

doi: 10.12029/gc20220906001

王磊, 段星星, 赵禹, 李文明, 张晶. 2024. 甘肃省白银市四龙镇—北湾镇耕地地区土壤重金属现状及生态风险评价[J]. 中国地质, 51(1): 290–303.
Wang Lei, Duan Xingxing, Zhao Yu, Li Wenming, Zhang Jing. 2024. Ecological risk assessment of heavy metals in soil in Silong and Beiwan towns, Baiyin city, Gansu Province[J]. Geology in China, 51(1): 290–303(in Chinese with English abstract).

甘肃省白银市四龙镇—北湾镇耕地地区土壤重金属现状及生态风险评价

王磊¹, 段星星², 赵禹¹, 李文明¹, 张晶¹

(1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710119; 2. 中国地质调查局乌鲁木齐自然资源综合调查中心, 新疆 乌鲁木齐 830026)

摘要:【研究目的】甘肃省白银地区矿业发达, 矿山开采导致土壤重金属污染严重, 掌握当地土壤重金属污染及对生态健康风险的影响对生态环境保护具有重要意义。【研究方法】以甘肃省白银地区四龙镇—北湾镇耕地地区表层土壤为研究对象, 采用单因子指数法、内梅罗综合指数法、地积累指数法和潜在生态危害指数法四种方法对区内表层土壤重金属(As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn)污染进行了分析和评价。【研究结果】单因子指数法统计结果显示研究区土壤污染主要为 Cd、As 的污染, 单因子指数 P_{Cd} 显示 89.21% 的土壤为一等清洁, 8.63% 为二等轻微污染, 0.72% 为三等轻度污染, 1.44% 为四等中度污染。单因子指数 P_{As} 显示 94.24% 为土壤为一等清洁, 5.04% 为二等轻微污染, 0.72% 四等中度污染。内梅罗综合指数 P_z 介于 0.339~2.869, 均值为 0.603; P_z 显示 85.61% 的土壤为清洁, 7.91% 为轻微污染, 5.04% 为轻度污染, 1.44% 为中度污染。地积累指数法结果显示研究区土壤重金属污染总体处于 0~2 级, 以 Cd、Hg、As、Pb 污染为主。潜在生态危害指数法结果显示, 研究区污染以 Cd、Hg 污染为主; Cd 潜在生态风险最大, 10.07% 属于中潜在风险, 5.04% 属于较高潜在风险, 1.44% 属于很高潜在风险; 潜在生态危害综合指数平均值为 211.80, 表明该地区土壤总体处于中等危害程度。四种方法评价结果总体一致, 即研究区以 Cd、As、Hg 污染为主, 应加强监测。【结论】以黄河为界对调查区进行分区研究, 结果显示北岸灌淤土区(B 区)污染最为严重, 与东大沟河交界位置污染程度最高, 水体及底泥样品重金属分析结果也证实东大沟河污染也较为明显, 进一步证实了研究区北部主要受白银矿山东大沟河流域污染为主, 而黄河南岸土壤相对清洁, 但也受到不同程度的影响。近些年, 随着引黄灌溉及矿山环境治理等措施, 土壤污染有所缓解, 但土壤中累积的重金属需要长时间的天然降解或迁移, 对高风险区仍应加强监测及治理。

关键词: 土壤; 重金属; 生态风险; 环境地质调查工程; 白银市; 甘肃省

创新点: (1) 采用单因子指数法、内梅罗综合指数法、地积累指数法、潜在生态危害指数法对区内土壤重金属进行了生态风险评价。(2) 通过对黄河两岸分区研究查明了各区污染程度, 并确定东大沟河周边为重要的土壤污染区。

中图分类号: X53; X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0290-14

Ecological risk assessment of heavy metals in soil in Silong and Beiwan towns, Baiyin city, Gansu Province

收稿日期: 2022-09-06; 改回日期: 2023-03-20

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190521、DD20230334)资助。

作者简介: 王磊, 男, 1985 年生, 高级工程师, 主要从事地球化学相关的调查研究工作; E-mail: tleiwang@163.com。

通讯作者: 段星星, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事环境地球化学相关的研究工作; E-mail: 86000536@qq.com。

WANG Lei¹, DUAN Xingxing², ZHAO Yu¹, LI Wenming¹, ZHANG Jing¹

(1. Xi'an Center of Geological Survey, China Geological Survey, Xi'an 710119, Shaanxi, China; 2. Urumqi Comprehensive Survey Center of Natural Resources, China Geological Survey, Urumqi 830026, Xinjiang, China)

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

[Objective] The mining industry in the Baiyin region of Gansu Province is well-developed, leading to severe heavy metal soil contamination. Grasping the influence of heavy metal contamination of the soil and its potential risks to ecological health is significant in protecting the environment. **[Methods]** Taking the surface soils in the four-dragon town-north bay town farmland area of Baiyin region of Gansu Province as the research object, four methods, namely the single-factor index, Nemerow comprehensive index (P_z), geochemical accumulation index, and potential ecological risk index (RI), were used to analyze and evaluate the heavy metal (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn) contamination in the region. **[Results]** The single-factor index results showed that the soil pollution in the study area was mainly Cd and As, in which the levels of P_{Cd} were at first-class cleanliness (89.21%), slight second-class pollution (8.63%), third-class light pollution (0.72%), fourth-class medium pollution (1.44%), and the levels of P_{As} was at first-class cleanliness (94.24%), slight second-class pollution (5.04%), fourth-class medium pollution (0.72%). P_z ranged from 0.339 to 2.869, with an average of 0.603, indicating that 85.61% of the soil was clean, 7.91% was slightly polluted, 5.04% was lightly polluted, and 1.44% was moderately polluted. The geochemical accumulation index results showed that the heavy metal contamination of the soil in the study area was generally at the level of 0–2, mainly Cd, Hg, As, and Pb. In the potential ecological risk area, Cd and Hg were the main pollution factors. Cd had the highest potential ecological risk, with 10.07% belonging to medium potential risk, 5.04% to relatively high potential risk, and 1.44% to very high potential risk. The average value of the RI was 211.80, indicating that the soil in the area was generally at a medium danger level. The four evaluation methods were consistent overall, indicating that the study area was mainly contaminated by Cd, As, and Hg and should be strengthened for monitoring. **[Conclusion]** Through the divisional study of the survey area with the Yellow River as the boundary, the results showed that the soil of the north bank of the irrigation and silt area (Area B) was the most polluted, and the pollution level was the highest at the junction of East Dagou River. The heavy metal analysis results of the water and sediment samples also confirmed that the pollution of East Dagou River was more obvious, further confirming that the north of the study area was mainly polluted by the East Dagou River basin of Baiyin mine, while the soil on the south bank of the Yellow River was relatively clean, but was still affected to a certain extent. In recent years, soil pollution has been alleviated to some extent with the measures of Yellow River irrigation and mining environmental governance. However, the heavy metals accumulated in the soil need long-term natural degradation or migration, and monitoring and governance should be strengthened for the high-risk areas.

