

doi: 10.12029/gc20220302002

袁帅, 张思源, 张雪琼, 袁国礼, 王永亮, 边鹏, 邵苏日嘎拉. 2024. 内蒙古乌拉特前旗大余太地区农田表层土壤重金属生态安全风险评价[J]. 中国地质, 51(5): 1686–1700.

Yuan Shuai, Zhang Siyuan, Zhang Xueqiong, Yuan Guoli, Wang Yongliang, Bian Peng, Tai Surigala. 2024. Ecological health risk assessment of farmland surface soil heavy metals in Dashetai, Ulat Front Banner, Inner Mongolia[J]. Geology in China, 51(5): 1686–1700(in Chinese with English abstract).

# 内蒙古乌拉特前旗大余太地区农田表层土壤重金属生态安全风险评价

袁帅<sup>1,2,3</sup>, 张思源<sup>1,2,4</sup>, 张雪琼<sup>5</sup>, 袁国礼<sup>4</sup>, 王永亮<sup>1,2</sup>, 边鹏<sup>1,2</sup>, 邵苏日嘎拉<sup>1,2</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. 黄河大黑河流域水资源开发与生态环境效应创新基地, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 中国地质大学(北京) 水资源与环境学院, 北京 100083; 4. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 5. 内蒙古农业大学理学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

**摘要:**【研究目的】为查明乌拉特前旗大余太地区农田土壤重金属污染状况, 采集表层土壤样品 845 件, 农作物样品 30 件, 饮用水样品 17 件, 分析测定 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等 8 种重金属元素含量。【研究方法】通过采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型, 对该区土壤、农作物以及饮用水中的重金属污染程度、生态风险和健康风险进行评估。【研究结果】大余太农田土壤中重金属含量整体与河套地区背景值相当; 土壤中潜在重金属生态危害以轻微风险和中等风险为主; 人体健康风险评估显示, 在口和皮肤双重摄入途径下, 土壤会对居民造成致癌风险( $5.69 \times 10^{-6}$ ), 谷物(1.03)及蔬菜(1.30)会对居民有一定的健康风险。【结论】Hg 受人类影响较大, 中等—强风险区位于大余太镇; 其余元素主要受成土母质控制, Cd 中等风险区分布在乌梁素海沿岸一带。As 在蔬菜、谷物以及饮用水健康风险中贡献最大, 应该受到关注。

**关键词:** 土壤; 重金属; 生态安全; 健康风险; 环境地质调查工程; 乌拉特前旗; 内蒙古

**创新点:** 采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型, 对河套平原大余太地区以冲洪积物为母质的土壤进行重金属污染程度、生态风险和健康风险评估。

中图分类号: X826; X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)05-1686-15

## Ecological health risk assessment of farmland surface soil heavy metals in Dashetai, Ulat Front Banner, Inner Mongolia

YUAN Shuai<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Siyuan<sup>1,2,4</sup>, ZHANG Xueqiong<sup>5</sup>, YUAN Guoli<sup>4</sup>, WANG Yongliang<sup>1,2</sup>, BIAN Peng<sup>1,2</sup>, TAI Surigala<sup>1,2</sup>

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 2. Innovation Base for Water Resource Exploration and Eco-environmental Effects in the Daheihe Basin of the Yellow River, Hohhot 010010, Inner Mongolia, China; 3. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing

收稿日期: 2022-03-02; 改回日期: 2022-06-07

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20211591)资助。

作者简介: 袁帅, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事地质环境研究工作; E-mail: yuanshuai@cugb@163.com。

通讯作者: 张思源, 男, 1991 年生, 工程师, 主要从事自然资源综合调查工作; E-mail: zhangsy5@qq.com。

张雪琼, 女, 1990 年生, 讲师, 主要从事环境地球化学工作; E-mail: lxyzxq@imau.edu.cn。

100083, China; 4. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 5. Department of Science, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, Inner Mongolia, China)

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

**[Objective]** This study aims to evaluate the current status of heavy metal contamination in the soil of Dashetai, Ulat Front Banner. A comprehensive sampling campaign was conducted, involving the systematic collection of 845 topsoil samples, 30 crop samples, and 17 drinking water samples. The concentrations of eight heavy metals (Arsenic (As), Cadmium (Cd), Chromium (Cr), Copper (Cu), Mercury (Hg), Nickel (Ni), Lead (Pb), and Zinc (Zn)) were analyzed to assess the extent of contamination. **[Methods]** The levels of soil heavy metal contamination, ecological risk, and associated health risks in the study area were assessed using the geoaccumulation index method, the potential ecological hazard index method, and a health risk assessment model. **[Results]** The concentrations of heavy metals in the farmland soils of Dashetai are approximately equivalent to the background levels observed in the Hetao Plain. The assessment of potential ecological risks indicated that the heavy metal contamination in the soil predominantly posed slight to moderate ecological hazards. The human health risk assessment revealed that, through oral and dermal exposure, the soil's carcinogenic risk value was calculated to be  $5.69 \times 10^{-6}$ , which exceeds the standard threshold of  $10^{-6}$ . However, this level of risk is considered to pose a minimal carcinogenic threat, one that is generally deemed acceptable by public health standards. **[Conclusions]** The distribution of mercury (Hg) is significantly influenced by anthropogenic activities, with areas of medium to high risk predominantly located in Dashetai. In contrast, the distribution of other elements is primarily governed by the parent materials of the soil. Moderate-risk areas for cadmium (Cd) are concentrated along the coast of Wuliangsu Lake. Arsenic (As) was identified as the primary contributor to the health risks associated with the consumption of vegetables, grains, and drinking water.

**Key words:** soil; heavy metal; ecological risk; health risk; environmental geological survey engineering; Ulat Front Banner; Inner Mongolia

**Highlights:** With the method of land accumulation index, potential ecological hazard index and health risk assessment model, we evaluated the level of heavy metal pollution, ecological risk and health risk of the alluvial and diluvial soil of Hetao Plain in Dashetai, Inner Mongolia.

**About the first author:** YUAN Shuai, male, born in 1991, engineer, mainly engaged in geological environment research; E-mail: [yuanshuaicugb@163.com](mailto:yuanshuaicugb@163.com).

**About the corresponding author:** ZHANG Siyuan, male, born in 1991, engineer, mainly engaged in comprehensive survey of natural resources; E-mail: [zhangsy5@qq.com](mailto:zhangsy5@qq.com). ZHANG Xueqiong, female, born in 1990, lecturer, mainly engaged in environmental earth chemistry; E-mail: [lxyzq@imau.edu.cn](mailto:lxyzq@imau.edu.cn).

**Fund support:** Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20211591).

## 1 引言

土壤是宝贵的自然资源之一,是人类赖以生存的物质基础。土壤作为农业生产的主要载体和生态环境的重要组成部分,其质量的优劣与人们的生活息息相关。然而,随着工业矿业活动的开展,土壤中的重金属含量逐年累积(刘勇等, 2011; 张又文等, 2019; Liu et al., 2020; 张义等, 2022),造成土壤重金属污染(张小敏等, 2014),其中,耕地土壤重金属污染已成为日益严重的生态问题(宋伟等, 2013),不仅会影响到农业粮食作物的产量和质量,还会通过植物的新陈代谢进入食物链从而对人或动物造

成伤害(汪洁等, 2022)。同时,国内土壤重金属污染事故频发(Niu et al., 2013; Zhou et al., 2014),尤其是耕地土壤重金属污染已经引起国内外的广泛关注(蔡奎等, 2016; 尚二萍等, 2018; 鲍丽然等, 2020)。

