

doi: 10.12029/gc20230420001

张栋, 李永春, 苏日力格, 袁国礼, 邰苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 周文辉, 杜雨春子, 杨建雨. 2024. 内蒙古五原县某地土壤重金属生态健康风险评估[J]. 中国地质, 51(1): 248–263.

Zhang Dong, Li Yongchun, Su Rilige, Yuan Guoli, Tai Surigala, Wang Yongliang, Chen Guodong, Zhou Wenhui, Du Yuchunzi, Yang Jianyu. 2024. Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Wuyuan County, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 51(1): 248–263(in Chinese with English abstract).

## 内蒙古五原县某地土壤重金属生态健康风险评估

张栋<sup>1</sup>, 李永春<sup>1</sup>, 苏日力格<sup>1</sup>, 袁国礼<sup>2</sup>, 邰苏日嘎拉<sup>1</sup>, 王永亮<sup>1</sup>,  
陈国栋<sup>1</sup>, 周文辉<sup>1</sup>, 杜雨春子<sup>1</sup>, 杨建雨<sup>1</sup>

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古呼和浩特 010010; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083)

**摘要:**【研究目的】五原县位于河套平原, 为查明该地区农田土壤重金属污染状况, 系统采集了表层土壤样品 1985 件, 农作物样品 30 件, 饮用水样品 5 件, 分析测定 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 种重金属元素含量。【研究方法】通过地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和健康风险评估模型, 对该区土壤、农作物及饮用水中的重金属污染程度和健康风险等进行评估。【研究结果】内梅罗综合污染指数评价该地区土壤尚清洁, 局部地区存在 As 元素轻污染; 人体健康风险评估显示, 在口和皮肤多重摄入途径下, 土壤会对居民造成致癌风险( $9.97 \times 10^{-6}$ ), 饮用水摄入 As(1.62)对居民有一定的健康风险。【结论】Hg 受人为影响较大, 在临近五原县环城公路三叉口存在明显的强异常, 其余元素主要受成土母质控制, As 在建丰农场等地局部含量较高, 超出风险筛选值。As 在饮用水健康风险中贡献最大, 应引起关注。

**关键词:** 土壤; 重金属; 健康风险; 环境地质调查工程; 五原县; 内蒙古

**创新点:** 采用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和健康风险评估模型, 首次对五原县某地以冲湖积物为母质的土壤进行重金属污染程度和健康风险评估。

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0248-16

## Ecological health risk assessment of soil heavy metals in Wuyuan County, Inner Mongolia

ZHANG Dong<sup>1</sup>, LI Yongchun<sup>1</sup>, SU Rilige<sup>1</sup>, YUAN Guoli<sup>2</sup>, TAI Surigala<sup>1</sup>, WANG Yongliang<sup>1</sup>,  
CHEN Guodong<sup>1</sup>, ZHOU Wenhui<sup>1</sup>, DU Yuchunzi<sup>1</sup>, YANG Jianyu<sup>1</sup>

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China;  
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

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

**[Objective]** Wuyuan County is located in the Hetao Plain. To find out the heavy metal pollution status of the farmland soil in

收稿日期: 2023-04-20; 改回日期: 2023-05-24

基金项目: 自然资源综合调查指挥中心科技创新基金项目(KC20220006)和中国地质调查局项目(DD20191015)联合资助。

作者简介: 张栋, 男, 1995 年生, 工程师, 主要从事生态地球化学调查评价工作; E-mail: zhangdong01@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 李永春, 男, 1989 年生, 高级工程师, 主要从事勘查地球化学及生态地球化学调查和评价工作; E-mail: 369517099@qq.com。

Wuyuan County, 1985 surface soil samples, 30 crop samples, and 5 drinking water samples were collected, and the contents of eight heavy metal elements, such as As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, and Zn were analyzed and determined. **[Methods]** The heavy metal pollution degree and health risks of the soil, crops, and drinking water were evaluated using the soil accumulation index and Nemerow comprehensive pollution index methods and a health risk assessment model. **[Results]** The Nemerow comprehensive pollution index showed that the soil in this area was still largely unpolluted, and there was only light pollution of As in some areas. According to the human health risk assessment, ingestion of soil through the mouth or skin is a carcinogenic risk to residents ( $9.97 \times 10^{-6}$ ), and ingestion of As in drinking water is a certain health risk to residents (1.62). **[Conclusion]** Hg is greatly influenced by humans, and there were obvious strong anomalies in Sankou near the Ring Road in Wuyuan County. The other elements were mainly controlled by the parent material. The local content of As was high in Jianfeng Farm and other places, which exceeded the risk screening value. Thus, As contributed the most to the drinking water health risk and should be a cause for concern.

**Key words:** soil; heavy metal; health risks; environmental geological survey engineering; Wuyuan County; Inner Mongolia

**Highlights:** The heavy metal pollution degree and health risk of the soil containing alluvium deposits as its parent material in Wuyuan County were evaluated for the first time using the ground accumulation index method, Nemerow comprehensive pollution index method, and health risk assessment model.

**About the first author:** ZHANG Dong, male, born in 1995, engineer, mainly engaged in ecological geochemical investigation and evaluation; E-mail: [zhangdong01@mail.cgs.gov.cn](mailto:zhangdong01@mail.cgs.gov.cn).

**About the corresponding author:** LI Yongchun, male, born in 1989, senior engineer, mainly engaged in exploration geochemistry and ecological geochemical investigation and evaluation; E-mail: [369517099@qq.com](mailto:369517099@qq.com).

**Fund support:** Supported by the projects of Science and Technology Innovation Fund of Command Center of Integrated Natural Resources Survey Center (No.KC20220006) and China Geological Survey (No.DD20191015).

## 1 引 言

土壤是宝贵的自然资源,人类生存和农业生产都离不开清洁的土壤。工农业生产等人类活动不断损害土壤生态环境,土壤污染问题日益突出(魏亮, 2020; 刘同等, 2022)。土壤是农业生产的重要载体和生态环境的主要组成,其质量的优劣直接影响到人们的生活(冯博鑫等, 2023)。然而,伴随工矿活动的开展,土壤重金属含量逐年累积(张又文等, 2019; Liu et al., 2020; 张义等, 2022),引起土壤重金属污染(张小敏等, 2014),其中,耕地土壤重金属污染已成日益严重的生态环境问题(宋伟等, 2013)。重金属污染不仅影响到作物的产量和质量,还会通过植物的新陈代谢进入食物链对人或动物造成伤害(汪洁等, 2021; 梁帅等, 2023)。同时,国内土壤重金属污染事故频发、形式日趋严峻(Niu et al., 2013; 赵鑫娜等, 2023),尤其是耕地土壤重金属污染已引起国内外广泛关注(尚二萍等, 2018; 鲍丽然等, 2020)。

土壤重金属来源主要为自然源和人为源。自然来源包括岩石风化侵蚀等一系列自然过程,占土

壤重金属含量的主要部分,自然源重金属主要以植物难以利用的形式存在,存在较低的生态风险(Temmerman et al., 2003; Song et al., 2018)。人为源主要由农业活动、采矿、工业排放和化石燃料燃烧等造成(刘同等, 2022)。在农业生态系统中,经常使用的石灰和过磷酸肥不仅含有植物生长所必需的营养元素,还含有 As、Cd 和 Pb 等有毒金属杂质(Pezzarossa et al., 1990)。金属矿石的加工和繁忙的交通也会增加土壤中重金属的污染(周勤利等, 2019; Chen et al., 2023)。人为源重金属常具有较高的生物活性,易被植物吸收利用,具有较高的生态风险(唐豆豆等, 2018; Dong et al., 2023)。河套地区引起 As 富集的主要因素是黄河冲洪积物,含 As 在内的大部分元素都是通过黄河冲洪积物带到河套平原而沉积下来(包凤琴等, 2015),因此,确定土壤中重金属的来源对控制土壤污染至关重要。目前,评价土壤重金属污染的方法很多,如单因子指数、内梅罗综合指数、地累积指数和健康风险评估。其中,内梅罗综合指数法和地累积指数法可以评价重金属的污染程度,健康风险评估可以用来衡量重金属的污染风险。

五原县是典型的农业大县,为全国粮食油料和畜牧业发展重点县,多年获国家级产粮大县。该地区农业发展对推进内蒙古粮食产业的进步发挥着至关重要的作用。因此了解五原县农田土壤重金属污染情况、确定造成生态和人类健康风险的首要污染源、科学合理评价重金属的风险显得尤为重要。该地区尚未开展土壤重金属污染的系统性调查评价,因此,本文利用该地区表层土壤、玉米、饮用水等样品数据,采用地累积指数法、内梅罗综合污染指数法和健康风险评估模型等方法(陶永刚等, 2019; 王昌宇等, 2021),对土壤重金属分布与污染进行了研究,开展内梅罗污染指数和人体健康风险评估,分析其来源及富集原因,为该区居民健康及土壤重金属来源解析等提供依据。

## 2 研究区概况

研究区隶属于内蒙古巴彦淖尔市五原县(图 1)。属中温带大陆性气候,年平均气温 6.1℃。五原县位于内蒙古自治区西部,黄河“几”字湾最北端,南

依黄河、北靠阴山、地处亚洲最大的一首制自流灌溉渠——河套平原腹地(李永春等, 2022<sup>①</sup>),地质构造上属鄂尔多斯台拗,河套断陷。县境为黄河冲积平原,由黄河冲积和山前洪积共同作用而形成,为第四纪松散地层所覆盖,沉积了较厚的湖相地层。全县地形西南高,东北低,海拔在 1019~1042 m。地貌类型主要为平原,占总面积的 91.80%,另有高地、沙丘、海子(湖泊)、洼地等零星分布。调查区以耕地为主要土地利用类型(74.6%),林地 493 hm<sup>2</sup>(1.8%),草地 321 hm<sup>2</sup>(1.1%),建设用地 754 hm<sup>2</sup>(2.8%)。交通道路用地、水域及水利建设用地分别为 1247 hm<sup>2</sup>(4.64%)和 2752 hm<sup>2</sup>(10.2%),占比相对较大,主要为农田配套的路网、水网占主要面积。据第二次土壤普查调查,全县土壤共有 6 个土类,以灌淤土和盐土面积最大。