Key words: soil; heavy metal pollution; ecological risk; environmental geological survey engineering; Baiyin city; Gansu Province

Highlights: (1) By the method of single factor index and comprehensive Index and geoaccumulation index and potential ecological hazard index, the ecological health risk of soil heavy metals in the study area was evaluated; (2) The pollution degree was found out through the study on the division of the two banks of the Yellow River, and the area around the East Dagou River was determined to be an important soil pollution area.

About the first author: WANG Lei, male, born in 1985, senior engineer, engaged in geochemical survey and research; E-mail: tleiawang@163.com.

About the corresponding author: DUAN Xingxing, male, born in 1981, senior engineer, engaged in geochemical survey and research; E-mail: 86000536@qq.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190521, No.DD20230334).

1 引言

重金属污染是一个全球性问题,农田土壤和作物重金属含量超标,必然影响食品安全和人畜健康。随着工业生产的高速发展及农业现代化进程

加快,很多地区的耕地土壤重金属污染情况日趋严重,前人也进行了大量的研究(崔邢涛等, 2011, 2016; 蔡奎等, 2016; 代杰瑞等, 2018; 鲍丽然等, 2020; Liu et al., 2020; 林苾等, 2021; 刘同等, 2022; 尹德超等, 2022; Wang et al., 2022; Chen et al., 2023;

Dong et al., 2023)。白银地区是中国重要的有色金属冶炼加工与化工工业基地之一,该地区干旱少雨,区域水资源贫乏,工业污水和生活污水成为当地农田的主要水源,由此造成了大量重金属进入土壤,导致农田土壤和作物重金属含量严重超标(张钊熔等, 2019)。白银地区重金属污染治理刻不容缓,因为它不仅关系着当地的生态和环境安全,同时东大沟河作为黄河的支流,也对其造成了严重影响与威胁。随着白银市东大沟重金属污染综合治理与生态修改工程的实施,环境质量虽明显改善,但仍存在重金属超标情况。因此,加强东大沟河下游耕地重金属污染调查和评价不仅对于当地生态环境监测和改善具有重要的意义,也是黄河流域高质量发展的迫切需求。白银市筹措大量资金,2017—2020年实施了黄河上游白银段东大沟流域重金属污染农田、历史遗留含铬污染土壤、东大沟重金属河道综合整治、银光公司大河沟污染土壤等4项治理修复工程,对东大沟河上游及周边污染情况进行了治理,主要采取的措施包括底泥治理、河岸带治理、湿地工程、建设填埋场、污染土壤换填、污染土壤的开挖转运、绿地修复技术等。对当地的生态环境起到了明显的改善作用。此4项修复工程主要位于东大沟河上游及白银市周边,位于本次

研究区的上游。

本次研究区位于白银市东大沟河与黄河交汇处,行政区划属四龙镇、北湾镇。土壤类型以灰钙土和灌淤土为主,灌淤土主要位于黄河两岸形成的冲积平原或湿地中,灰钙土位于离黄河稍远的黄土区(图1)。土壤pH值介于7.85~9.35,平均为8.43,为碱性土。土壤颗粒组分以粉粒为主(32.39%~79.68%),其次为砂粒(12.55%~63.99%)和黏粒(3.61%~18.79%)(刘白林, 2017)。研究区灰钙土成土母质多为粗骨性残积母质,黄土梁峁为风成黄土。

2 土壤样品采集与测试

本次土壤样品布设,主要考虑了东大沟河作为白银地区黄河的一个重要支流,也是长期污染较为严重的河流之一,其对黄河两岸耕地污染均产生不同程度的影响,为了查明其对黄河两岸耕地污染不同程度的影响,布设了相关样品。测试分析指标参考该地区以往的主要污染指标,本次测试了8种重金属元素(Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr、Zn、Ni)及有机质等指标,此外还采集了少量河流底泥及玉米样品。对黄河南北两岸重金属含量特征进行了对比研究。利用单因子污染指数、内梅罗综合指数法、地积累指数法和潜在生态危害指数法分别分析研