土壤作为重金属向大气、水体和有机体传播的主要介质,可通过经口摄入、呼吸和皮肤接触等暴露途径进一步影响人类健康(林苾等, 2021; 王昌宇等, 2021; 杨冰雪等, 2021; 刘同等, 2022),因此重金属在耕地土壤中的过度累积会对人类健康和区域生态系统平衡产生较大的影响。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、潜在生态风险评价和健康风险评价。其中,单因子指数法和地累积指数法可以评

价重金属的污染程度,潜在生态风险评价和健康风险评价可以用来衡量重金属的污染风险(郭笑笑等, 2011; 曹胜伟等, 2022; 梁帅等, 2023)。

大余太地区属河套平原,位于阴山山脉与乌梁素海中间,主要由山前冲洪积平原和冲湖积凹陷两部分组成,同时也是内蒙古重要的商品粮和矿产基地(刘君等, 2017)。该地区山前发育大小不等的冲洪积扇群,向南过渡为冲积湖积平原,西侧的乌梁素海为地下水的侧向排泄边界。由于地质与地貌特征的控制,该地区表层地质作用发育强烈,重金属元素具备迁移的地质条件,并存在局部富集的风险。同时,随着近年来人类活动影响逐渐增强,如农业区化肥的大量使用,山区玉石、铁矿等矿业活动频繁,以及居住区燃煤取暖等行为,导致该地区重金属等污染元素存在人为影响与扩散的可能,土壤质量有待于进一步研究评价。针对河套地区以冲洪积物为母质的农田土壤,目前对其可能存在的重金属污染分析和评价关注较少,且大余太地区暂

未开展农田土壤重金属污染的系统性调查评价。因此,本文利用该地区农用地表层土壤样品数据,采用地累积指数法、潜在生态危害指数法和健康风险评估模型等方法,系统研究土壤重金属分布特征与污染程度,开展潜在生态风险和人体健康风险评价,分析元素来源与富集原因,为研究区生态环境保护、居民健康以及土壤重金属来源解析等提供了科学依据。

## 2 研究区概况

乌拉特前旗大余太地区位于河套平原东缘,东北靠阴山山脉(色尔腾山),西南临乌梁素海(图 1)。研究区地形总体为东北高西南低,地貌以平原为主,总面积为 213.62 km<sup>2</sup>。区内水系属黄河流域,乌苏图勒河为研究区主要的地表水系,该河为季节性河流,平常河床干涸无水,河流从色尔腾山出山后形成了较大冲积扇,河水穿过研究区汇入乌梁素海。土壤类型以灌淤栗钙土和淡栗钙土

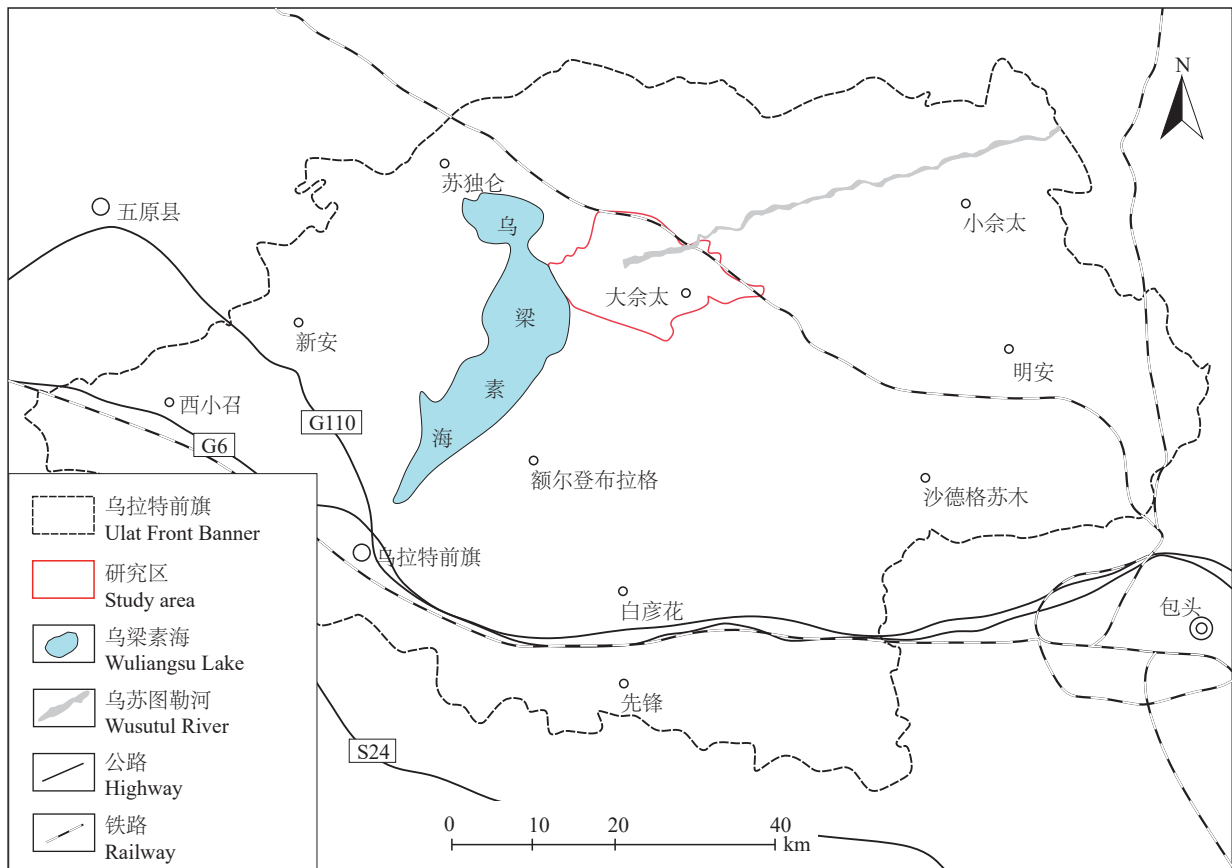


图 1 研究区位置图  
Fig.1 Geographic location of the study area

为主,成土母质主要为冲洪积与冲湖积物。区内属中温带大陆性季风气候,日照充足,积温较多,昼夜温差大,雨水集中,雨热同期。历年平均日照时数为 3130 h,年平均气温为 5.6℃,无霜期 100~145 d,年降水量在 180 mm,主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 78.9%;年蒸发量 2365 mm,封冻期 4 个月,年平均风速 1.6 m/s。农田的主要类型为水浇地,灌溉水主要为地下水,种植作物以玉米、向日葵、辣椒为主。当地居民饮水均为地下水,粮食作物主要为自家种植的小麦和玉米,蔬菜大部分为自家种植,饮食结构为自产自销。大余太镇是乌拉特前旗重要的产粮基地,已入选“2021 年农业产业强镇创建名单”。

### 3 材料与方 法

#### 3.1 样品采集与测试

本次工作共采集土壤样品 845 件,农作物样品 30 件(玉米 17 件,辣椒 13 件),饮用水 17 件(图 2)。土壤样品采用网格化布设,采样密度为 4 点/km<sup>2</sup>,结合地块形状采用“梅花”形布设,在中心

点位附近 30 m 范围内 5 处(1 个主坑,4 个副坑)分别采集 0~20 cm 的表层土壤样品,使用木铲直接采取样品,各分样点土壤掰碎,挑出根系、秸秆、石块等杂物,充分混合后,留取 1.0~1.5 kg 装入样品袋。土壤样品在通风良好的场地进行自然风干、压碎,将样品全部通过 2 mm 的尼龙筛,充分混匀后将一部分样品送实验室分析。研究区的玉米和辣椒样品以 0.1~0.2 hm<sup>2</sup> 为采样单位,选取 10~20 棵植株混合成 1 件样品;农作物样品采集均为多点组合,确保样品的代表性。玉米鲜样脱粒后进行自然风干脱水处理,送实验室分析测试。辣椒样品鲜样用无色聚乙烯塑料袋密封后,送实验室进行低温冷冻干燥制样后进行检测。饮用水样品采自居民家井水。饮用水样品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。每个饮用水共采集样品 8 瓶,其中 1 瓶为原水,其余 7 瓶按照《地下水环境监测技术规范》(HJ 164—2020)要求添加固定剂后送实验室供测定。