五原地区的成土母质包括冲积物、洪积物、灌淤母质及风积物等。冲积母质主要位于研究区西部的后套平原,由于近代黄河在此多次改道,在套内留下多条古河道,其泛滥冲积物巨厚且复杂,加

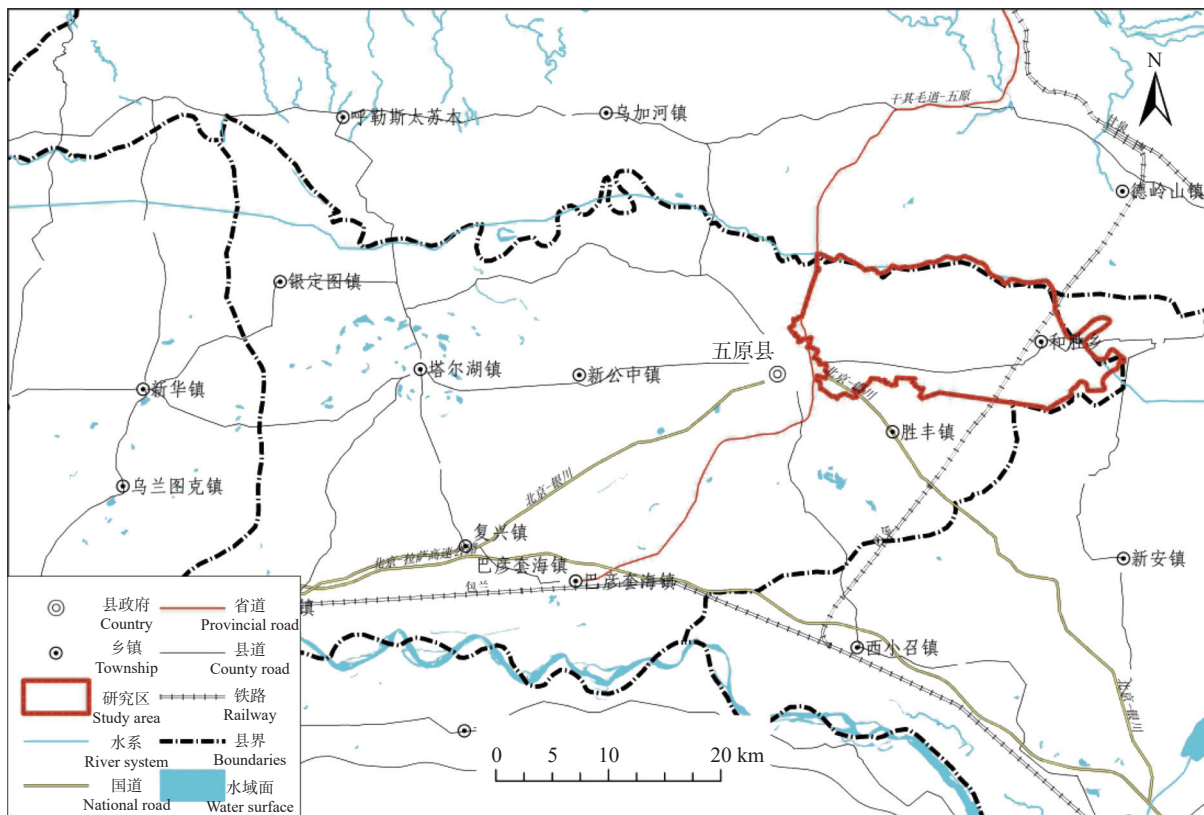


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

以现代灌溉淤积的泥沙,更使冲积层复杂化。总的规律是:研究区西部的磴口县、临河区、杭锦后旗三角区是黄河入套的“上游”,历次改道的主流在此留下的沙土较多;东部的乌梁素海西侧、北侧,为平原地势最低地段,黏壤及黏土较厚,面积更大(王鼎, 2020)。

### 3 材料与方法

#### 3.1 样品采集与处理

本研究主要依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-20146)开展表层土壤样品、饮用水、农作物及对应的根系土样品的采样点布置、样品采集和加工工作。实际采样点位见图 2。

土壤样品采用网格化布设,以代表性为主,兼顾均匀性、特殊性。不同土地利用类型的样点密度有所不同,在耕地集中区布点密度为 8 点/km<sup>2</sup>,其他地类(林地、草地、建设用地等)分布区 4 点/km<sup>2</sup>,调查区平均采样密度为 7.4 点/km<sup>2</sup>。土壤样品的采样深度为 0~20 cm;为提高样品代表性,在采样点周围 50 m 范围内 3~5 处多点采集组合,主样、副样分布在相同的田块和农作物上,点距 30~50 m,结合地块形状,主要采用对角线法进行多点混合取样。取回的样品经风干后碾压至自然粒级,并将非土物质

剔除干净,过 10 目尼龙网筛,混匀后进行样品分装,送实验室分析。

在玉米收获盛期采集玉米籽实 30 件。玉米样品在 0.1~0.2 hm<sup>2</sup> 范围内,多点采集 10~20 个玉米穗混合成 1 件样品。玉米脱粒后进行自然风干脱水处理,送实验室分析测试。饮用水样品采自居民家井水,用聚乙烯塑料瓶采集,在采集前用采样点处的水洗涤样瓶和瓶塞 3 次,水样不添加任何保护剂,当天送实验室以供测定。

本次样品测试工作由承德华勘五一四地矿测试研究有限公司完成,土壤样品测定有机质、N、P、B、Mn、Zn、Cu、Se、Mo、I、F、Ge、pH、As、Cd、Cr、Hg、Pb、Ni、Cl、S、SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Co、V、阳离子交换量、水解性氮、有效磷、速效钾、全盐量、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>共 36 项指标。饮用水样测定 K、Na、Ca、Mg、Fe、Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、游离二氧化碳、总硬度、总碱度、总酸度、溶解性总固体、pH 值、电导率、硼酸盐、氨氮、Al、F<sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、Br<sup>-</sup>、I<sup>-</sup>、Li、Sr、Zn、Se、Cu、Hg、Cd、Ba、Cr<sup>6+</sup>、Pb、Co、V、Mo、Mn、Ni、As、Ag、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>、硼酸盐、可溶性二氧化硅、耗氧量、总磷、B 共 45 项指标。作物样测定 As、Cd、Hg、Cr、Pb、Se、Ge、B、Mo、I、Cu、Zn、Ni、F 共 14 项指标。其中,

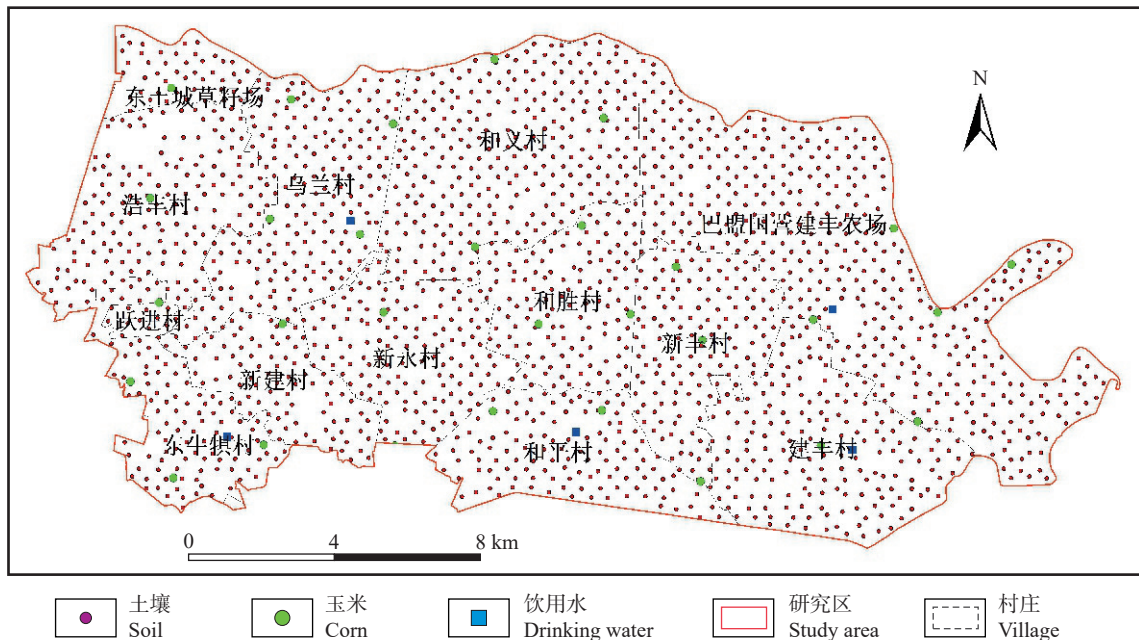


图 2 研究区采样点位图  
Fig.2 Sampling sites of in the study area

土壤样品中的 Cd、Cu、Pb、Ni、Zn 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS, Series 2 型)测试, As、Hg 采用原子荧光光谱法(AFS, XGY-1011A)测试, Cr 采用 X 射线荧光光谱(XRF, PW4400/40)测试, pH 采用离子选择性电极法(ISE)测试; 饮用水中的 As、Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)测试, Cd、Ni、Cu、Zn 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试, Cr<sup>6+</sup>采用比色法测试; 农作物样品中的 Hg 采用原子荧光光谱法(AFS)测试, As、Cd、Cr、Ni、Cu、Pb、Zn 采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测试。将玉米样品四分法缩分, 去除泥土等杂质, 置于瓷托盘中, 称重后, 于 45℃ 烘箱中烘干, 用碎样机打碎, 制成粉末, 将制备好的样品置于塑料密封袋内保存。测试时, 采用国家一级标准物质控制分析准确度和精密度。经统计, 所有监控样测试分析准确度和精密度均在监控允许范围内, 各分析指标的分析检出限达到规范要求, 分析数据通过中国地质调查局分析测试专家组质量验收, 数据真实可靠。