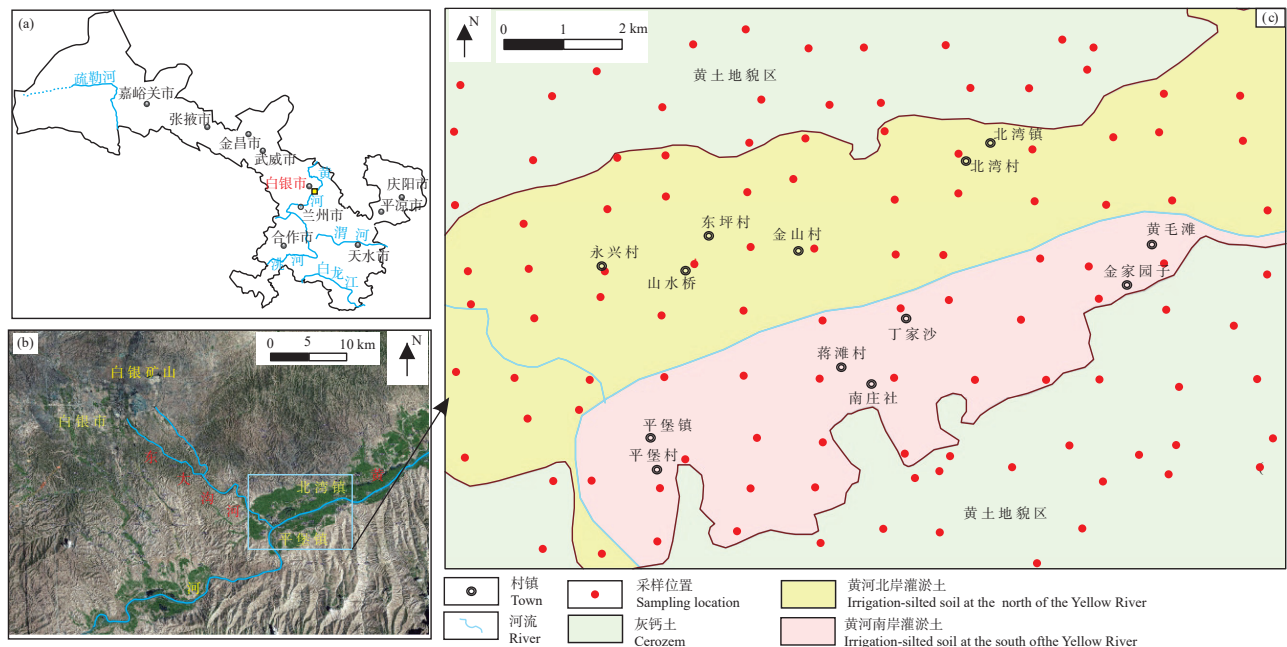


图1 工作区所处位置及采样点位图

Fig.1 Location of the study area and soil sampling location

价了当地农田土壤中重金属的污染特征和潜在生态危害, 查明了不同区域地块的累积或污染程度。

2.1 样品采集

采样点设计主要通过卫星影像和土壤调查图斑进行布设。首先以 1 km² 划分网格, 每 km² 一个采样点。网格布设可保证样品在空间分布上相对均匀, 图斑布设可保证样品主要分布在农用地内。其次, 样点布设全部布设于农用地中。本次采样范围 14 km×10 km, 总计采样面积约 140 km², 实际采样点位 139 个。为了调查东大沟上游周边耕地状况, 采集了少量土壤样品进行分析。野外采样选择地块中心区域, 采取 2 个副样和 1 个主样, 混合成 1 个样品, 副样与主样点间距 50 m 左右。3 个样点呈三角型分布。研究区内部分地块较小, 或呈狭长状, 在地块种植农作物相同的情况下可跨地块采样。采样规格为深 0~20 cm, 宽 5 cm, 厚 3 cm 的长方体土柱, 将 3 个样点土样混合后装入样品袋, 代表该样点的土壤样品, 并记录采样点周围道路、工厂、农村等影响因素。

2.2 样品加工

土壤样品在室内常温、干燥、通风、清洁条件下自然风干, 等其完全风干后, 去掉其中的动植物残骸、石子以及其他杂物, 以避免影响实验测量结果; 之后, 将土样碾碎至过 20 目铁丝筛, 取得均匀土样 250 g, 将其装入聚乙烯塑料袋储存并标明样号, 用以测定土壤基本理化性质和重金属含量; 将剩余样品装入样品罐中, 保存于干净干燥的环境中作为副样备用。

取过 20 目筛 (<0.84 mm 粒度) 的土壤样品 200 g, 充分混匀后均分成两份, 一份 (约 50 g) 直接装入牛皮纸袋 (外套自封口塑料袋) 用于 pH、另一

份 (约 100 g) 采用无污染样品制备机具 (玛瑙球磨机) 将样品制备成所需的 200 目 (<0.074 mm 粒度)。加工完毕的样品用电子天平分成两份, 一份 30 g 装入纸袋用于化学分析, 另一份样品装于塑料瓶用于 XRF、AFS 分析, 分析元素见表 1。将剩余样品作为副样按相关规定保存, 保存环境干燥, 以确保土壤粒度符合要求。若由于潮湿环境造成的土壤黏粒结合, 则应干燥后重新研磨加工至符合要求。

3 评价方法及结果

3.1 重金属含量

3.1.1 土壤重金属元素含量特征

研究区土壤重金属含量特征见表 2。由表 2 可以看出, 研究区 As、Hg、Cr、Cu、Pb、Zn 6 种元素平均值均高于甘肃省土壤环境背景值, 分别为甘肃省土壤背景值的 1.15、2.72、1.05、1.12、1.46、1.11 倍, 比值呈 Hg>Pb>As>Cu>Zn>Cr 的趋势。Cd 和 Ni 含量虽低于甘肃省土壤元素背景值, 但 Cd 含量变化较大, 变化系数为 1.05, 最大值达 3.1130 mg/kg, 是甘肃省土壤环境背景值的 26.8 倍, 是全国丰度的 34.6 倍。Hg 变化系数为 0.98, 最大值为 0.3560 mg/kg, 是甘肃省土壤背景值的 17.8 倍, 是全国丰度的 8.9 倍; As 的变化系数为 0.39, 最大值为 73.6, 是甘肃省土壤背景值的 5.8 倍, 是全国丰度的 7.4 倍。通过这些数据说明 As、Hg、Cr、Cu、Pb、Zn 具有明