本次工作的样品测试工作由四川省地质矿产勘查开发局成都综合岩矿测试中心完成,土壤样品

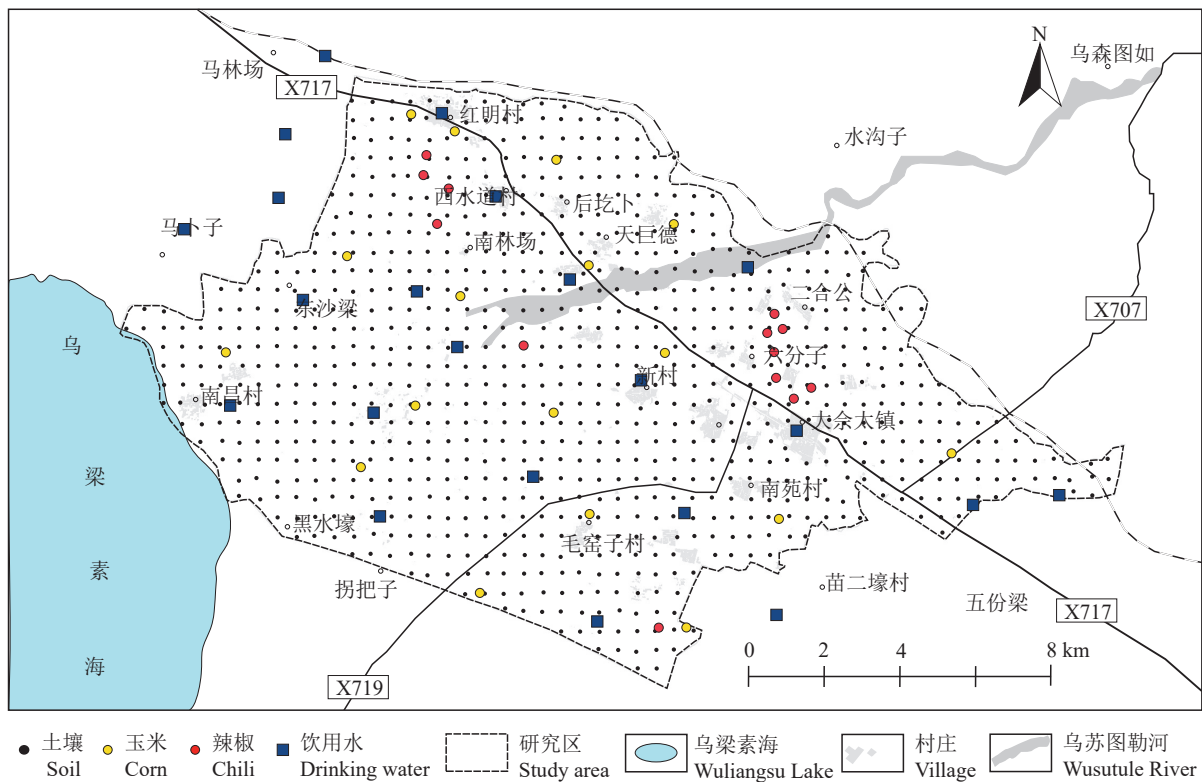


图 2 研究区采样点分布图  
Fig.2 Distribution of sampling sites of in the study area



中的 Pb、Zn 采用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 测试, Mn 采用等离子光谱法 (ICP-AES) 测试, Cu、Ni 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测试, As、Hg 采用原子荧光光谱法 (AFS) 测试, Ag 采用发射光谱法 (ES) 测试, pH 采用 pH 计电极法 (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、Pb、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、Ni、Cu、Pb、Zn 采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测试。测试时, 采用国家一级标准物质进行控制分析准确度和精密度, 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要求等于或小于相关规范要求, 所取得数据均通过中国地质调查局质量验收, 数据真实可靠。

### 3.2 评价方法

#### 3.2.1 土壤重金属污染级别

采用德国科学家 Muller (1969) 提出的地累积指数法, 评价土壤重金属的污染水平, 该方法广泛应用于污染重金属污染分级评价 (于云江等, 2010; 赵庆令等, 2015; 张亚群等, 2019; 汪洁等, 2022), 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),  $k$  为修正系数, 一般为 1.5。重金属地累积指数  $I_{\text{geo}}$  分级标准:  $I_{\text{geo}} \leq 0$  为无污染水平;  $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$  为轻污染水平;  $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$  为中污染水平;  $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$  为中—重污染水平;  $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$  为重污染水平;  $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$  为重—极重污染水平;  $I_{\text{geo}} > 5$  为极重污染水平 (Forstner et al., 1993)。

#### 3.2.2 土壤重金属潜在生态风险

潜在生态指数法是目前最为常用的评价土壤重金属污染程度的方法之一 (Hakanson, 1980), 该方法将重金属的含量、重金属的生态效应、环境效应和毒理学效应均联系起来 (李一蒙等, 2015; 陆金和赵兴青, 2017; 刘瑞雪等, 2019; 鲍丽然等, 2020; 陈继平等, 2021; 郭俊刚等, 2021)。其相关公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_i^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_{i=1}^n \left( T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \right) \quad (2)$$

式(2)中:  $E_i^i$  为重金属的单项潜在生态风险指数;  $C_f^i$  为重金属的单项污染指数;  $RI$  为综合潜在生态风险指数, 即潜在风险系数之和;  $T_r^i$  为单个污染物的毒性响应系数;  $C_i$  为土壤中污染物的实测浓度, mg/kg;  $C_n^i$  为参比值, 通常为一个地区土壤重金属背景值, 此处选择河套地区的土壤环境背景值。  $T_r^i$  为某重金属的毒性响应参数, 各重金属毒性系数为: Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=30 < Hg=40 (Hakanson, 1980; 徐争启等, 2008)。潜在生态风险指数法评价分级标准:  $E_i^i < 40$ ,  $RI < 150$  为轻微级别;  $40 \leq E_i^i < 80$ ,  $150 \leq RI < 300$  为中等级别;  $80 \leq E_i^i < 160$ ,  $300 \leq RI < 600$  为强级别;  $160 \leq E_i^i < 320$ ,  $600 \leq RI < 1200$  为很强级别;  $E_i^i \geq 320$ ,  $RI \geq 1200$  为极强级别。

#### 3.2.3 土壤重金属致癌风险

鉴于土壤的粒径组成特征及其扩散方式, 口鼻吸入、经口摄入和皮肤接触是研究区土壤暴露于人体的主要途径 (阿地拉·艾来提等, 2020; 方晴等, 2021; 杨冰雪等, 2021; 宋绵等, 2022)。为使评价结果更贴近实情, 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、经口鼻吸入和经皮肤接触的三种日均暴露量评价模型 (李文鹏等, 2024) 分别见公式:

$$OISER_n = \frac{OSIR \times EF_s \times ED_s \times ABS_0}{BW \times AT_s} \times 10^{-6} \quad (3)$$

$$PISER_n = \frac{PM_{10} \times DAIR \times PIAF \times ED_s \times (f_{\text{spo}} \times EF_0 + f_{\text{spi}} \times EF_1)}{BW \times AT_s} \times 10^{-6} \quad (4)$$

$$DCSER_n = \frac{SAE \times SSAR \times ABS_d \times EF_s \times ED_s \times E}{BW \times AT_s} \times 10^{-6} \quad (5)$$