### 3.2 评价方法

#### 3.2.1 土壤重金属污染级别

运用 Muller(1969)提出的地累积指数法, 评价土壤重金属的污染水平, 此法在重金属污染评价中应用广泛(管后春等, 2013; 赵庆令等, 2015; 汪杰等, 2021; 王昌宇等, 2021), 计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{c_n}{k \times c_n^i} \quad (1)$$

式(1)中:  $I_{\text{geo}}$  表示地累积指数,  $c_n$  表示土壤中重金属元素的实测值,  $c_n^i$  表示土壤重金属元素的背景值, 此处选择河套地区的土壤环境背景值(王喜宽等, 2007; 宋绵等, 2022),  $k$  为修正系数, 一般为 1.5。  $I_{\text{geo}}$  分级标准:  $I_{\text{geo}} \leq 0$  为无污染;  $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$  为轻污染;  $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$  为中污染;  $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$  为中—重污染;  $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$  为重污染;  $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$  为重—极重污染;  $I_{\text{geo}} > 5$  为极重污染(Forstner et al., 1993)。

#### 3.2.2 内梅罗综合污染指数法

单因子指数法是最基础的评价方法, 选用《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018)重金属风险筛选值为评价标准, 作为综合污染评价的基础。其计算公式为:

$$P_i = \frac{c_i}{S_i} \quad (2)$$

式(2)中:  $P_i$  表示重金属元素的单因子污染指数;  $c_i$  表示重金属元素的实测浓度(mg/kg);  $S_i$  表示重金属元素的标准值(mg/kg)。

内梅罗综合污染指数法可用于分析评价整个区域被多种重金属污染的程度(周勤利等, 2019)。

计算公式为:

$$PI = \sqrt{(P_{\text{ave}}^2 + P_{\text{max}}^2)/2} \quad (3)$$

式(3)中:  $PI$  为内梅罗综合污染指数;  $P_{\text{ave}}$  为该调查点位土壤中各重金属元素污染指数的算术平均值;  $P_{\text{max}}$  为该点位土壤中重金属元素的最大单项污染指数。单项污染指数与内梅罗综合污染指数的分级标准见表 1。

#### 3.2.3 土壤重金属致癌风险

基于土壤的粒径及其扩散方式, 该区土壤暴露于人体的主要途径是经口摄入、吸入和皮肤接触(杨冰雪等, 2021; 方晴等, 2021; 宋绵等, 2022)。为使评价结果更贴近实际情况, 土壤健康模型公式及参数主要参照《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)确定, 经口摄入、吸入和皮肤接触的 3 种日均暴露量评价模型(李文鹏等, 2022)分别见公式:

$$\text{OISER}_n = \frac{\text{OSIR} \times \text{EF}_s \times \text{ED}_s \times \text{ABS}_0}{\text{BW} \times \text{AT}_s} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$\text{PISER}_n = \frac{\text{PM}_{10} \times \text{DAIR} \times \text{PIAF} \times \text{ED}_s \times (\text{fsp}_0 \times \text{EFO} + \text{fsp}_i \times \text{EFI})}{\text{BW} \times \text{AT}_s} \times 10^{-6} \quad (5)$$

$$\text{DCSER}_n = \frac{\text{SAE} \times \text{SSAR} \times \text{ABS}_d \times \text{EF}_s \times \text{ED}_s \times E}{\text{BW} \times \text{AT}_s} \times 10^{-6} \quad (6)$$

式中参数含义、参考值及出处详见表 2。

$$\text{HQ}_n = \text{HQ}_{\text{ois}_n} + \text{HQ}_{\text{dcs}_n} + \text{HQ}_{\text{pis}_n} = \frac{\text{OISER}_n \times c_n}{\text{Rfd}_0 \times \text{SAF}} + \frac{\text{DCSER}_n \times c_n}{\text{Rfd}_d \times \text{SAF}} + \frac{\text{PISER}_n \times c_n}{\text{Rfd}_i \times \text{SAF}} \quad (7)$$

$$\text{HI} = \sum_{i=1}^n \text{HQ} \quad (8)$$

$$\text{CR}_n = \text{CR}_{\text{ois}_n} + \text{CR}_{\text{dcs}_n} + \text{CR}_{\text{pis}_n} = \text{OISER}_{\text{ca}} \times \text{SF}_{0_n} \times c_n + \text{DCSER}_{\text{ca}} \times \text{SF}_{d_n} \times c_n + \text{PISER}_{\text{ca}} \times \text{SF}_{i_n} \times c_n \quad (9)$$

表 1 单项污染指数与内梅罗综合指数分级标准

**Table 1 Evaluation standard of single factor pollution index and Nemerow comprehensive index**

等级划分	单项污染指数分级标准		污染指数	内梅罗综合指数分级标准	
	污染指数	污染水平		污染等级	污染水平
I	$P_i < 1.0$	清洁	$PI < 0.7$	安全	清洁
II	$1.0 \leq P_i < 2.0$	轻污染	$0.7 \leq PI < 1$	警戒线	尚清洁
III	$2.0 \leq P_i < 3.0$	中污染	$1 \leq PI < 2$	轻污染	农田土壤开始受到污染
IV	$P_i \geq 3.0$	重污染	$2 \leq PI < 3$	中污染	农田土壤已受中度污染
			$PI \geq 3$	重污染	农田土壤已受重度污染

表 2 健康风险评价模型暴露因子参数

**Table 2 Exposure factor parameters of health risk assessment mode**

符号	参数	单位	参考值
OISER <sub>n</sub>	非致癌（致癌）效应下经口摄入土壤暴露量	-	-
PISER <sub>n</sub>	非致癌（致癌）效应下吸入土壤颗粒暴露量	-	-
DCSER <sub>n</sub>	非致癌（致癌）效应下皮肤接触土壤暴露量	-	-
OISR	每日摄入土壤量	mg/d	100 <sup>I</sup>
ED <sub>s</sub>	暴露时长	a	25 <sup>I</sup>
EF <sub>s</sub>	暴露频率	d/a	250 <sup>I</sup>
ABS <sub>0</sub>	经口摄入吸收效率因子	无量纲	1 <sup>I</sup>
BW	平均体重	kg	61.8 <sup>I</sup>
AT <sub>n</sub>	非致癌（致癌）效应平均时长	d	27740 <sup>I</sup> （致癌）9125 <sup>I</sup> （非致癌）
DAIR	每日空气呼吸量	m <sup>3</sup> /d	14.5 <sup>I</sup>
PM <sub>10</sub>	空气中可吸入悬浮颗粒物总量	mg/m <sup>3</sup>	0.119 <sup>I</sup>
PIAF	吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	无量纲	0.75 <sup>I</sup>
fspi	室内空气中来自土壤的颗粒物所占比例	无量纲	0.8 <sup>I</sup>
EFI	室内暴露频率	d/a	187.5 <sup>I</sup>
fspo	室外空气中来自土壤的颗粒物所占比例	无量纲	0.5 <sup>I</sup>
EFO	室外暴露频率	d/a	62.5 <sup>I</sup>
SAE	皮肤暴露面积	cm <sup>2</sup>	3033 <sup>II</sup>
SSAR	皮肤表面土壤黏附系数	mg/cm <sup>2</sup>	0.2 <sup>I</sup>
ABS <sub>d</sub>	皮肤接触吸收效率因子	无量纲	0.001 <sup>I</sup> （镉）0.03 <sup>I</sup> （As）
E	每日皮肤接触事件频率	次/d	1 <sup>I</sup>

注：I 为引用自《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）；II 为根据《建设用地土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）计算得出。

非致癌效应的计算公式见公式(7),  $HQ_n$  为土壤某种重金属  $n$  在所有暴露途径下的危害商,  $HQ_{oisn}$ 、 $HQ_{dcsn}$ 、 $HQ_{pisn}$  分别为经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒途径的危害商, 式中  $c_n$  为重金属  $n$  实测含量值, SAF 为暴露于土壤的参考剂量分配系数, 参考值为 0.50(引自《建设用地土壤污染风险评估技术导则》(HJ 25.3-2019)), 其他参数见表 3。多种重金属元素的危害商之和为 HI, 当  $HQ_n$  或  $HI < 1$  时, 表示无非致癌健康风险, 当  $HQ_n$  或  $HI \geq 1$  表明对人体健康产生影响的可能性大;  $HI \geq 10$  时, 表明存在慢性毒性效应, 且值越大, 风险越高(林苾等, 2021; 余飞等, 2022)。

致癌效应计算公式见公式(9),  $CR_n$  为重金属  $n$  的总致癌风险指数,  $CR_{oisn}$ 、 $CR_{dcsn}$ 、 $CR_{pisn}$  分别为

经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒途径的致癌风险指数。为了更准确地评价研究区的重金属致癌风险, 本文对土壤重金属致癌风险进行划分, 具体分级标准如表 4 所示(张利瑞等, 2022)。