表 1 土壤样品分析方法

| 序号 | 分析方法 | 项数 | 测定元素 |
|----|----------------------|----|----------|
| 1 | 等离子体质谱法 (ICP-MS/AES) | 3 | Cu、Cd、Ni |
| 2 | X射线荧光光谱法 (XRF) | 3 | Cr、Pb、Zn |
| 3 | 原子荧光光谱法 (AFS) | 2 | As、Hg |

表 2 表层土壤重金属描述性统计

| 重金属元素 | 平均值/ (mg/kg) | 中位数/ (mg/kg) | 标准差 | 变异系数 (Cv) | 最大值/ (mg/kg) | 最小值/ (mg/kg) | 甘肃省土壤环境背景值 (mg/kg) | 调查区平均值/甘肃省 土壤环境背景值 | 全国丰度/ (mg/kg) |
|-------|-----------------|-----------------|-------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|------------------|
| As | 14.61 | 13.5 | 5.68 | 0.39 | 73.6 | 9 | 12.7 | 1.15 | 10 |
| Hg | 0.0543 | 0.0350 | 53.20 | 0.98 | 0.3560 | 0.0130 | 0.02 | 2.72 | 0.04 |
| Cd | 0.0418 | 0.0275 | 0.44 | 1.05 | 3.1130 | 0.0960 | 0.116 | 0.36 | 0.09 |
| Cr | 73.65 | 73.80 | 4.87 | 0.07 | 85.1 | 58.40 | 70.2 | 1.05 | 65 |
| Cu | 26.98 | 24.50 | 6.11 | 0.23 | 56 | 18.00 | 24.1 | 1.12 | 24 |
| Ni | 30.35 | 30.10 | 3.04 | 0.10 | 39.4 | 20.80 | 35.2 | 0.86 | 26 |
| Pb | 27.44 | 24.20 | 9.90 | 0.36 | 101.2 | 19.70 | 18.8 | 1.46 | 23 |
| Zn | 75.96 | 67.20 | 22.37 | 0.29 | 186.2 | 45.50 | 68.5 | 1.11 | 68 |

注: 甘肃省土壤环境背景值参考中国环境监测总站 (1990) 编《中国土壤元素背景值》; 全国丰度参考鄯明才等 (1997)。

显的高背景值。

3.1.2 土壤重金属背景值确定方法

土壤重金属确定的方法多种多样,各有其优缺点。主要有置信区间法、累积频率法、迭代剔除法、数理统计法等。本次采用数理统计法背景值分析中的图解法,步骤如下:(1)将数据分组。(2)将分组后的数据统计结果填入表内。(3)编绘累积频率图。取一平面直角坐标系,以横坐标表示含量对数值,以纵坐标表示累积频率。再用组上限为横坐标,用该组对应的累积频率为纵坐标,依次给出各坐标点的位置,最后用圆滑曲线将各点链接起来,就得到频率分布曲线。(4)利用频率分布曲线求出lgMe(Me代表数据的中位数)和 σ 。频率分布曲线上累积频率为50%的点,对应的横坐标为lgMe,而累积频率为15.9%,84.1%的点,对应的横坐标为lgMe- σ 。故可求出 σ 。(5)求出背景值和异常下限。

采用此方法计算得出的各元素背景值,结果(表3)显示,计算得出重金属元素As、Cr、Cu、Ni、Zn的背景值与甘肃土壤环境背景值接近,比值分别为1.06、1.05、1.03、0.85、0.97。研究区Hg、Cd、Pb元素背景值与甘肃省土壤环境背景值比值分别为1.63、2.31、1.30。8种元素背景值与甘肃省土壤环境背景值比值由大到小排序为Cd>Hg>Pb>As>Cr>Cu>Zn>Ni。Cd、Hg、Pb、As这4种元素相比其他几种元素在研究区内具有较高的背景值含量特征。

3.1.3 黄河南北两岸自然背景分区

为了更详细了解黄河两岸重金属分布及背景含量情况,在分析重金属元素地球化学图基础上,结合地貌景观,以黄河、东大沟河为界,将工作区分为A、B、C、D四个区(图2),A区位于黄河以北的黄土沟壑区,土壤类型以灰钙土为主,B区位于黄河冲洪积平原,土壤类型以灌淤土为主;C区位于黄河

表 3 利用 GeoIPAS 计算的土壤重金属元素背景值及异常下限
Table 3 Background levels of heavy metals in soil by GeoIPAS software

| 重金属元素 | As | Hg | Cd | Cr | Cu | Ni | Pb | Zn |
|--------------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 背景值/(mg/kg) | 13.49 | 0.0326 | 0.2674 | 73.73 | 24.79 | 30.08 | 24.49 | 66.76 |
| 甘肃省土壤环境背景值/(mg/kg) | 12.7 | 0.02 | 0.116 | 70.2 | 24.1 | 35.2 | 18.8 | 68.5 |
| 异常下限 | 15.54 | 0.0627 | 0.4681 | 78.12 | 30.06 | 33.56 | 29.97 | 82.19 |