式中参数含义、参考值及出处详见表 1。

非致癌效应的计算见公式(6),  $HQ_n$  为土壤某种重金属  $n$  在所有暴露途径下的危害商,  $HQ_{ois_n}$ 、 $HQ_{dcs_n}$ 、 $HQ_{pis_n}$  分别为经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒途径的危害商,  $C_n$  为重金属  $n$  实测含量值,

表 1 健康风险评估模型暴露因子参数

Table 1 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>1</sup>
ED <sub>s</sub>	暴露时长	a	25 <sup>1</sup>
EF <sub>s</sub>	暴露频率	d/a	250 <sup>1</sup>
ABS <sub>0</sub>	经口摄入吸收效率因子	无量纲	1 <sup>1</sup>
BW	平均体重	kg	61.8 <sup>1</sup>
AT <sub>s</sub>	非致癌（致癌）效应平均时长	d	27740 <sup>1</sup> （致癌）9125 <sup>1</sup> （非致癌）
DAIR	每日空气呼吸量	m <sup>3</sup> /d	14.5 <sup>1</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>1</sup>
PIAF	吸入土壤颗粒物在体内滞留比例	无量纲	0.75 <sup>1</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>1</sup>
EF <sub>i</sub>	室内暴露频率	d/a	187.5 <sup>1</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>1</sup>
EF <sub>o</sub>	室外暴露频率	d/a	62.5 <sup>1</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>1</sup>
ABS <sub>d</sub>	皮肤接触吸收效率因子	无量纲	0.001 <sup>1</sup> （镉）0.03 <sup>1</sup> （砷）
E	每日皮肤接触事件频率	次/d	1 <sup>1</sup>
RfD	不同途径参考剂量	mg/(kg·d)	见表2
RfD <sub>o</sub>	经口摄入参考剂量	mg/(kg·d)	见表2
RfD <sub>i</sub>	呼吸吸入参考剂量	mg/(kg·d)	见表2
RfD <sub>d</sub>	皮肤接触参考剂量	mg/(kg·d)	见表2
SF	不同途径的致癌斜率因子	(kg·d)/mg	见表2
SF <sub>o</sub>	经口摄入的致癌斜率因子	(kg·d)/mg	见表2
SF <sub>d</sub>	皮肤接触的致癌斜率因子	(kg·d)/mg	见表2
SF <sub>i</sub>	呼吸吸入的致癌斜率因子	(kg·d)/mg	见表2

注：I 为引用自《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》（HJ25.3—2019）计算得出。

SAF 为暴露于土壤的参考剂量分配系数，参考值为 0.50(引用自 HJ 25.3—2019)，其他参数见表 1 和表 2。多种重金属元素的危害商之和为 HI，当 HQ<sub>n</sub> 或 HI < 1 时，表示无非致癌健康风险，当 HQ<sub>n</sub> 或 HI ≥ 1 表明对人体健康产生影响的可能性大；HI ≥ 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)。

致癌效应计算见公式(7)，CR<sub>n</sub> 为重金属 n 的总致癌风险指数，CR<sub>ois<sub>n</sub></sub>、CR<sub>dcs<sub>n</sub></sub>、CR<sub>pis<sub>n</sub></sub> 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。为了更清楚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 3 所示(张利瑞等, 2022)。

$$HQ_n = HQ_{ois_n} + HQ_{dcs_n} + HQ_{pis_n} = \frac{OISER_n \times C_n}{RfD_o \times SAF} + \frac{DCSER_n \times C_n}{RfD_d \times SAF} + \frac{PISER_n \times C_n}{RfD_i \times SAF} \quad (6)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \quad (7)$$

$$CR_n = CR_{ois_n} + CR_{dcs_n} + CR_{pis_n} = OISER_{ca} \times SF_{0n} \times C_n + DCSE_{ca} \times SF_{dn} \times C_n + PISER_{ca} \times SF_{in} \times C_n \quad (8)$$

### 3.2.4 农作物及饮用水的健康风险评估

本文采用 USEPA 公布的健康风险评估模型

表2 土壤重金属不同暴露途径的RfD和SF

Table 2 RfD and SF values for different exposure pathways of soil heavy metals

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>1</sub>	数据来源	RfD <sub>a</sub>	数据来源	SF <sub>0</sub>	数据来源	SF <sub>1</sub>	数据来源	SF <sub>a</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>		7.5×10 <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为引用自HJ《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）计算得出。

表3 土壤重金属致癌风险的分级标准

Table 3 Classification standard of carcinogenic risk of soil heavy metals

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

(朱丹尼等, 2021; 雷佩玉等, 2022; 余飞等, 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:

$$HQ = \frac{ADD}{RfD} = \frac{C_m \times IR \times EF_0 \times ED_0}{RfD \times BW \times AT_0} \quad (9)$$

$$HI = \sum_{i=1}^n HQ \quad (10)$$

公式中HQ、CR、RfD、BW、HI以及SF的含义及参数与公式(3)~(7)中相同; RfD和SF分别取RfD<sub>0</sub>、SF<sub>0</sub>的值; ADD为污染物的日均暴露剂量; C<sub>m</sub>为农作物及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>为农作物及饮用水的暴露

频率, 365 d/a; ED<sub>0</sub>为农作物及饮用水的暴露持续时间, 74.4 a; AT<sub>0</sub>为平均暴露时间=暴露持续时间×365, d。

## 4 结果与讨论

### 4.1 研究区土壤重金属分布特征

研究区土壤pH变化范围为8.07~9.99, 整体以碱性—强碱性为主, 重金属元素含量见表4, 根据表中数据可知As、Hg、Pb这3种元素的平均值略低于背景值, 其余Cd、Cu、Ni、Zn4种元素的平均值高于背景值, 它们的平均值与背景值具有相同的数量级, 分别是背景值的1.08、1.06、1.02、1.01倍, 这四种元素的来源主要为自然源; Cr的富集系数略偏高, 达到了1.23, 其组成由人工源叠加自然源的可能性较大。As、Cd、Cu、Hg的含量最大值达到了河套平原背景值的2倍以上, 说明这4种元素在研究区内存在明显的富集点位。

利用金维软件采用插值法, 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乌梁素海沿

表4 土壤重金属参数统计

Table 4 Parameter statistics of heavy metals in soil

元素	最小值	最大值	均值	标准差	变异系数	富集系数	河套平原表层土壤背景值	农用地土壤污染风险筛选值
As	2.54	24.9	8.63	2.40	0.28	0.89	9.68	25
Cd	0.05	0.28	0.13	0.04	0.30	1.08	0.12	0.6
Cr	31.7	104	68.66	10.79	0.16	1.23	56	250
Cu	6.94	43.5	20.35	5.75	0.28	1.06	19.2	100
Hg	0.007	0.067	0.018	0.0072	0.40	0.72	0.0249	34
Ni	12	46.1	25.4	5.70	0.22	1.02	25	190
Pb	11	28.9	17.19	2.64	0.15	0.92	18.76	170
Zn	27.9	108	56.37	12.67	0.22	1.01	55.7	300
pH	8.07	9.99						

