳. 2018. 朝阳地区耕地土壤重金属污染风险评价与来源解析研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 1–133.
- 魏晓. 2017. 长江安徽段江心洲土壤地球化学及重金属累积特征[D]. 南京: 南京大学, 1–56.
- 徐争启, 倪师军, 虞先国, 张成江. 2008. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 31(2): 112–115.
- 严洪泽, 周国华, 孙彬彬, 贺灵, 刘银飞, 候树军. 2018. 福建龙海杨梅产地元素地球化学特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1155–1166.
- 杨宇, 郭婷婷, 刘孝利, 铁柏清. 2023. 南方典型矿区农业小流域耕地土壤重金属空间分布特征及污染评价[J]. *环境科学*, 44(3): 1602–1610.
- 尹德超, 祁晓凡, 王雨山, 徐蓉楨, 安永会, 王旭清, 耿红杰. 2022. 雄安新区白洋淀表层沉积物重金属地球化学特征及生态风险评价[J]. *中国地质*, 49(3): 979–992.
- 喻超, 王红晋. 2014. 山东省临沂市农业生态地球化学调查与评价[R]. 济南: 山东省地质调查院.
- 于锐, 王洋, 王晨旭, 王其存, 崔政武. 2017. 榆树市玉米种植区黑土重金属污染状况及来源浅析[J]. *生态环境学报*, 26(10): 1788–1794.
- 张丁, 黄容, 高雪松. 2022. 山地平原过渡带耕地土壤重金属空间特征及潜在生态风险因素探析[J]. *环境科学*, 43(2): 946–956.
- 张宪依, 庞成宝, 王安婷, 袁国礼, 桑学镇, 李元仲, 杨毅. 2020. 海南岛表层及深层土壤重金属分布特征及源解析[J]. *现代地质*, 34(5): 970–978.
- 赵岩, 郭常来, 李旭光, 孙秀波. 2021. 辽宁锦州市地质遗迹资源禀赋及保护性利用[J]. *地质通报*, 40(10): 1688–1696.