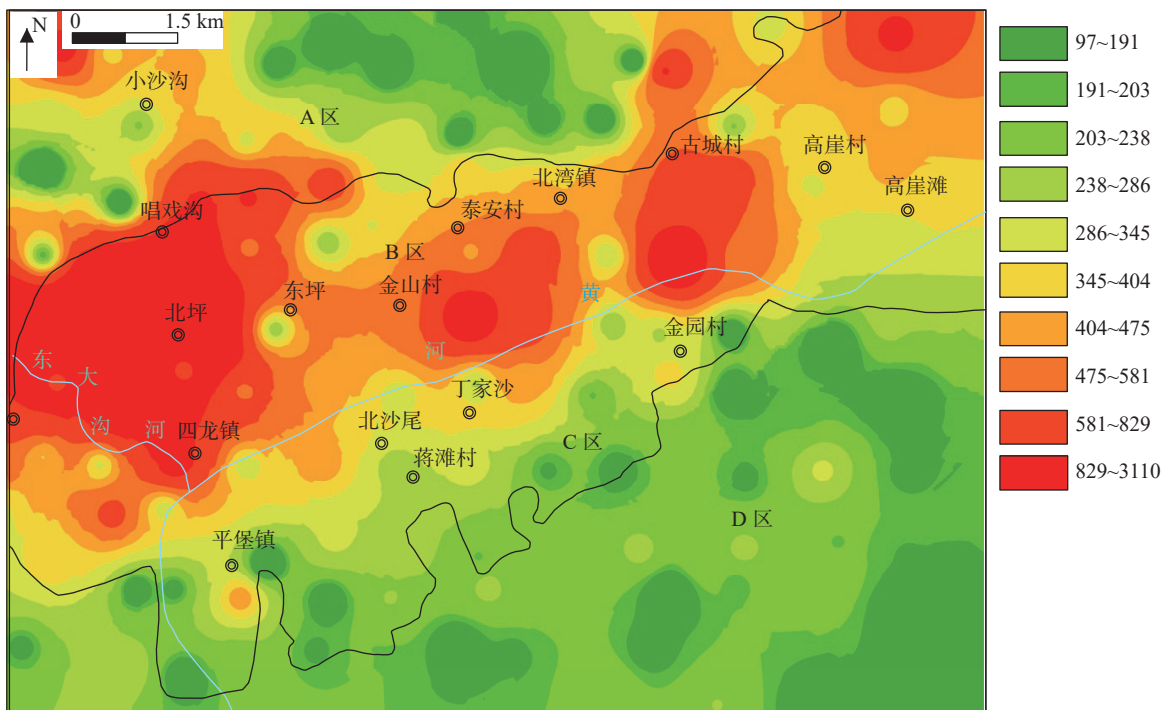


图 2 研究区 Cd 元素地球化学图(mg/kg)
Fig.2 Geochemical map of Cd element in the study area (mg/kg)

南岸冲洪积平原, 土壤类型也以灌淤土为主, D 区位于黄河南岸的黄土沟壑区, 土壤类型以灰钙土为主。四个区土壤元素地球化学特征见表 4。为了更直观显示各区重金属元素含量差异, 制作了各分区重金属平均含量三维直方图(图 3), 显示 A 和 B 区重金属含量总和明显高于 C 区和 D 区, 其中 B 区 As、Hg、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb、Zn 元素相比 A 区、C 区和 D 区含量最高。这也证实了研究区北部受白银矿山东大沟河流域污染更为明显, 而黄河南岸污染相对较低。

3.2 重金属元素与有机质相关性分析

有机质是土壤中重要的组成物质, 它对重金属具有较强的络合能力, 重金属可以以不同形式进入或吸附在有机颗粒上, 与有机质络合生成复杂的络合态金属, 这种络合态金属大部分被固定在土壤中, 较稳定, 不易释放(韦继康等, 2021), 从而影响重

金属的沉淀、迁移转化和生物有效性。研究区主要存在 Cd、Hg、As、Pb 的重金属污染, 4 种重金属中 Cd、Hg 污染最为明显。通过对研究区 139 件土壤样品重金属元素 Cd、Hg、As、Pb 与土壤有机质的相关性分析, 发现 4 种重金属元素与有机质含量之间具有正相关关系, 尤以 Cd、Hg、Pb 相对明显(图 4); 分析还发现土壤有机质含量在 0~0.5%, 4 种重金属元素含量与土壤有机质含量之间相关性最为显著, 重金属含量随有机质含量升高而升高; 但当有机质含量在 0.5%~1.0%, 二者之间相关性明显减弱, 但这时 4 种重金属含量出现了较多的离散值, 主要原因是黄土区有机质含量较低, 导致重金属含量相对较低。

3.3 污染程度评价方法

重金属污染评价方法种类繁多, 从矿山地质环境角度看, 应用于土壤重金属污染评价的方法主要有富集因子分析法、单元素污染指数法、内梅罗综合指数法、富集系数法、模糊数学法、层次分析法、地质累积指数法(Geoaccumulation Index)、潜在生态危害指数法(Potential Ecological Risk Index)、健

表 4 研究区黄河两岸分区土壤元素地球化学参数统计

Table 4 Geochemistry parameter statistics of heavy metals on both sides of the Yellow River in the study area