注: 参与统计样品数共计845件。最小值、最大值、均值、河套平原表层土壤背景值、农用地土壤污染风险筛选值单位为mg/kg, 其他无单位。

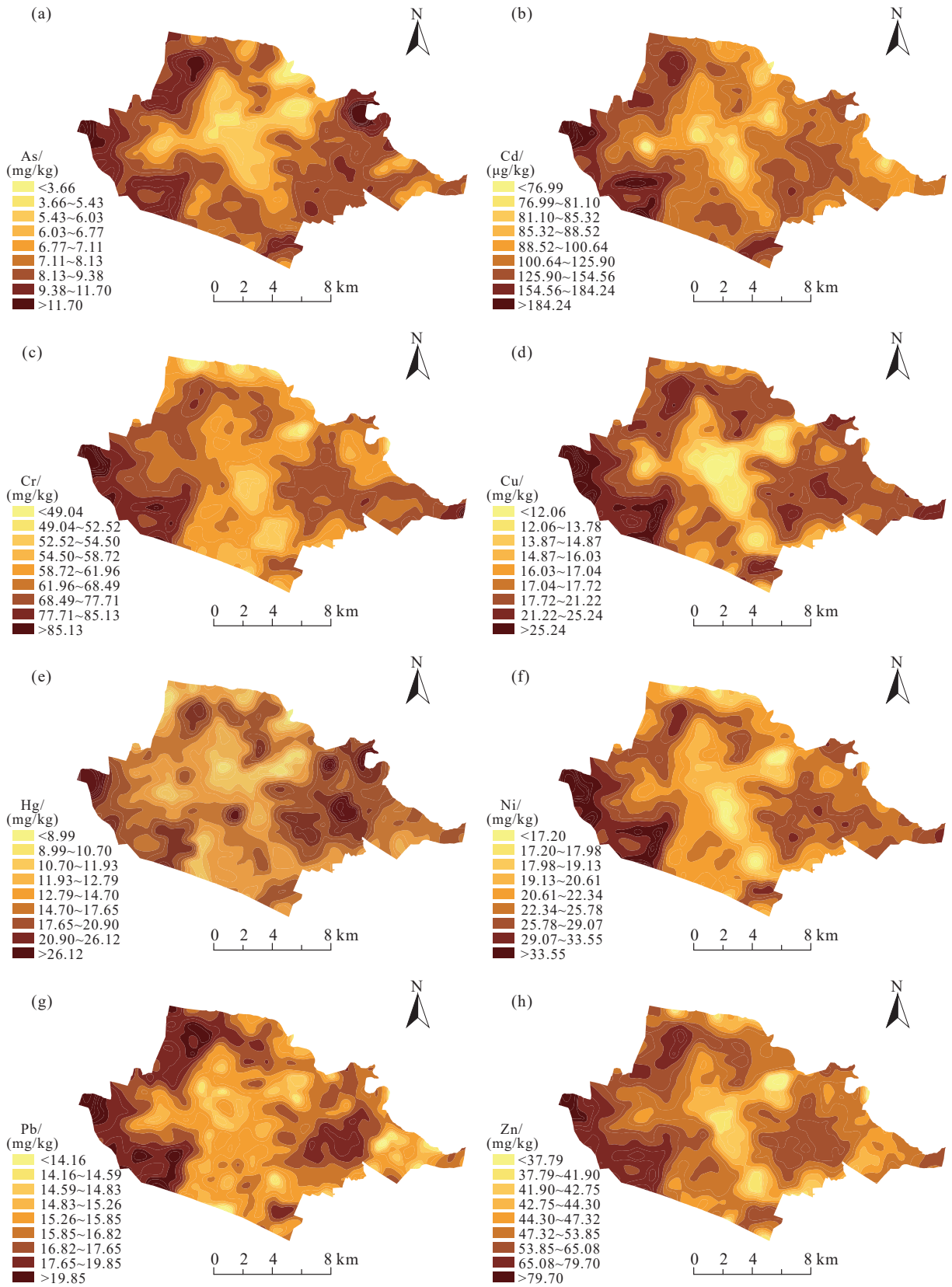


图 3 研究区表层土壤重金属元素空间分布  
Fig.3 Spatial distribution of heavy metals in surface soils of the study area



岸南昌村、黑水壕一带与红明村及附近为相对高值区,在研究区中部为相对低值区,表明地质单元和成土母质是这些元素分布的主控因素。Hg和Pb元素在人口最密集的大余太镇和红明村呈现高值区,受人为活动影响的可能性较大。

土壤元素的变异系数(CV)常用于表示元素受外来物质影响的程度大小。变异系数大,表明元素有可能受到较为强烈的外源物质的影响;变异系数小,表明受到外来物质的影响程度小。一般认为,CV<0.20为弱变异;CV在0.20~0.50为中等强度变异;CV在0.50~1.00为强变异;CV≥1为异常的强变异(Pan et al., 2016)。根据表6中的数据可知,Cr、Pb为弱变异;As、Cd、Cu、Hg、Ni、Zn为中等强度变异。其中Hg的变异系数最高,表明研究区的土壤中Hg元素受外来物质的影响最大。

对研究区表层土壤中重金属元素进行主成分分析,结果(表5)显示,8种重金属元素共提取了2个主成分,累积能够解释总方差的83.58%,应为主要组分。其中主成分1的贡献率达76.36%,表明研究区表层土壤中重金属元素具有相近的来源,主要受成土母质的影响。成分2中只有Hg元素的载荷值较高,表明Hg有别于其他7种元素,还受其他来源的影响。

4.2 重金属污染程度分析

以河套平原背景值为评价参比值,计算研究区重金属地累积指数分级结果(表6)。各元素的地累积指数平均值从-1.14~-0.31,总体呈无污染级别,但有部分样本存在单元素轻污染。从单元素分级数来看,各元素轻污染样本数占比由多到少顺序为Cd>Cr>Cu>Zn>Ni>Hg>As>Pb,其中Cd、Cr、Cu这3个元素污染样本数接近(9.47%~9.23%),各元素均无中污染及以上的样本。从元素污染点位的分布

表5 土壤重金属主成分分析结果

Table 5 Principal component analysis results of soil heavy metals

重金属	主成分	
	1	2
特征值	6.11	0.58
贡献率/%	76.36	7.23
累积贡献率/%	76.36	83.59
As	0.827	0.265
Cd	0.881	0.018
Cr	0.864	-0.339
Cu	0.958	-0.103
Hg	0.720	0.559
Ni	0.952	-0.182
Pb	0.812	0.102
Zn	0.949	-0.164

表6 重金属地累积指数分级结果

Table 6 Classification criteria of index of geo-accumulation

评价项目	平均值	分级样本数		污染点数占比/%
		≤0	0~1	
As	-0.8	832	13	1.54
Cd	-0.56	765	80	9.47
Cr	-0.31	766	79	9.35
Cu	-0.56	767	78	9.23
Hg	-1.14	827	18	2.13
Ni	-0.59	806	39	4.62
Pb	-0.73	844	1	0.12
Zn	-0.6	805	40	4.73

(图4)可知,Cd、Cr、Cu、Zn、Ni的分布区域大致相同,主要为乌梁素海沿岸的南昌村、黑水壕一带,少量位于红明村南侧。结合前述研究表明,除Hg元素外,研究区其他7个土壤重金属污染区域主要受地质地貌特征控制,其来源主要为成土母质。

4.3 重金属污染潜在生态风险评价

以河套平原背景值为评价参比值,计算研究区农田土壤重金属潜在生态危害指数(表7)。As、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn全部样本的生态危害指数均小

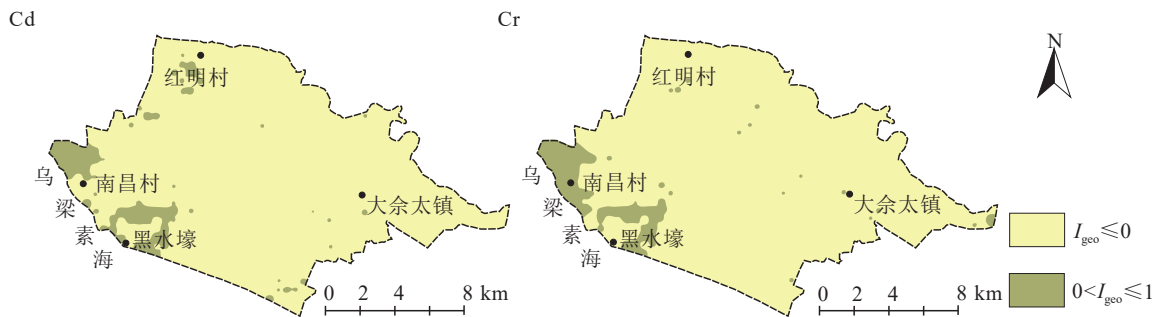


图4 研究区表层土壤重金属元素污染点位分布图  
Fig.4 Distribution of heavy metals pollution points in surface soils of the study area