### 3.2.4 农作物及饮用水的健康风险评价

本文采用 USEPA 公布的健康风险评估模型(朱丹尼等, 2021; 余飞等, 2022; 雷佩玉等, 2022)对研究区农作物对人体造成的健康风险进行评价, 评价模型为:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{c_m \times IR \times EF_0 \times ED_0}{RfD \times BW \times AT_0} \quad (10)$$

公式(10)中 HQ、RfD 及 BW 的含义及参数与公式(4)~(8)中相同; RfD 和 SF 分别取  $RfD_0$ 、 $SF_0$  的值; ADD 为污染物的日均暴露剂量;  $c_m$  为农作物及

表3 土壤重金属不同暴露途径的RfD和SF

Table 3 RfD and SF values for different types of exposure of heavy metals in soil

重金属元素	参考剂量/(mg/(kg·d))						致癌斜率因子/((kg·d)/mg)					
	RfD <sub>0</sub>	数据来源	RfD <sub>i</sub>	数据来源	RfD <sub>d</sub>	数据来源	SF <sub>0</sub>	数据来源	SF <sub>i</sub>	数据来源	SF <sub>d</sub>	数据来源
As	3.00×10 <sup>-4</sup>	I	3.52×10 <sup>-6</sup>	II	3.00×10 <sup>-4</sup>	II	1.50	I	1.83×10 <sup>-2</sup>	II	1.50	II
Cd	1.00×10 <sup>-3</sup>	I	2.35×10 <sup>-6</sup>	II	2.50×10 <sup>-5</sup>	II			7.06	II		
Cr	3.00×10 <sup>-3</sup>	I	2.35×10 <sup>-5</sup>		7.50×10 <sup>-2</sup>	II			4.71×10 <sup>-2</sup>	II		
Cu	4.00×10 <sup>-2</sup>	I			4.00×10 <sup>-2</sup>	II						
Hg	3.00×10 <sup>-4</sup>	I	7.04×10 <sup>-5</sup>	II	2.10×10 <sup>-5</sup>	II						
Ni	2.00×10 <sup>-2</sup>	I	2.11×10 <sup>-5</sup>	II	8.00×10 <sup>-4</sup>	II			1.11	II		
Zn	3.00×10 <sup>-1</sup>	I			3.00×10 <sup>-1</sup>	II						

注：I为直接引用自《建设用土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）；II为根据《建设用土壤污染风险评估技术导则》（HJ 25.3-2019）中外推公式引用I计算得出。

饮用水中重金属的含量；IR为摄入量，饮用水、谷物及蔬菜的摄入量分别为2.517 L/d、443.7 g/d、328.15 g/d；EF<sub>0</sub>为暴露频率，365 d/a；ED<sub>0</sub>为暴露持续时间，74.4 a；AT<sub>0</sub>为平均暴露时间=暴露持续时间×365，d。

## 4 结果与分析

### 4.1 土壤重金属分布特征

研究区土壤pH范围为6.85~10.50，总体以碱性—强碱性为主。研究区表层土Cd等8种重金属元素含量见表5，可知Cd、Pb、Cr、Cu、Ni、Zn这6种元素的平均含量均高于背景值，它们的平均值与背景值的数量级相同，分别是背景值的1.33、1.13、1.35、1.36、1.27、1.32倍，As是背景值的

1.57倍；Hg元素的平均值略低于背景值。Cd、Cu、Zn、Ni、As、Hg的含量最大值为背景值的2倍以上，说明这6种元素在区内有明显富集点位。

利用乌鲁木齐金维图文信息科技有限公司开发的金维软件(GeolPAS V4.0, 新疆乌鲁木齐市)采用克里金插值法，绘制各重金属元素的空间分布图(图3)。总体上As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn元素含量在空间上均表现为在建丰农场附近新丰村、建丰村一带与东牛犊村等地为相对高值区，该地区成土母质以冲湖积物为主，相对其他区域土壤颗粒较细，与重金属含量较高区域较吻合，在研究区中西部为相对低值区。

从地球化学图看，各元素的地球化学图与土壤质地(硅铝比)分布(图4)相似度高，沿乌加河南部形成条带状的高异常区，大部分土壤微量元素因土壤质地不同表现出共消长的组合规律(李永春等，2022<sup>①</sup>)。硅铝比是土壤黏粒的氧化硅与氧化铝的比值，以SiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表示。硅铝比值愈小，表明土壤风化淋溶度愈强；硅铝比值降低，表明SiO<sub>2</sub>的含量在降低，土壤沙化程度减轻，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的含量在增加，

表4 土壤重金属致癌风险的分级标准

Table 4 Classification criteria for carcinogenic risk of heavy metals in soil

等级	CR	致癌风险
1	CR ≤ 10 <sup>-6</sup>	无风险
2	10 <sup>-6</sup> < CR ≤ 10 <sup>-5</sup>	低风险，可接受
3	10 <sup>-5</sup> < CR ≤ 10 <sup>-4</sup>	中风险，可接受
4	CR > 10 <sup>-4</sup>	有，不可接受

表5 表层土壤重金属元素参数统计(n=1985)

Table 5 Statistics of heavy metal elements in topsoil (n=1985)

元素	量纲	最大值	最小值	平均值	标准差	C <sub>v</sub> /%	富集系数	Xb河套平原
Cd	mg/kg	0.3	0.07	0.16	0.04	0.22	1.33	0.12
Pb	mg/kg	33.7	14.12	21.29	3.11	0.15	1.13	18.76
Cr	mg/kg	97.1	40.27	75.58	9.34	0.12	1.35	56
Cu	mg/kg	40.9	10.31	26.12	5.08	0.19	1.36	19.2
Zn	mg/kg	122.2	32.66	73.79	12.35	0.17	1.32	55.7
Ni	mg/kg	87.6	15.07	31.68	5.26	0.17	1.27	25
As	mg/kg	27.0	6.06	15.20	2.94	0.19	1.57	9.68
Hg	ng/g	523.0	8.24	24.60	14.81	0.60	0.99	24.9
pH	无量纲	10.5	6.85	8.89	0.32	0.04	-	8.69

注：Xb河套平原代表河套平原背景值。

表明土壤的熟化程度在提高。硅铝比值反映土壤是一个发育进化的过程。由此推断地质单元和成

土母质是这些元素分布的主控因素。Hg 元素在调查区西部存在明显的强异常。该区临近五原县城

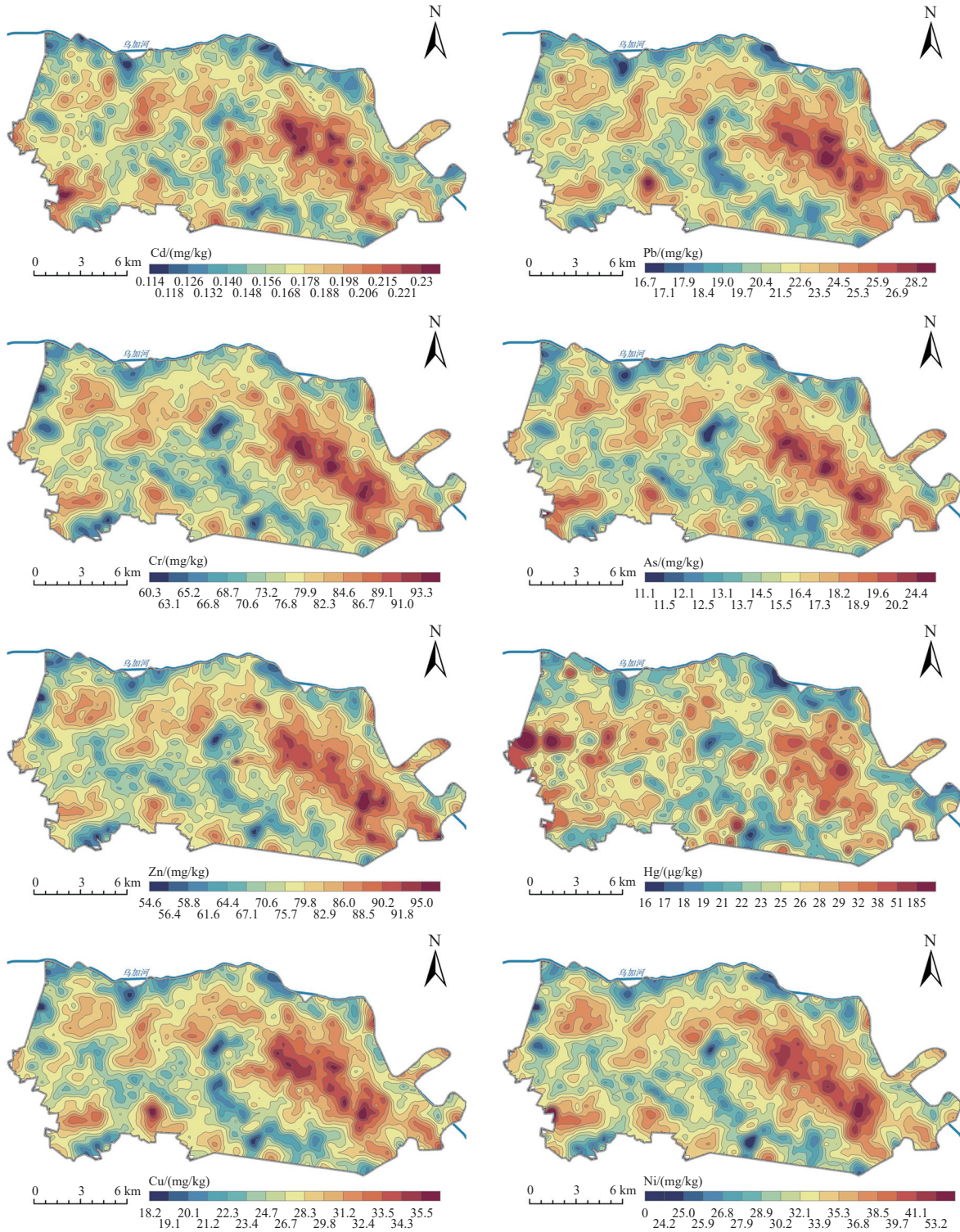


图 3 研究区表层土壤重金属元素空间分布图  
Fig.3 Spatial distribution map of heavy metals in surface soils in the study area