| 研究区分区 | 重金属元素 | 平均值/(mg/kg) | 标准差 | 最大值/(mg/kg) | 最小值/(mg/kg) |
|---------------|---------------|-------------|----------|-------------|-------------|
| A区 (35个样品) | As | 14.91 | 10.17 | 73.60 | 9.33 |
| | Hg | 33.31 | 30.48 | 200.73 | 15.33 |
| | Cd | 0.3606 | 508.62 | 3.1127 | 0.0960 |
| | Cr | 72.26 | 5.78 | 80.10 | 58.40 |
| | Cu | 25.83 | 4.86 | 41.61 | 19.15 |
| | Ni | 29.64 | 2.96 | 35.79 | 23.00 |
| | Pb | 27.55 | 13.77 | 101.20 | 19.70 |
| | Zn | 68.3 | 14.41 | 127.5 | 47.8 |
| | B区 (47个样品) | As | 16.36 | 3.12 | 25.41 |
| Hg | | 95.75 | 68.31 | 356.38 | 20.41 |
| Cd | | 0.6841 | 502.2300 | 2.7944 | 0.2333 |
| Cr | | 75.96 | 5.05 | 85.10 | 59.00 |
| Cu | | 32.02 | 6.64 | 55.96 | 21.33 |
| Ni | | 32.22 | 2.99 | 39.43 | 26.72 |
| Pb | | 32.62 | 9.54 | 69.00 | 21.60 |
| Zn | | 95.19 | 25.97 | 186.20 | 63.80 |
| C区 (24个样品) | | As | 12.83 | 1.24 | 14.66 |
| | Hg | 42.06 | 18.40 | 87.66 | 14.06 |
| | Cd | 0.2613 | 6271.17 | 0.4554 | 0.1262 |
| | Cr | 71.05 | 3.42 | 75.30 | 62.00 |
| | Cu | 24.03 | 2.77 | 29.44 | 17.98 |
| | Ni | 28.51 | 2.44 | 31.79 | 20.77 |
| | Pb | 23.58 | 1.96 | 26.90 | 20.30 |
| | Zn | 66.45 | 8.82 | 87.60 | 45.50 |
| | D区 (30个样品) | As | 13.01 | 0.90 | 15.71 |
| Hg | | 24.56 | 6.25 | 43.00 | 13.02 |
| Cd | | 0.2013 | 40.4600 | 298.9100 | 133.3900 |
| Cr | | 73.64 | 1.80 | 79.10 | 70.60 |
| Cu | | 23.03 | 1.32 | 26.44 | 19.35 |
| Ni | | 29.77 | 1.73 | 33.44 | 26.13 |
| Pb | | 22.54 | 1.35 | 25.10 | 20.00 |
| Zn | | 62.75 | 3.14 | 71.60 | 58.30 |

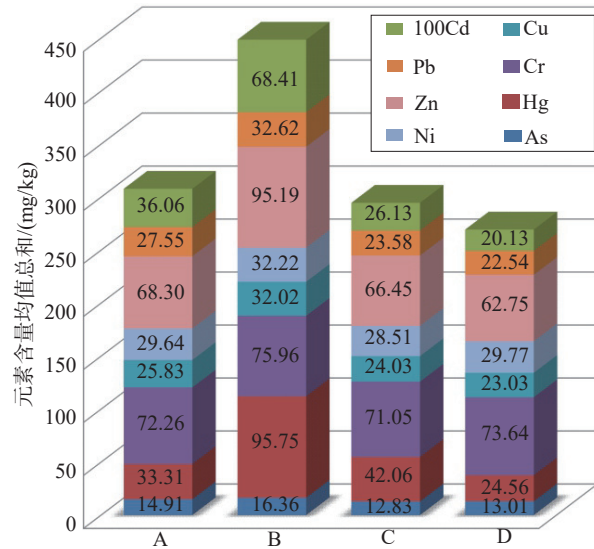


图 3 调查区各分区重金属平均含量三维直方图
A—黄河北岸黄土沟壑区; B—黄河北岸冲洪积平原区; C—黄河南岸冲洪积平原区; D—黄河南岸黄土沟壑区

Fig.3 3D histogram of average heavy metal content in the subarea of the study area
A —Loess gully area on the north bank of the Yellow River; B—Alluvial plain on the north bank of the Yellow River; C—Alluvial plain on the south bank of the Yellow River; D—Loess gully region on the south bank of the Yellow River