表 7 土壤重金属潜在生态危害指数特征

	值域	分级样本数/件					
		轻微	中等	强	很强	极强	
$E_i^r$	As	2.62~25.72	845	0	0	0	0
	Cd	12.5~69.75	694	151	0	0	0
	Cr	1.13~3.71	845	0	0	0	0
	Cu	0.36~2.27	845	0	0	0	0
	Hg	11.24~107.63	721	118	6	0	0
	Ni	2.4~9.22	845	0	0	0	0
	Pb	2.93~2.70	845	0	0	0	0
	Zn	0.50~1.94	845	0	0	0	0
RI	40.61~217.86	835	10	0	0	0	

于 40, 为轻微生态风险; Cd 生态危害指数范围为 12.5~69.75, 中等生态风险样本 151 个, 占比 17.87%, 主要分布在研究区西南乌梁素海沿岸至红明村西侧一带(图 5); Hg 生态危害指数范围为 11.24~107.63, 中等生态风险样本 118 个, 占比 13.96%, 强风险 6 个, 占比 0.71%, 主要分布在调查区大余太镇人类居住集中区, 少部分位于乌梁素海沿岸一带(图 5)。

研究区重金属总潜在生态风险指数 RI 范围为 40.61~217.86, 以轻微风险为主, 占比 98.82%, 中等生态风险样本 10 个, 占比 1.18%, 无强风险及强风险以上样本。RI 只在乌梁素海东岸边的耕地中零星存在中等生态风险, 其余地区均为轻微生态风险。

#### 4.4 土壤重金属人体健康风险评估

基于评价参数和调查数据, 按健康风险评估模型, 计算研究区表层土壤重金属的非致癌和致癌健康风险指数(表 8, 表 9)。HQ<1, 表示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、Ni 的危害商大小顺序为: 吸入土壤颗粒>经口摄入>皮肤接触, 其余金属的危害商大小顺序为: 经口摄入>吸入土壤颗粒>皮肤接触。单元素总的

危害商按最大值、平均值由高到低排序为 As>Cr>Ni>Cd>Cu>Zn>Hg, 表明 As 为研究区风险最高的元素。单项重金属非致癌风险指数最大的为 0.38(As), 表明研究区内各单项重金属对人体健康尚不存在非致癌风险。重金属总危害商 HI 的最大值为 0.48, 表明研究区表层土壤总体上不存在非致癌风险。

致癌风险指数显示, 在致癌危害方面, As 的致癌风险大小顺序为经口摄入>皮肤接触>吸入土壤颗粒, 其余 3 种元素(Cd、Cr、Ni)只有吸入土壤颗粒风险。As 元素的总致癌风险最高, 致癌风险指数平均为  $5.69 \times 10^{-6}$ , 其余元素大小顺序为 Ni>Cr>Cd, 但均小于  $10^{-6}$ , 表明 Cd、Cr、Ni 的致癌风险均为无风险水平。As 在 4 个元素风险指数总和中贡献最大, 按最大值占 99.27%, 按平均值占 97.92%, 说明 As 是研究区主要的致癌风险元素, 且主要是经口摄入导致, 应当加以防范。

#### 4.5 农作物及饮用水重金属人体健康风险评估

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), 健康风险评估结果见表 10。在农作物中 Cr、Hg 的含量低于检出



图 5 研究区土壤重金属元素生态风险等级分布图

Fig.5 Distribution of ecological risk levels for heavy metal elements in soil of the study area

表 8 土壤重金属非致癌健康风险指数 ( $10^{-4}$ )Table 8 Non-carcinogenic health risk index of soil heavy metal ( $10^{-4}$ )

重金属		HQ <sub>ois<sub>n</sub></sub>	HQ <sub>dcs<sub>n</sub></sub>	HQ <sub>pis<sub>n</sub></sub>	HQ
As	最大值	1839.78	334.80	1572.62	3737.20
	平均值	637.26	115.97	544.72	1297.96
Cd	最大值	6.18	1.50	26.39	34.08
	平均值	2.82	0.68	12.03	15.53
Cr	最大值	192.11	—	983.86	1175.96
	平均值	126.90	—	649.93	776.84
Cu	最大值	24.11	—	—	24.11
	平均值	11.28	—	—	11.28
Hg	最大值	4.95	—	0.21	5.16
	平均值	1.34	—	0.06	1.40
Ni	最大值	51.09	—	485.72	536.81
	平均值	28.23	—	268.39	296.62
Zn	最大值	7.98	—	—	7.98
	平均值	4.17	—	—	4.17
HI	最大值	2006.93	335.53	2469.77	4801.23
	平均值	811.92	116.66	1474.58	2403.15

注: HQ<sub>ois<sub>n</sub></sub>、HQ<sub>dcs<sub>n</sub></sub>、HQ<sub>pis<sub>n</sub></sub> 分别为经口摄入、皮肤接触、吸入土壤颗粒途径的危害商。

表 9 土壤重金属致癌健康风险指数 ( $10^{-8}$ )Table 9 Carcinogenic health risk index of soil heavy metals ( $10^{-8}$ )

重金属		CR <sub>ois<sub>n</sub></sub>	CR <sub>dcs<sub>n</sub></sub>	CR <sub>pis<sub>n</sub></sub>	CR
As	最大值	1361.68	247.80	0.17	1609.65
	平均值	471.66	85.83	0.06	557.55
Cd	最大值	—	—	0.72	0.72
	平均值	—	—	0.33	0.33
Cr	最大值	—	—	1.79	1.79
	平均值	—	—	1.18	1.18
Ni	最大值	—	—	18.71	18.71
	平均值	—	—	10.34	10.34
CR	最大值	1361.68	247.80	21.07	1621.48
	平均值	471.67	85.83	11.90	569.40

表 10 农作物及饮用水重金属非致癌健康风险指数 ( $10^{-4}$ )Table 10 Non-carcinogenic health risk index of heavy metal in crops and drinking water ( $10^{-4}$ )

重金属		HQ <sub>蔬菜</sub>	HQ <sub>谷物</sub>	HQ <sub>饮用水</sub>
As	最大值	4955.88	10195.05	43036.08
	平均值	3007.43	6181.91	8405.17
Cd	最大值	2485.02	325.95	—
	平均值	1328.53	30.45	—
Cr	最大值	—	—	2579.45
	平均值	—	—	455.20
Cu	最大值	6544.42	3176.98	225.02
	平均值	4517.47	2315.64	29.94
Hg	最大值	—	—	—
	平均值	—	—	—
Ni	最大值	823.03	2347.73	73.71
	平均值	290.41	965.02	14.05
Zn	最大值	1621.28	4594.95	151.56
	平均值	1136.31	3527.86	32.91
HI	最大值	15197.73	16581.31	43253.44
	平均值	10280.15	13021.89	8937.26

限, 在饮用水水样中 Hg、Cd 的含量低于检出限。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, 蔬菜为  $Cu > As > Cd > Zn > Ni$ , 谷物为  $As > Zn > Cu > Ni > Cd$ , 饮用水为  $As > Cr > Zn > Cu > Ni$ 。无论是在蔬菜、谷物还是在饮用水中, As 的都有着较高的风险, 尤其是饮用水中的 As 最高值达到了  $4.3 > 1$ , 具有一定的健康风险。居民食品蔬菜或谷物的 HI 值均大于 1, 对人体的健康产生影响的可能性大。