环城公路三叉路口,往来车辆多,据此推断该 Hg 异常属于非地质背景成因。

土壤元素的变异系数( $C_v$ )常表示元素受外来物质的影响程度。变异系数大,表明元素有可能受到多重因素的影响;变异系数小,表明受到外来物质的影响程度小。一般认为, $C_v < 0.20$  为弱变异; $C_v$  在 0.20~0.50 为中等强度变异; $C_v$  在 0.50~1.00 为强变异; $C_v \geq 1$  为异常的强变异(Pan et al., 2016)。由表 5 可知,Hg 为强变异,Cd 为中等强度变异,As、Cr、Cu、Ni、Zn、Pb 为弱变异;推测该区土壤中 Hg 元素受外来物质影响的可能性最大。

与土壤环境质量农用地土壤污染风险筛选值相比,研究区土壤重金属含量超标情况见表 6。由表可知,土壤中 8 项重金属中 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb、Ni、Zn 元素含量均低于风险筛选值。仅土壤中的 As 在新丰村、建丰村、新永村及建丰农场等地局部土壤 As 含量较高,超出风险筛选值,为二等污染风险可控区,面积为 4.90 km<sup>2</sup>,占比 1.82%。高 As 区土壤 As 平均含量为 21.00 mg/kg,略高于风险筛选值 20 mg/kg,As 的环境等级决定了土壤环境综合等级。

对土壤中重金属元素进行主成分分析,共提取 3 个主成分,结果显示(表 7),累积能够解释总方差的 93.37%。其中主成分 1 的贡献率达到了 77.60%,

表明研究区表层土壤中多种重金属元素具有相近的来源,结合前述情况认为主要受成土母质的影响。主成分 2 中只有 Hg 元素的载荷值较高,表明研究区的土壤中 Hg 有别于其他元素,主要受外来源影响。

#### 4.2 重金属累积程度分析

选河套平原土壤元素背景值为参比值,该区土壤重金属地累积指数分级显示(表 8),各元素地累积指数平均值为-6.59~8.59,总体为无污染,部分样本存在单元素轻污染。从单元素分级数而言,各元素轻污染到重污染样本数最多 1130 个,最少 3 个,在样本总数中占比最高 56.93%,最低 0.15%,占比由多到少顺序为 As>Cu>Zn>Cd>Cr>Ni>Hg>Pb,Cd、Cr、Zn 元素污染点数占比接近(19.45%~24.58%),Hg 之外各元素无中污染以上样本。从元素分布图(图 2)可知,Cd、Cr、Cu、Pb、Ni 的分布区域大致相同,主要在建丰农场附近新丰村、建丰村一带,少量位于东牛犊村及附近村庄。综合前述研究推断,除 Hg 元素外,其余 7 个重金属污染分布受地质地貌特征影响较大,其来源主要为成土母质。

#### 4.3 内梅罗污染指数法评价

单因子污染指数大小顺序为 As>Cr>Cd>Cu>Zn>Ni>Pb>Hg(表 9),8 种重金属元素单因子污染

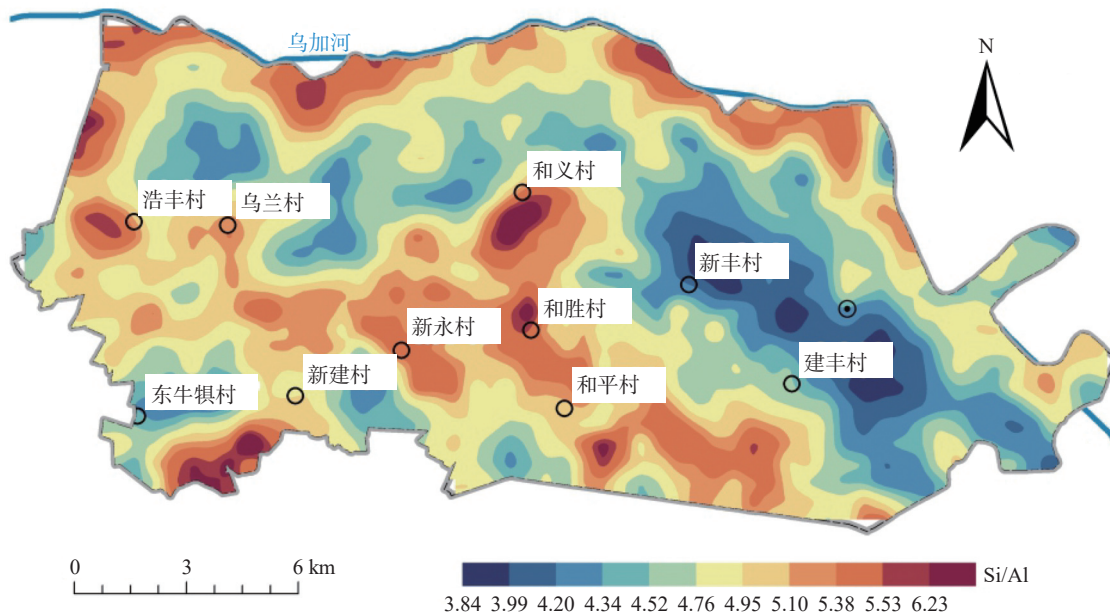


图 4 调查区土壤 Si/Al 等值线图  
Fig.4 Si/Al contour map of soil in the survey area

表 6 基于风险筛选值的超标情况

Table 6 Exceedance based on risk-screening values

pH值范围	样数	Cd		Pb		Cr		Cu		Zn		Ni		As		Hg	
		筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数	筛选值	超标数
6.5~7.5	1	0.3	0	120	0	200	0	100	0	250	0	100	0	25	0	0.6	0
≥7.5	1984	0.6	0	170	0	250	0	100	0	300	0	190	0	20	111	1	0
合计	1985		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	111	0	0	0
超标率%			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.6	0	0	0

注: 8种元素筛选值的质量分数单位为mg/kg。

表 7 土壤重金属主成分分析结果

Table 7 Result of principal component analysis of heavy metal concentrations in the soil samples

重金属	主成分		
	1	2	3
特征值	6.208	0.955	0.307
贡献率/%	77.602	11.935	3.837
累积贡献率/%	77.602	89.536	93.373
Cd	0.867	0.016	0.473
Cr	0.947	-0.046	-0.150
Cu	0.971	-0.050	0.017
Hg	0.237	0.971	-0.028
Ni	0.937	-0.053	-0.143
Pb	0.945	-0.034	0.094
Zn	0.958	-0.039	-0.108

指数均小于 1, 根据单因子污染指数分级标准, 评价等级为无污染。内梅罗污染指数大小依次为 As>Cd>Cr>Ni>Cu>Zn>Pb>Hg, Cd、Cr、Ni、Cu、Zn、Pb、Hg 内梅罗综合污染指数均小于 0.7, As 的内梅罗综合污染指数为 0.88, 土壤整体污染等级为安全, 污染水平为清洁, 部分土壤污染等级为警戒线, 污染水平为尚清洁。

4.4 土壤重金属人体健康风险评估

根据调查数据和评价参数, 按健康风险评估模型, 该区土壤重金属的非致癌和致癌健康风险指数见表 10 和表 11。HQ<1, 即重金属非致癌风险可忽略, HQ≥1, 存在非致癌风险。结果显示, Cd、Cr、Ni 的危害商大小顺序为: 吸入土壤颗粒>经口摄入>

皮肤接触, 其他的危害商大小为: 经口摄入>吸入土壤颗粒>皮肤接触。按最大值单元素总的危害商由高到低为 As>Cr>Ni>Hg>Cd>Cu>Zn, 即该区风险最高的元素为 As。单项重金属非致癌风险指数最大的为 0.40(As), 显示该区单项重金属对人体健康暂不存在非致癌风险。重金属总危害商 HI 的最大值为 0.66, 表明研究区表层土壤总体上不存在非致癌风险。

在致癌危害上, As 的致癌风险为经口摄入>皮肤接触>吸入土壤颗粒, 其余 3 种元素只有吸入土壤颗粒风险。总致癌风险最高的元素量 As, 致癌风险指数平均为 9.83×10<sup>-6</sup>, 其余元素为 Ni>Cr>Cd, 但均小于 10<sup>-6</sup>, 表明 Cd、Cr、Ni 均为无风险水平。4 个元素风险指数总和贡献最大的是 As, 最大值占 98.00%, 平均值占 98.63%, 即该区主要的致癌风险元素是 As, 且经口摄入是主要途径, 应加以防范。

4.5 农作物及饮用水重金属人体健康风险评估

对照生活饮用水卫生标准(GB 5749-2022), 该地区所采水样中两件存在 As 超标情况。农产品评价标准选用《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762-2017), 所采农作物均无重金属超标现象。基于评价参数和调查数据利用 USEPA 推荐的健康风险模型计算研究区居民通过食用农作物及饮用水摄入重金属的风险值(HQ), 健康风险评估