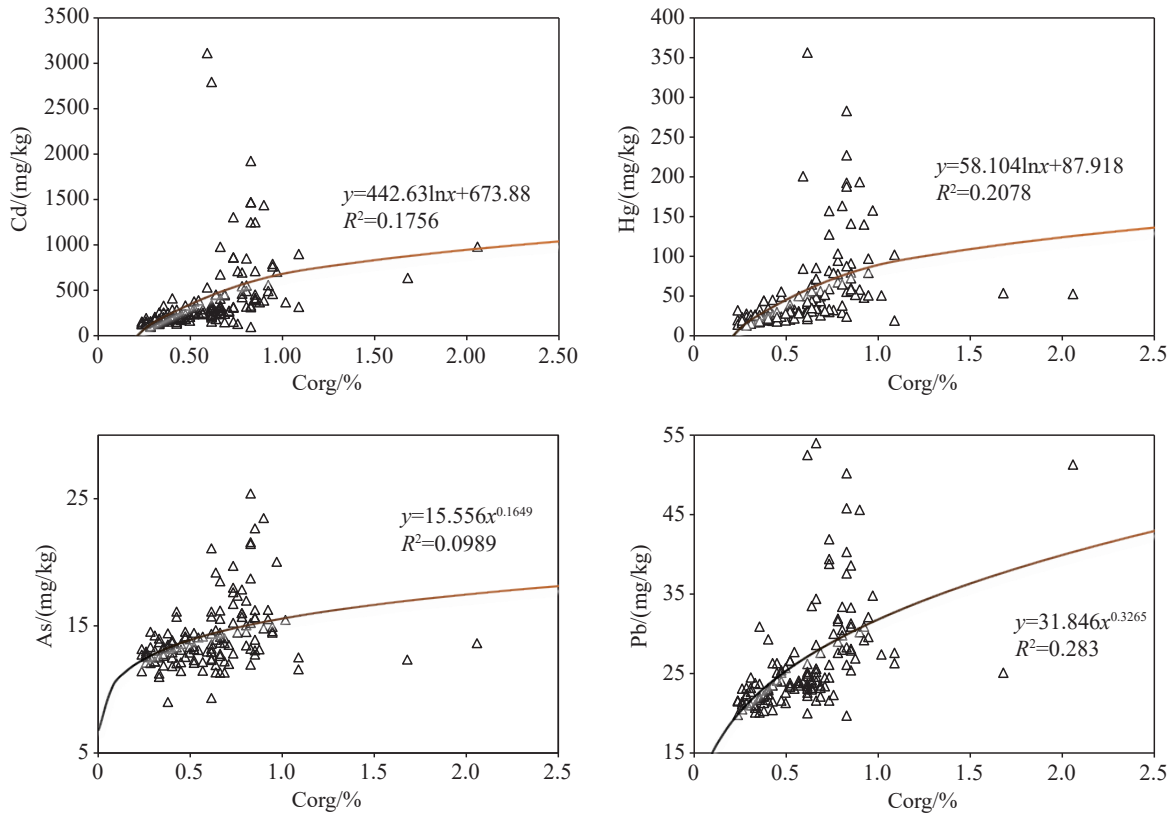


图4 Cd、Hg、As、Pb与Corg相关关系

Fig.4 Correlation between Cd, Hg, As, Pb and Corg

康风险评价方法等。同时,在确定环境地球化学基线中还有标准化方法、相关分析法、模糊综合评价法和改性灰色聚类法等。这些方法评价重点各异,适用条件不同,迄今为止尚没有成熟的方法和统一的标准,因此有必要采用多种方法进行综合评价,以便互相补充和借鉴,使评价结果更符合实际情况(张江华等, 2010; 周亚龙等, 2019)。本次选取单因子指数法、内梅罗综合指数法、地积累指数和潜在生态风险法分别作为土壤重金属污染评价方法。

3.3.1 单因子指数法和内梅罗综合指数法

为全面了解各种污染物对耕地土壤环境的贡献,突出高质量分数污染物对土壤环境的影响,选取单因子指数法(1)和内梅罗污染指数法(2)对土壤中的重金属进行综合评价,其计算公式为:

$$P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

$$P_z = \sqrt{\frac{\bar{P}_n^2 + P_{n\max}^2}{2}} \quad (2)$$

式中, P_i 为单因子污染指数, C_i 为土壤中重金

属 i 指标的实测浓度, S_i 为污染物 i 在《土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15168—2018)中给出的筛选值; P_z 为某点的内梅罗综合指数, \bar{P}_n 为单因子污染指数的平均值, $P_{n\max}$ 为单因子污染指数的最大值。依据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)和《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004)将单因子污染指数 P_i 和内梅罗综合污染指数 P_z 分别划分为 5 个等级(表 5)。

3.3.2 地积累指数法和潜在生态风险指数法

地积累指数(Index of Geo-accumulation, I_{geo})是 20 世纪 70 年代晚期在欧洲发展起来的,被广泛应用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,尤其用于研究现代沉积物中重金属污染的评价(弓晓峰等, 2006; 万金保等, 2008; 张江华等, 2010; 管后春等, 2013)。评价重金属污染,除必须考虑到人为污染因素和环境地球化学背景值外,还应考虑到由于自然成岩作用可能引起背景值变动的因素(管后春等, 2013)。本次研究采用数理统计法计算得出的数值作为各元素的背景值。根据 I_{geo} 的计算结

表 5 土壤重金属环境质量等级划分及其表达
Table 5 Classification and expression of heavy metal environment quality in soil

| 指标 | 一等 | 二等 | 三等 | 四等 | 五等 |
|---------------|----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 单因子污染 指数描述 | $P_i \leq 1$ 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 |
| 内梅罗综合 指数描述 | $P_z \leq 0.7$ 清洁 | $0.7 < P_z \leq 1$ 轻微污染 | $1 < P_z \leq 2$ 轻度污染 | $2 < P_z \leq 3$ 中度污染 | $P_z > 3$ 重度污染 |

果, 重金属污染程度可分为 7 等级(1~7 级), 污染程度从无污染到极强污染, 具体等级划分见表 6(张慧等, 2018)。其计算公式为:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (1.5 \times B_i)]$$

式中: I_{geo} 为地积累指数; C_i 为样品中元素 i 的实测值 (mg/kg); B_i 为地球化学背景值 (mg/kg); 1.5 为修正指数, 考虑到由于成岩作用可能会引起背景值的变动。

瑞典学者 Hakanson 于 1980 年提出了潜在生态危害指数法 (Risk Index, RI), 此方法侧重于多元素的协同作用, 同时考虑到了各重金属元素的毒性, 通过与研究区域土壤重金属背景值进行比较, 能够综合反映出研究区土壤中重金属对生态环境的潜在影响(徐万玲等, 2014)。该方法利用沉积物中重金属相对于工业化以前沉积物的最高背景值的比值及重金属的生物毒性系数进行加权求和得到生态危害指数, 此方法在国际上被广泛采用, 也是目前国内学者多采用的方法(徐争启等, 2008; 贺志鹏等, 2008; 孙超等, 2009)。潜在生态危害指数 RI 的计算方法如下:

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_s^i / C_n^i \quad (5)$$

式中: RI 为多元素环境风险综合指数; E_r^i 为第 i 种重金属环境风险指数; C_f^i 为重金属 i 相对参比值的污染系数; C_s^i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值(采用背景值); T_r^i 为重金属 i 毒性响应系数, 它主要反映重金属毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度。金属的毒性系数包含两方面的信息, 一是金属对人体的危害和金属对水生生态系统的危害。本次采用徐争启等(2008)和 Hakanson(1980)的毒性系数值。分别为: Cr=2、Zn=1、Pb=5、Cu=5、Ni=5、As=10、Cd=30、Hg=40。潜在生态风险系数(E_r^i)描述某一污染物(元素)的污染程度, 从低到高分 5 个等级; 而潜在生态危害指数(RI)描述某一点多个污染物潜在生态危害系数的综合值, 此值分为 4 个等级, 见表 6。