## 5 讨论

本文研究了乌拉特前旗大余太地区土壤 8 种重金属元素的分布特征、污染程度、潜在生态风险和人体健康风险, 采用了多种评价方法和模型分析结果, 最后对其成因等方面进行探讨, 并提出建议。由于不同方法的指标、权重等不同, 因此评价结果也并不完全一致。总体来看, 研究区的重金属污染处于较低水平。按照富集系数, Cr、Cd、Cu 这 3 种元素排在前面, As、Hg 排在最后; 按照变异系数, Hg、Cd 排在前面, Pb、Cr 排在最后; 地累积指数评价与富集系数均以河套地区背景值为参比标准, 结果表明 Cd、Cr、Cu 为轻污染样本最多的 3 种元素; 重金属潜在生态风险评价时, 经过加权各元素的毒性系数, 结果显示 Hg 和 Cd 成为研究区危害最大的两种元素; 重金属人体健康风险评价时, 虽然 As 的土壤含量低于河套平原的背景值, 但 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, 因此 As 元素对人体健康仍有潜在风险的影响。

已有研究表明, 土壤颗粒越细, 对重金属的吸附能力越强, 其累积因子与潜在生态风险指数也相对增大(赵晶和汤旭, 2011; 吴婷等, 2017)。南昌村、黑水壕一带位于乌苏图勒河冲积扇尾端与乌梁素海交汇处, 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为吻合。各元素在研究区中部近东西向的低值区与乌苏图勒河河道形态高度吻合, 表明乌苏图勒河的侵蚀作用是导致各元素呈现低值区的主要原因。已有研究表明 Hg 元素的富集多来自于交通运输、冬季燃煤等人类活动(刘勇等, 2011; 杨玲等, 2022), 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, 表明人类活动是引起大余太地区 Hg 元

素含量较高的主要原因。

在蔬菜、谷物以及饮用水的健康风险中 As 贡献了很大的比例, 尤其是饮用水中最大值达到了 4.3, 同时河套地区为我国典型的高砷地下水区域(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) 大余太地区 8 种重金属元素含量均小于国家农用地土壤污染风险筛选值, 土壤总体较为清洁。元素按富集系数由大到小顺序为 Cr、Cd、Cu、Ni、Zn、Pb、As、Hg, 其中 Pb、As、Hg 这 3 种元素的平均值略低于背景值, Cr 的富集系数略偏高, 由人工源叠加自然源的可能性较大。Hg 元素的变异系数最大, 其受人类活动影响最大。

(2) As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素含量空间分布特征相近, 来源较为单一, 以成土母质为主。Hg 元素受人为活动影响较大。地累积指数评价结果表明, 8 种重金属元素单值均存在轻污染的点位, 其中 Cd、Cr、Cu 三个元素占比最多, 且污染样本数与分布区域较为接近。

(3) 重金属潜在生态风险评价结果表明, 研究区土壤潜在重金属生态危害主要以轻微风险和中等风险为主, 中等以上风险元素主要为 Cd 和 Hg, 且 Hg 有少量样本达到强风险级别。Cd 风险区主要分布在乌梁素海沿岸的南昌村、黑水壕一带。Hg 风险区主要为大余太镇人类活动集中区。

(4) 重金属人体健康风险评价结果显示, 研究区非致癌风险均处于可接受的水平, 但 As 的致癌风险远高于其他元素, 应加强预警。农作物及饮用水单一重金属健康风险指数显示, 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, 在此一并致以衷心的感谢。

## References

- Adila Hayrat, Mamattursun Eziz, Gulbanu Hini, Jin Wangui, Anwar Mohammad, Alimujiang Kasimu. 2020. Pollution and health risks assessment of heavy metals of road dust in Korla City, Xinjiang[J]. *Geology in China*, 47(6): 1915–1925 (in Chinese with English abstract).



- 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 in northwest Xiushan, Chongqing[J]. *Geology in China*, 47(6): 1625–1636 (in Chinese with English abstract).
- Cai Kui, Duan Yamin, Luan Wenlou, Li Qian, Ma Yunchao. 2016. Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain[J]. *Geology in China*, 43(4): 1420–1428 (in Chinese with English abstract).
- Cao Shengwei, Liu Chunlei, Li Yasong, Li Jing, Hao Qichen, Gao Jie, Dong Yan, Lu Chenming. 2022. Sources and ecological risk of heavy metals in the sediments of offshore area in Quanzhou Bay, Fujian Province[J]. *Geology in China*, 49(5): 1481–1496 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jiping, Chao Zhongdong, Ren Rui, Luo Ting, Chao Xu, Zhang Zhimin, Qiao Xinxing. 2021. Correlation and safety evaluation of crop heavy metal content in Shaanxi Guanzhong selenium-enriched areas[J]. *Northwestern Geology*, 54(2): 273–281 (in Chinese with English abstract).
- Fang Qing, Xian Ping, Meng Zhengcheng. 2021. Environmental health risk assessment model of agricultural land based on Monte Carlo Simulation and its application[J]. *Environmental Engineering*, 39(2): 147–152 (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.
- Guo Huaming, Ni Ping, Jia Yongfeng, Zhang Bo, Zhang Yang. 2015. Characteristics and their causes of surface water-groundwater geochemistry in the Hetao Basin, Inner Mongolia[J]. *Geoscience*, 29(2): 229–237 (in Chinese with English abstract).
- Guo Jungang, Zhao Hengqin, Bian Xiaodong, Sun Xiaoyan. 2021. Characteristics and ecological risk of soil heavy metals of a Tungsten mine in Yudu, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(7): 1195–1202 (in Chinese with English abstract).
- Guo Xiaoxiao, Liu Congqiang, Zhu Zhaozhou, Wang Zhongliang, Li Jun. 2011. Evaluation methods for soil heavy metals contamination [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 30(5): 889–896 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14(8): 975–1001.
- Lei Peiyu, Zheng Jingli, Jia Ru, Meng Zhaowei. 2022. Health risk assessment of typical metalloids and heavy metals in rural drinking water in Shaanxi Province in 2020[J]. *Journal of Hygiene Research*, 51(1): 45–50 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng, Shi Xiaolong, Liu Jianzhang, Chen Shuang, Cai Kui, Song Zefeng, Tian Haofei. 2024. Relationship between heavy metals and clay minerals in farmland soil around industrial zone and health risk assessment[J]. *Geology in China*, 51(5): 1513–1526 (in Chinese with English abstract).
- Li Yimeng, Ma Jianhua, Liu Dexin, Sun Yanli, Chen Yanfang. 2015. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of urban soils in Kaifeng city, China[J]. *Environment Science*, 36(3): 1037–1044 (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 and health risk assessment of heavy metals in farmland soil around the gold mining area in Tongguan of Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 48(3): 749–763 (in Chinese with English abstract).
- Liu Jun, Wang Ying, Wei Wen, Zhang Lin, Liu Fulian. 2017. Using stable isotope method to identify sources of groundwater recharge in Shetai Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of China Hydrology*, 37(1): 51–55 (in Chinese with English abstract).
- Liu R P, Xu Y N, Zhang J H, Wang W K, Rafaey M Elwardany. 2020. Effects of heavy metal pollution on farmland soils and crops: A case study of the Xiaoqinling Gold Belt, China[J]. *China Geology*, 3(3): 402–410.
- Liu Ruixue, Qiao Dongyun, Wang Ping, An Yi, Huo Lili. 2019. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan County in Hunan Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 38(7): 1523–1530 (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).
- Liu Yong, Yue Lingling, Li Jinchang. 2011. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 31(6): 1285–1293 (in Chinese with English abstract).
- Lu Jin, Zhao Xingqing. 2017. Characteristics and ecological risk assessment of polluted soil by heavy metals in Shizishan, Tongling[J]. *Environmental Chemistry*, 36(9): 1958–1967 (in Chinese with English abstract).
- Muller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geological Journals*, 2: 109–118.
- Niu L L, Yang F X, Xu C, Yang H Y, Liu W P. 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 & Pollution Research*, 23(19): 1–11.
- Shang Erping, Xu Erqi, Zhang Hongqi, Huang Caihong. 2018. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. *Environment Science*, 39(10):