表 8 土壤重金属地累积指数分级

Table 8 Accumulation index classification of soil heavy metal

元素	值域	均值	分级样本数/件					污染点数占比/%
			无污染 (≤0)	轻污染 (0~1)	中污染 (1~2)	中—重污染 (2~3)	重污染 (3~4)	
Cd	-1.32~5.70	-6.59	1592	393	0	0	0	19.80
Pb	-1.47~0.21	-0.89	1982	3	0	0	0	0.15
Cr	-1.18~0.28	-0.29	1599	386	0	0	0	19.45
Cu	-0.17~9.27	8.59	1356	629	0	0	0	31.69
Zn	-1.76~0.13	-0.61	1497	488	0	0	0	24.58
Ni	-1.42~1.12	-0.37	1703	281	1	0	0	14.21
As	-1.46~0.68	-0.17	855	1130	0	0	0	56.93
Hg	-3.56~2.42	-2.06	1933	47	3	0	2	2.62

表9 内梅罗综合污染指数法评价结果

Table 9 Evaluation results of Nemerow comprehensive pollution index method

元素	单因子污染指数 $P_i$				内梅罗综合污染指数PI
	最小值	最大值	平均值	中位数	
Cd	0.12	0.50	0.27	0.27	0.40
Pb	0.08	0.20	0.13	0.12	0.17
Cr	0.16	0.39	0.30	0.30	0.348
Cu	0.10	0.41	0.26	0.26	0.343
Zn	0.11	0.41	0.25	0.25	0.336
Ni	0.08	0.46	0.17	0.17	0.347
As	0.24	1.08	0.61	0.60	0.88
Hg	0.01	0.52	0.02	0.02	0.11

表10 土壤重金属非致癌健康风险指数 ( $HQ/10^{-4}$ )Table 10 Non-carcinogenic health risk index of heavy metal in the soil ( $HQ/10^{-4}$ )

重金属		$HQ_{ois_n}$	$HQ_{dcs_n}$	$HQ_{pis_n}$	HQ
As	最大值	1994.95	363.04	1595.23	3953.22
	平均值	1123.64	204.40	898.15	1553.26
Cd	最大值	6.61	1.60	26.37	34.58
	平均值	3.64	0.88	14.55	19.07
Cr	最大值	717.44	—	859.32	1576.76
	平均值	558.57	—	668.94	1227.51
Cu	最大值	22.66	—	—	22.66
	平均值	14.48	—	—	14.48
Hg	最大值	38.64	—	1.55	40.19
	平均值	1.84	—	0.07	1.91
Ni	最大值	97.09	—	863.42	960.51
	平均值	35.15	—	312.31	347.46
Zn	最大值	9.03	—	—	9.03
	平均值	5.45	—	—	5.45
HI	最大值	2886.42	364.64	3345.89	6596.95
	平均值	1069.84	205.28	1894.02	3169.14

注:  $HQ_{ois_n}$ 、 $HQ_{dcs_n}$ 、 $HQ_{pis_n}$  分别为经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒途径的危害商。

表11 土壤重金属致癌健康风险指数 ( $CR/10^{-8}$ )Table 11 Carcinogenic health risk index of heavy metal in the soil ( $CR/10^{-8}$ )

重金属		$CR_{ois_n}$	$CR_{dcs_n}$	$CR_{pis_n}$	CR
As	最大值	1476.52	268.70	0.17	1745.39
	平均值	831.64	151.28	0.10	983.02
Cd	最大值	—	—	0.72	0.72
	平均值	—	—	0.40	0.40
Cr	最大值	—	—	1.56	1.56
	平均值	—	—	1.22	1.22
Ni	最大值	—	—	33.26	33.26
	平均值	—	—	12.03	12.03
CR	最大值	1361.68	268.70	35.71	1780.93
	平均值	471.67	151.28	13.75	996.67

结果见表12。在农作物中As、Cd、Hg的含量低于检出线,在饮用水水样中Cd、Cr、Hg的含量低于检出线。对于单一来源的重金属的HQ,不同样品类型的重金属健康风险有较明显的差异,按平均值谷物为 $Zn>Cr>Cu>Ni$ ,饮用水为 $As>Zn>Ni>Cu$ 。在饮用水中,As有着极高的风险,最高值达到了4.2,大于

1,具有一定的健康风险。居民食品谷物的平均HI值小于1,对人体健康产生影响的可能性较小。

## 5 讨论

本文以五原县某地土壤8项重金属元素为研究对象,分析了其分布特征、污染程度和人体健康

表 12 农作物及饮用水重金属非致癌健康风险指数 (HQ/10<sup>-4</sup>)Table 12 Non-carcinogenic health risk index of heavy metal in crops and drinking water (HQ/10<sup>-4</sup>)

重金属		HQ <sub>谷物</sub>	HQ <sub>饮用水</sub>
As	最大值	—	42369.90
	平均值	—	16200.31
Cd	最大值	—	—
	平均值	—	—
Cr	最大值	5265.05	—
	平均值	2231.86	—
Cu	最大值	3117.81	24.84
	平均值	1989.01	11.88
Hg	最大值	—	—
	平均值	—	—
Ni	最大值	2538.92	57.63
	平均值	1311.50	19.11
Zn	最大值	4162.44	145.26
	平均值	3381.40	35.03
HI	最大值	15084.22	42597.63
	平均值	8913.77	16266.33

风险, 选取多种评价方法和模型分析, 对成因进行了探讨, 并提出相应建议。不同方法的指标、权重等不同, 故评价结果并不完全一致。整体而言, 该区重金属污染较低。按富集系数排在前面的元素是 As、Cu、Cr、Cd、Zn, 排在最后的是 Pb、Hg; 按变异系数, 排在前面的是 Hg、Cd, 排在最后的是 Pb、Cr; 地累积指数评价与富集系数以河套地区土壤背景值为参照, 结果显示轻污染样本最多的 3 种元素是 As、Cu、Zn; 重金属人体健康风险评价时, As 的土壤含量高于风险筛选值, 且 As 元素的毒性大且致癌斜率因子大, 导致其致癌风险值最大, 引起土壤 As 超标的原因是调查区土壤 As 地质背景较高, 其平均含量 15.20 mg/kg, 为全国土壤背景值的 1.67 倍。数据相关性表明, As 的分布受土壤质地控制, 黄河中携带的物质中含有较多的细粒级黏土物质, 在黏土物质的吸附下, 造成了局部地区土壤 As 的富集, 与李永春等(2022)<sup>①</sup>的研究结果相符。农业施用的磷肥、含磷复合肥及城市垃圾、污泥为原料的肥料中均混杂有 Pb、Cu、Cd、Zn、Ni、As、Cr 等重金属(王军等, 2007)。因此, 土壤中 As 和 Cd 的超标部分也可能来源于城镇区和耕地区内的日常生活和生产活动。

已有研究表明, 土壤粒度越细, 对重金属的吸附能力越强, 其累积因子也相对增大(吴婷等, 2017)。由于土壤中黏土矿物的吸附作用, 导致该

区内土壤中绝大多数元素较河套全区(临河—呼和浩特)富集, 亲铜亲硫元素(Cu、Zn、Pb、As、Cd)与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 有较强的相关性(李永春等, 2022)<sup>①</sup>, 这些元素在由原岩—成土风化过程中受含铝黏土矿物的吸附下共消长, 在砂质土壤中含量普遍偏低, 而在黏质土壤中含量整体较高。各元素在研究区东部近东西向的低值区与沿乌加河南部形成条带状的高异常带与“古黄河”河道分布相近, 在黄河改道过程中, 水面逐级变窄, 水流量变小, 流速变缓, 沉积了大量的黏土物质, 在其吸附作用下引起重金属元素的富集。前人研究发现 Hg 元素的富集多来自于交通运输、冬季燃煤等人类活动(杨玲等, 2022), Hg 主要受工农业生产、交通运输等人为活动进入土壤(赵岩等, 2023), 结合 Hg 元素的高值区分布特征、变异系数及主成分分析结果, 推断交通运输是引起该地区 Hg 富集的原因。应引起注意, 在常年人类强烈活动的影响下, 可能造成土壤 Hg 超标情况。

As 是类金属元素, 在碱性环境易变成可溶性形式存在(余涛, 2006), 平原区的含水层沉积物固相 As 的迁移性相对较强, 且平原区沉积物吸附态 As 在弱碱性条件下易向地下水迁移, 导致 As 的富集, 该地区 2 件 As 超标的水样均在土壤 As 高值区, 且土壤整体呈碱性, 推断饮用水中的 As 是由土壤向地下水迁移而导致的富集。饮用水的健康风险中 As 贡献了很大的比例, 最大值达到了 4.2, 同时河套地区为中国典型的高 As 地下水区域(郭华明等, 2015; 张皓月等, 2021), 因此研究区 As 对人体健康的影响应引起重视。

## 6 结 论

(1) 五原县该地区 Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素含量均低于风险筛选值。仅土壤中的 As 在新丰村、建丰村、新永村及建丰农场等地局部土壤中含量较高, 超出风险筛选值, 面积为 4.90 km<sup>2</sup>, 占比 1.82%, 其他地区土壤均为绿色无污染。高 As 区土壤 As 平均含量为 21.00 mg/kg, 略高于风险筛选值, 土壤总体较清洁。元素按富集系数由大到小顺序为 As、Cu、Cr、Cd、Zn、Ni、Pb、Hg, 其中仅 Hg 元素的平均值略低于背景值, As 的富集系数偏高, 来自黄河冲洪积物的可能性较大。

(2) As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素含量空间分布特征相近,来源较单一,以成土母质为主。Hg 元素的变异系数最大,其受人类活动的影响最大。地累积指数评价结果显示,8 种重金属元素单值均有轻污染点位,其中 As、Cu、Zn 元素占比最多,且污染样本与分布区域较为接近。

(3) 单因子指数评价结果显示,区内 8 种重金属单因子指数均小于 1,属于无污染等级;内梅罗综合污染指数除 As 外均小于 0.7,污染等级整体为安全,污染水平为清洁,仅 As 的内梅罗指数为 0.88,显示部分土壤污染等级处于警戒线,污染水平为尚清洁。

(4) 重金属人体健康风险评价结果表明,该区非致癌风险均处在可接受的范围,然而 As 的致癌风险高于其他元素,应加强预警。饮用水单一重金属健康风险指数表明,As 元素存在较高的健康风险,应提高警惕。

**致谢:** 论文撰写过程中项目组成员给予了大力支持,两位匿名审稿专家和期刊编辑提出了宝贵修改意见,在此致以衷心的感谢。

## 注释

① 李永春, 邵苏日嘎拉, 苏日力格, 王永亮, 陈国栋, 张栋, 李雪珍, 周文辉, 王文宝, 杜雨春子, 张祥, 毕书海, 刘燕宾, 高琪, 魏听, 闫振军, 杜银龙, 谷周雷, 王海鹰. 2022. 河套平原五原—固原耕地区土地质量地球化学调查成果报告 [R]. 呼和浩特: 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心。

## References

- Bao Liran, Deng Hai, Jia Zhongmin, Li Yu, Dong Jinxiu, Yan Mingshu, Zhang Fenglei. 2020. Ecological health risk assessment of heavy metals in farmland soil in northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Bao Fengqin, Li Youguo, Wang Peidong, Li Hongwei, Sun Huiling, Wu Huizhen. 2015. The geochemical characteristics of Arsenic in the Hetao area of Inner Mongolia[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(5): 1032–1040 (in Chinese with English abstract).
- Chen Z Y, Zhao Y Y, Chen D L, Huang H T, Zhao Y, Wu Y J. 2023. Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China[J]. *China Geology*, 6(1): 15–26.
- Dong Q Y, Wen H T, Pan W, Song C, Lai S Y, Yang Z J, Zhao Y Y, Yan M J. 2023. Health risk assessment of heavy metals in soils and crops in a mining area (Au–Ag–Cu–trona–oil et al. ) of the Nanyang Basin, Henan Province, China[J]. *China Geology*, 6: 1–13.
- Fang Qing, Xian Ping, Meng Zhengcheng. 2021. Soil health risk assessment of agricultural land based on Monte Carlo simulation[J]. *Environmental Engineering*, 39(2): 147–152 (in Chinese with English abstract).
- Feng Boxin, Xu Duoxun, Zhang Hongyu, Yang Shengfei, Gan Liming, Men Qianni. 2023. Geochemical characteristic of heavy metal in Zhouzhi area and analysis of their causes based on minimum data set[J]. *Northwestern Geology*, 56(1): 284–292 (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.
- Guan Houchun, Li Yunhuai, Peng Miaozhi, Liu Daobin. 2013. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of urban soil in Huangshan[J]. *Geology in China*, 40(6): 1949–1958 (in Chinese with English abstract).
- Guo Huaming, Ni Ping, Jia Yongfeng, Zhang Bo, Zhang Yang. 2015. Chemical characteristics and origin of surface water and shallow groundwater in Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 29(2): 229–237 (in Chinese with English abstract).
- Lei Peiyu, Zheng Jingli, Jia Ru, Meng Zhaowei. 2022. Health risk assessment of typical metals and heavy metals in rural drinking water of Shaanxi Province in 2020[J]. *Journal of Health Research*, 51(1): 45–50 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng, Shi Xiaolong, Liu Jianzhang, Chen Shuang, Cai Kui, Song Zefeng, Tian Haofei. 2022. Relationship between heavy metals and clay minerals in farmland surrounding industrial zone and ecological health risk assessment [J/OL]. *Geology in China*. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220516.1455.002.html> (in Chinese with English abstract).
- Liang Shuai, Dai Huimin, Zhang Guangyang, Liu Kai, Zhai Furong, Li Qiuyan, Wei Minghui. 2023. Heavy metal contents in soil–Chinese herbal medicine system in Xibo River Basin, Chifeng City, Inner Mongolia: Distribution characteristics and ecological effect evaluation[J]. *Geology and Resources*, 32(6): 779–788 (in Chinese with English abstract).
- Lin Jin, Liang Wenjing, Jiao Yang, Yang Li, Fan Yaning, Tian Tao, Liu Xiaomeng. 2021. Ecological health risk assessment of heavy metals in farmland surrounding Tongguan gold deposit, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 48(3): 749–763 (in Chinese with English abstract).
- Liu R P, Xu Y N, Zhang, Wang W K, Elwardany R M. 2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaolinling gold belt, China[J]. *China Geology*, 3(3): 402–410.
- 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).
- Niu L, Liu W, Yang H, Yang F, Xu C. 2013. Status of metal accumulation in farmland soils across China: From distribution to risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 176: 55–62.
- Pan L B, Ma J, Hu Y, Su B Y, Fang G L, Wang Y, Wang Z S, Wang L, Xiang B. 2016. Assessment of levels, potential ecological risk, and human health risk of heavy metals in the soils from a typical county in Shanxi Province, China[J]. *Environment Science and Pollution Research*, 23(19): 1–11.
- Pezzarossa B, Malorgio F, Lubrano L, Tognoni F, Petruzzelli G. 1990. Phosphatic fertilizers as a source of heavy metals in protected cultivation[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 21(9/10): 737–751.
- Shang Erping, Xu Erqi, Zhang Hongqi, Huang Caihong. 2018. Spatial and temporal variation of heavy metals in cultivated soil in China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 39(10): 4670–4683 (in Chinese with English abstract).
- Song H Y, Hu K L, An Y, Chen C, Li G D. 2018. Spatial distribution and source apportionment of the heavy metals in the agricultural soil in a regional scale[J]. *Journal of Soils & Sediments: Protection, Risk Assessment, & Remediation*, 18(3): 852–862.
- Song Mian, Gong Lei, Wang Yan, Tian D Z, Wang X F, Li Y, Li W. 2022. Risk assessment of heavy metals on human health in topsoil of Fuping County, Hebei Province[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 41(1): 133–144 (in Chinese with English abstract).
- Song Wei, Chen Baiming, Liu Lin. 2013. Soil Heavy metal pollution of cultivated Land in China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 20(2): 293–298 (in Chinese with English abstract).
- Tang Doudou, Yuan Xuyin, Wang Yimin, Ji Junfeng, Wen Yubo, Zhao Wanfu. 2018. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 37(1): 18–26 (in Chinese with English abstract).
- Tao Yonggang, Ma Pengcheng, Chen Mianbiao, Huang Chushan, Zhang LiJuan, Yu Yunjiang, Liu Xiaolin, Xu Qun, Hu Guocheng. 2019. Ferroalloy plant around the characteristics of heavy metal pollution in indoor dust and health risk assessment[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 4(6): 829–838 (in Chinese with English abstract).
- Temmerman L D, Vanongeval L, Boon W, Hoening M, Geypens M. 2003. Heavy metal content of arable soils in northern Belgium[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 148(1): 61–76.
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Li Mingze, Liu Qingxue. 2021. Heavy metal pollution degree and risk assessment of soil in a metal smelting area of Xiongan New District[J]. *Geology in China*, 48(6): 1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ding. 2020. Study on the Treatment Effect of Composite Soil Conditioner on Saline-alkali Soil in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University (in Chinese with English abstract).
- Wang Jie, Gong Jing, Liu Yujia, Yu Miao, Wang Weihao, Li Mengying, Xu Wumei, Xiang Ping. 2021. Ecological and health risk assessment of soil heavy metals in Kunming City[J]. *Journal of Light Industry*, 37(4): 118–126 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jun, Chen Zhenlou, Wang Chu, Ye Mingwu, Shen Jing, Nie Zhiling. 2007. Shanghai Chongming island vegetable soil heavy metal content and the ecology risk early warning assessment[J]. *Journal of environmental science*, (3): 647–653 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xikuan, Huang Zengfang, Su Meixia, Li Shibao, Wang Zhong, Zhao Suozhi, Zhang Qing. 2007. Characteristics of soil base value and background value in Hetao Area[J]. *Rock and Mineral Analysis*, 26(4): 287–292 (in Chinese with English abstract).
- Wei Liang. 2020. Migration and Transformation of Soil Arsenic and Heavy Metals in Typical Polluted and Irrigated Areas of North China Plain[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing) (in Chinese with English abstract).
- Wu Ting, Li Xiaoping, Cai Yue, Ai Yuwei, Sun Xuemeng, Yu Hongtao. 2017. Geochemical behavior and risk of heavy metals in different size lead-polluted soil particles[J]. *China Environmental Science*, 37(11): 4212–4221 (in Chinese with English abstract).
- Yang Bingxue, Fang Chen, Ma Qin, Xu Zhenbo. 2021. Health risk assessment of heavy metal pollution in farmland soil in Zhejiang Province[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 49(7): 66–69 (in Chinese with English abstract).
- Yang Ling, Tian Lei, Bai Guangyu, Pei Shengliang, Zhang Deqiang. 2022. Ecological risk assessments and source analysis of heavy metals in the soil of Xin Barag Youqi, Inner Mongolia[J]. *Geology in China*, 49(6): 1970–1983 (in Chinese with English abstract).
- Yu Fei, Zhang Yongwen, Yan Mingshu, Wang Rui, Zhang Fenglei, Zhong Keqiang, Zhu Haishan, Luo Kai. 2022. Heavy metal pollution status and health risk assessment of cultivated soil and crops in mercury mining area of Chongqing[J]. *Chinese Journal of Environmental Chemistry*, 41(2): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Yu Tao. 2006. Land Quality Geochemical Assessment in the Dongting Lake Region of Hunan Province[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Zhang Haoyue, Liu Wenbo, Zhang Xujiao, Su Chunli. 2021. Analysis of spatial variability and influencing factors of arsenic in groundwater of Hetao Plain, Inner Mongolia[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 40(1): 192–108 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Lirui, Peng Xinbo, Ma Yanlong, Kang Le, Zhang Yane, Wang Quanling, Zhang Songlin. 2022. Risk assessment and attribution analysis of "five poisons" heavy metals in cultivated land in Lanzhou[J]. *Environmental Science*, 43(9): 4767–4778 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaomin, Zhang Xiuying, Zhong Taiyang, Jiang Hong. 2014.