- 4670–4683 (in Chinese with English abstract).
- Song Mian, Gong Lei, Wang Yan, Tian Dazheng, Wang Xinfeng, Li Yue, Li Wei. 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).
- Wang Changyu, Zhang Surong, Liu Jihong, Xing Yi, Li Mingze, Liu Qingxue. 2021. Pollution level and risk assessment of heavy metals in a metal smelting area of Xiong'an New District[J]. *Geology in China*, 48(6): 1697–1709 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jie, Gong Jing, Liu Yujia, Yu Miao, Wang Weihao, Li Mengying, Xu Wumei, Xiang Ping. 2022. Ecological and health risk assessment of heavy metals in urban soils from a typical southwest capital city[J]. *Journal of Light Industry*[J]. *Journal of Light Industry*, 37(4): 118–126 (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).
- Wang Yue, Liu Yingxue, Li Dandan, He Rui, Wang Wei, Liu Yuexian, Lu Zhaohua, Zhang Meng. 2021. Characteristics of chromium soil pollution and health risk assessment in saline alkali farmland: A case study of Bincheng district, Binzhou City, Shandong Province, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 40(12): 2723–2732 (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).
- 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).
- Yang Bingxue, Fang Chen, Ma Qin, Xu Zhenbo. 2021. Health risk assessment of heavy metals pollution in farmland soils in a region of 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, Wan Rui, Zhang Fenglei, Zhong Keqiang, Zhu Haishan, Luo Kai. 2022. Heavy metal pollution and human health risks assessment of soil and crops near the mercury ore in Chongqing[J]. *Environmental Chemistry*, 41(2): 536–548 (in Chinese with English abstract).
- Yu Yunjiang, Hu Linkai, Yang Yan, Che Fei, Sun Peng, Deng Fei. 2010. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils of a typical basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 23(12): 1523–1527 (in Chinese with English abstract).
- 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 toxic" 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. Spatial distribution and accumulation of heavy metal in arable land soil of China[J]. *Environmental Science*, 35(2): 692–703 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yaqu, Shang Tingting, Cao Suzhen, Zhao Xiuge, Ding Jieping, Zhou Jing, Wang Xiao, Zhang Fang. 2019. Characteristics of heavy metals contamination in soil and health risk assessment in Lanzhou[J]. *Journal of Environment and Health*, 36(11): 1019–1024 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yi, Zhou Xinquan, Zeng Xiaomin, Feng Jiao, Liu Yurong. 2022. Characteristics and assessment of heavy metal contamination in soils of industrial regions in the Yangtze River economic belt[J]. *Environmental Science*, 43(4): 2062–2070 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Youwen, Han Jianhua, Tu Qi, Yang Yonggan, Xu Yan, Shi Rong-guang. 2019. Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in suburban farmland soils of Tianjin[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 35(11): 1445–1452 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Jing, Tang Xu. 2011. Distribution of heavy metals in soils with different particle size[J]. *Sichuan Environment*, 30(4): 17–20 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Qingling, Li Qingcai, Xie Jiangkun, Li Yuanzhong, Ji Yonghong, Pang Chengbao, Wan Miao. 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).
- Zhou C C, Liu G J, Fang T, Wu D, Lam P K S. 2014. Partitioning and transformation behavior of toxic elements during circulated fluidized bed combustion of coal gangue[J]. *Fuel*, 135: 1–8.
- 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).

## 附中文参考文献

- 阿地拉·艾来提, 麦提吐尔逊·艾则孜, 靳万贵, 姑力巴努·艾尼, 艾尼瓦尔·买买提, 阿里木江·卡斯木. 2020. 新疆库尔勒市道路积尘重金属污染及健康风险评估[J]. *中国地质*, 47(6): 1915–1925.

- 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.
- 蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 李倩, 马云超. 2016. 河北平原农田土壤重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的影响因素[J]. *中国地质*, 43(4): 1420-1428.
- 曹胜伟, 刘春雷, 李亚松, 李静, 郝奇琛, 高婕, 董岩, 陆晨明. 2022. 福建泉州湾近岸海域沉积物重金属来源分析与生态风险评价[J]. *中国地质*, 49(5): 1481-1496.
- 陈继平, 钞中东, 任蕊, 罗婷, 晁旭, 张志敏, 乔新星. 2021. 陕西关中富硒土壤区农作物重金属含量相关性及其安全性评价[J]. *西北地质*, 54(2): 273-281.
- 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价[J]. *环境工程*, 39(2): 147-152.
- 郭华明, 倪萍, 贾永锋, 张波, 张杨. 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.
- 郭俊刚, 赵恒勤, 卞孝东, 孙晓艳. 2021. 江西于都某钨矿区土壤重金属特征及生态风险评价[J]. *地质通报*, 40(7): 1195-1202.
- 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 王中良, 李军. 2011. 土壤重金属污染评价方法[J]. *生态学杂志*, 30(5): 889-896.
- 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. 2024. 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价[J]. *中国地质*, 51(5): 1513-1526.
- 李一蒙, 马建华, 刘德新, 孙艳丽, 陈彦芳. 2015. 开封城市土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 36(3): 1037-1044.
- 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. 陕西潼关县金矿区周边农田土壤重金属生态健康风险评价[J]. *中国地质*, 48(3): 749-763.
- 刘君, 王莹, 卫文, 张琳, 刘福亮. 2017. 利用稳定同位素方法识别内蒙古余太盆地地下水补给来源[J]. *水文*, 37(1): 51-55.
- 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉. 2019. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *农业环境科学学报*, 38(7): 1523-1530.
- 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.
- 刘勇, 岳玲玲, 李晋昌. 2011. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 31(6): 1285-1293.
- 陆金, 赵兴青. 2017. 铜陵狮子山矿区土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境化学*, 36(9): 1958-1967.
- 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.
- 汪洁, 龚竞, 刘雨佳, 于森, 王炜皓, 李梦莹, 徐武美, 向萍. 2022. 昆明市土壤重金属的生态与健康风险评价[J]. *轻工学报*, 37(4): 118-126.
- 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价[J]. *中国地质*, 48(6): 1697-1709.
- 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.
- 王玥, 刘莹雪, 李丹丹, 何睿, 王伟, 刘月仙, 陆兆华, 张萌. 2021. 盐碱农田土壤铬污染特征及健康风险评价——以山东省滨州市滨城区为例[J]. *农业环境科学学报*, 40(12): 2723-2732.
- 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.
- 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.
- 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.
- 于云江, 胡林凯, 杨彦, 车飞, 孙朋, 邓飞. 2010. 典型流域农田重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 23(12): 1523-1527.
- 张皓月, 刘文波, 张绪教, 苏春利. 2021. 河套平原地下水中砷的空间变异特征及影响因素分析[J]. *地质科技通报*, 40(1): 192-198.
- 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.
- 张亚群, 尚婷婷, 曹素珍, 赵秀阁, 丁杰萍, 周静, 王潇, 张昉. 2019. 兰州市土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. *环境与健康杂志*, 36(11): 1019-1024.
- 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.
- 赵晶, 汤旭. 2011. 不同粒径土壤中重金属的分布规律[J]. *四川环境*, 30(4): 17-20.
- 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.
- 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.