- Study on the concentration and spatial distribution of heavy metals in agricultural soils in China[J]. *Environmental Science*, 35(2): 692–703 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Zhou Xinquan, Zeng Xiaomin, Feng Jiao, Liu Yurong. 2022. Characteristics and evaluation of soil heavy metal pollution in industrial zone of Yangtze River Economic Belt[J]. *Environmental Science*, 43(4): 2062–2070 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Youwen, Han Jianhua, Tu Qi, Yang Yongan, Xu Yan, Shi Rongguang. 2019. Characteristics and evaluation of heavy metal accumulation in farmland soil in Tianjin suburb[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 35(11): 1445–1452 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qingling, Li Qingcai, Xie Jiangkun, Li Yuanzhong, Ji Yonghong, Pang Chengbao, Wan Miao. 2015. Study on the characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal pollution in southern Jining by means of enrichment coefficient method and ground accumulation index method[J]. *Rock and Mineral Testing*, 34(1): 129–137 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xinna, Yang Zhongfang, Yu Tao. 2023. Research progress of soil heavy metal pollution and remediation technology in mining area[J]. *Geology in China*, 50(1): 84–101 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Yan, Guo Changlai, Cui Jian, Zhang Yanfei, Li Ying, Li Xuguang, Yu Huiming. 2023. Distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil of Beizhen agricultural area, Jinzhou City, Liao Province [J/OL]. *Geology in China*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230313.1251.002.html>. (in Chinese with English abstract).
- Zhou Qinli, Wang Xuedong, Li Zhitao, Wang Xiahui, He Jun, Ji Guohua. 2019. Distribution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metal in Helan County of Ningxia, China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 36(4): 513–521 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Danni, Zou Shengzhang, Zhou Changsong, Lu Haiping, Xie Hao. 2021. Hg and As contents of soil– crop system in different tillage types and ecological health risk assessment[J]. *Geology in China*, 48(3): 708–720 (in Chinese with English abstract).
- 其潜在生态风险评价[J]. *中国地质*, 40(6): 1949–1958.
- 郭华明, 倪萍, 贾永锋, 张波, 张扬. 2015. 内蒙古河套盆地地表水-浅层地下水化学特征及成因[J]. *现代地质*, 29(2): 229–237.
- 雷佩玉, 郑晶利, 贾茹, 孟昭伟. 2022. 2020 年陕西省农村饮用水典型类金属及重金属健康风险评估[J]. *卫生研究*, 51(1): 45–50.
- 李文鹏, 史小龙, 刘建章, 陈爽, 蔡奎, 宋泽峰, 田浩飞. 2022. 工业区周边农田土壤重金属与黏土矿物的关系及其生态健康风险评估[J/OL]. *中国地质*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220516.1455.002.html>.
- 梁帅, 戴慧敏, 张广阳, 刘凯, 翟富荣, 李秋燕, 魏明辉. 2023. 内蒙古赤峰锡伯河流域土壤-中药材系统中的重金属元素——含量分布特征及生态效应评价[J]. *地质与资源*, 32(6): 779–788.
- 林苾, 梁文静, 焦吻, 杨莉, 范亚宁, 田涛, 刘晓萌. 2021. 陕西潼关县金矿矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评估[J]. *中国地质*, 48(3): 749–763.
- 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估[J]. *中国地质*, 49(5): 1497–1508.
- 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 黄彩红. 2018. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. *环境科学*, 39(10): 4670–4683.
- 宋绵, 龚磊, 王艳, 田大争, 王新峰, 李跃, 李伟. 2022. 河北阜平县表层土壤重金属对人体健康的风险评估[J]. *岩矿测试*, 41(1): 133–144.
- 宋伟, 陈百明, 刘琳. 2013. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. *水土保持研究*, 20(2): 293–298.
- 唐豆豆, 袁旭音, 汪宜敏, 季峻峰, 文字博, 赵万伏. 2018. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. *农业环境科学学报*, 37(1): 18–26.
- 陶永刚, 马鹏程, 陈棉彪, 黄楚珊, 张丽娟, 于云江, 柳晓琳, 许群, 胡国成. 2019. 铁合金厂周边室内积尘中重金属污染特征及健康风险评估[J]. *农业资源与环境学报*, 36(6): 829–838.
- 王昌宇, 张素荣, 刘继红, 邢怡, 李名则, 刘庆学. 2021. 雄安新区某金属冶炼区土壤重金属污染程度及风险评估[J]. *中国地质*, 48(6): 1697–1709.
- 王鼎. 2020. 复合土壤调理剂对内蒙古河套灌区盐碱土治理效果研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学.
- 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 于森, 王炜皓, 李梦莹, 徐武美, 向萍. 2021. 昆明市土壤重金属污染特征及其生态与健康风险评估[J]. *轻工学报*, 37(4): 118–126.
- 王军, 陈振楼, 王初, 叶明武, 沈静, 聂智凌. 2007. 上海崇明岛蔬菜地土壤重金属含量与生态风险预警评估[J]. *环境科学*, (3): 647–653.
- 王喜宽, 黄增芳, 苏美霞, 李世宝, 王忠, 赵锁志, 张青. 2007. 河套地区土壤基准值及背景值特征[J]. *岩矿测试*, 26(4): 287–292.
- 魏亮. 2020. 华北平原典型污灌区土壤 As 及重金属迁移转化规律 [D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 吴婷, 李小平, 蔡月, 艾雨为, 孙薛梦, Hongtao Yu. 2017. 铅污染不同粒径土壤的重金属地球化学行为与风险[J]. *中国环境科学*, 37(11): 4212–4221.
- 杨冰雪, 方晨, 马勤, 许振波. 2021. 浙江省某地区农田土壤重金属污

## 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估[J]. *中国地质*, 47(6): 1625–1636.
- 包凤琴, 李佑国, 王沛东, 李红威, 孙惠玲, 武慧珍. 2015. 内蒙古河套地区神地地球化学特征[J]. *物探与化探*, 39(5): 1032–1040.
- 方晴, 洗萍, 蒙政成. 2021. 基于蒙特卡罗模拟的农用地土壤健康风险评估[J]. *环境工程*, 39(2): 147–152.
- 冯博鑫, 徐多勋, 张宏宇, 杨生飞, 甘黎明, 门倩妮. 2023. 基于最小数据集的周至地区土壤重金属地球化学特征及成因分析[J]. *西北地质*, 56(1): 284–292.
- 管后春, 李运怀, 彭苗枝, 刘道彬. 2013. 黄山城市土壤重金属污染及

- 染的健康风险评价[J]. *安徽农业科学*, 49(7): 66-69.
- 杨玲, 田磊, 白光宇, 裴圣良, 张德强. 2022. 内蒙古新巴尔虎右旗土壤重金属生态风险与来源分析[J]. *中国地质*, 49(6): 1970-1983.
- 余飞, 张永文, 严明书, 王锐, 张风雷, 钟克强, 朱海山, 罗凯. 2022. 重庆汞矿区耕地土壤和农作物重金属污染状况及健康风险评价[J]. *环境化学*, 41(2): 1-13.
- 余涛. 2006. 湖南洞庭湖地区土地质量地球化学评估[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 张皓月, 刘文波, 张绪教, 苏春利. 2021. 河套平原地下水中 As 的空间变异特征及影响因素分析[J]. *地质科技通报*, 40(1): 192-108.
- 张利瑞, 彭鑫波, 马延龙, 康乐, 张妍娥, 王泉灵, 张松林. 2022. 兰州市耕地“五毒”重金属的风险评价与归因分析[J]. *环境科学*, 43(9): 4767-4778.
- 张小敏, 张秀英, 钟大洋, 江洪. 2014. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. *环境科学*, 35(2): 692-703.
- 张义, 周心劝, 曾晓敏, 冯娇, 刘玉荣. 2022. 长江经济带工业区土壤重金属污染特征与评价[J]. *环境科学*, 43(4): 2062-2070.
- 张又文, 韩建华, 涂棋, 杨永安, 徐艳, 师荣光. 2019. 天津市郊农田土壤重金属积累特征及评价[J]. *生态与农村环境学报*, 35(11): 1445-1452.
- 赵庆令, 李清彩, 谢江坤, 李元仲, 姬永红, 庞成宝, 万森. 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.
- 赵鑫娜, 杨忠芳, 余涛. 2023. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J]. *中国地质*, 50(1): 84-101.
- 赵岩, 郭常来, 崔健, 张艳飞, 李莹, 李旭光, 于慧明. 2023. 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/OL]. *中国地质*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20230313.1251.002.html>.
- 周勤利, 王学东, 李志涛, 王夏晖, 何俊, 季国华. 2019. 宁夏贺兰县土壤重金属分布特征及其生态风险评价[J]. *农业资源与环境学报*, 36(4): 513-521.
- 朱丹尼, 邹胜章, 周长松, 卢海平, 谢浩. 2021. 不同耕作类型下土壤-农作物系统中汞、砷含量与生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 48(3): 708-720.