3.4 单因子指数法和内梅罗综合指数法评价结果及分析

单因子指数法统计结果显示: Cr、Zn、Pb、Cu、Ni、Hg 这 6 种重金属单因子指数均小于 1, 显示无相关重金属污染。土壤污染主要为 Cd、As 的污染, P_{Cd} 介于 0.12~3.891, 均值为 0.523; P_{As} 介于 0.45~3.68, 均值为 0.731。 P_{Cd} 显示 89.21% 的土壤为一等清洁, 8.63% 为二等轻微污染, 0.72% 为三等轻度污染, 1.44% 为四等中度污染。 P_{As} 显示 94.24% 土壤为一等清洁, 5.04% 为二等轻微污染, 0.72% 为四等中度污染。内梅罗综合指数 P_z 介于 0.339~2.869, 均值为 0.603, 其中 P_z 显示 85.61% 的土壤为清洁, 7.91% 为轻微污染, 5.04% 为轻度污染, 1.44% 为中度污染(表 7)。

3.5 地积累指数和潜在生态风险评价结果及分析

由地积累指数法评价结果(表 8)可以看出: 研究区内 Hg、Cd 污染程度最高, 其中 Hg 元素无污染到中度污染样本数为 37 个, 中度污染样本 11 个, 中度污染到强污染 4 个, 分别占总样本数的 26.62%、

表 6 地积累指数和潜在生态风险评价等级划分及其表达

Table 6 Classification standards of geo-accumulation index

| 指标 | 一等 | 二等 | 三等 | 四等 | 五等 | 六等 | 七等 |
|------------------|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| 地积累指数 描述 | $I_{geo} < 0$ 无污染 | $0 \leq I_{geo} < 1$ 无污染到中度污染 | $1 \leq I_{geo} < 2$ 中度污染 | $2 \leq I_{geo} < 3$ 中度污染到强污染 | $3 \leq I_{geo} < 4$ 强污染 | $4 \leq I_{geo} < 5$ 强污染到极强污染 | $I_{geo} \geq 5$ 极强污染 |
| 单项潜在生态风险系数 描述 | $E_r^i < 40$ 低潜在风险 | $40 \leq E_r^i < 80$ 中潜在风险 | $80 \leq E_r^i < 160$ 较高潜在风险 | $160 \leq E_r^i < 320$ 很高潜在风险 | $E_r^i \geq 320$ 极高潜在风险 | | |
| 潜在生态风险指数 描述 | $RI < 150$ 低潜在风险 | $150 \leq RI < 300$ 中潜在风险 | $300 \leq RI < 600$ 较高潜在风险 | $RI \geq 600$ 很高潜在风险 | | | |

表 7 研究区土壤重金属元素单因子污染指数和内梅罗指数法评价等级样品数占比统计

Table 7 Proportion of samples evaluated by single factor pollution index and Nemerow index method in the soil of the investigated area

| 评价指标 | 一等 | 二等 | 三等 | 四等 | 五等 |
|-----------|----------------------|----------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|
| 单因子污染指数描述 | $P_i \leq 1$ 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 |
| Cd | 89.21% | 8.63% | 0.72% | 1.44% | 0 |
| As | 94.24% | 5.04% | 0 | 0.72% | 0 |
| 内梅罗综合指数描述 | $P_z \leq 0.7$ 清洁 | $0.7 < P_z \leq 1$ 轻微污染 | $1 < P_z \leq 2$ 轻度污染 | $2 < P_z \leq 3$ 中度污染 | $P_z > 3$ 重度污染 |
| P_z | 85.61% | 7.91% | 5.04% | 1.44% | |

7.91% 和 2.88%; Cd 元素无污染到中度污染样本数为 27 个, 中度污染样本 12 个, 中度污染到强污染 3 个, 分别占总样本数的 19.42%、8.63%和 2.16%; 元素 Cd、Hg 的污染样本位置见图 5, 污染点主要位于黄河北岸, 位于村庄密集区, 在东大沟河与黄

河交汇处, 污染程度最强。Pb 和 As 元素各有一个中度污染点。Zn、Cu、Ni 元素少量处于无污染至中度污染范围, Cr 元素最为安全, 均处于无污染范围内。

通过潜在生态风险评价方法, 得出了研究区内 Cr、Zn、Pb、Cu、Ni、As、Cd、Hg 8 种元素的潜在生态风险系数(E_r)及潜在生态风险指数(RI)。结果(表 9)显示, Cr、Zn、Pb、Ni 4 种元素潜在生态风险系数均较小, 均属于低潜在风险。As 潜在生态风险系数介于 6.17~50.39, 其中介于 40~80 的点有 1 个, 属于中潜在风险, 其余均小于 40, 属于低潜在风险。Cd 潜在生态风险系数变化较大, 其中介于 40~80 的点有 14 个, 占样本数量的 10.07%, 属于中潜在风险, 介于 80~160 的点有 7 个, 占样本数量的 5.04%, 属于较高潜在风险, 介于 160~320 的有 2 个, 属于很高潜在风险; Hg 潜在生态风险系数介

表 8 调查区土壤重金属元素地累积指数法评价等级样品数占比统计 (%)

Table 8 Statistics on the number of samples of geochemical grade evaluation of heavy metal elements in the study area (%)

| 评价 | 指标 | 一等 | 二等 | 三等 | 四等 | 五等 | 六等 | 七等 |
|----|-----------|---------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|
| | I_{geo} | $I_{geo} < 0$ | $0 \leq I_{geo} < 1$ | $1 \leq I_{geo} < 2$ | $2 \leq I_{geo} < 3$ | $3 \leq I_{geo} < 4$ | $4 \leq I_{geo} < 5$ | $I_{geo} \geq 5$ |
| | 描述 | 无污染 | 无污染到中度污染 | 中度污染 | 中度污染到强污染 | 强污染 | 强污染到极强污染 | 极强污染 |
| 地 | As | 94.96 | 4.32 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 累 | Hg | 62.59 | 26.62 | 7.91 | 2.88 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 积 | Cd | 69.78 | 19.42 | 8.63 | 2.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 指 | Cr | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 数 | Cu | 92.09 | 7.91 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 法 | Ni | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Pb | 89.93 | 9.35 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Zn | 89.93 | 10.07 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

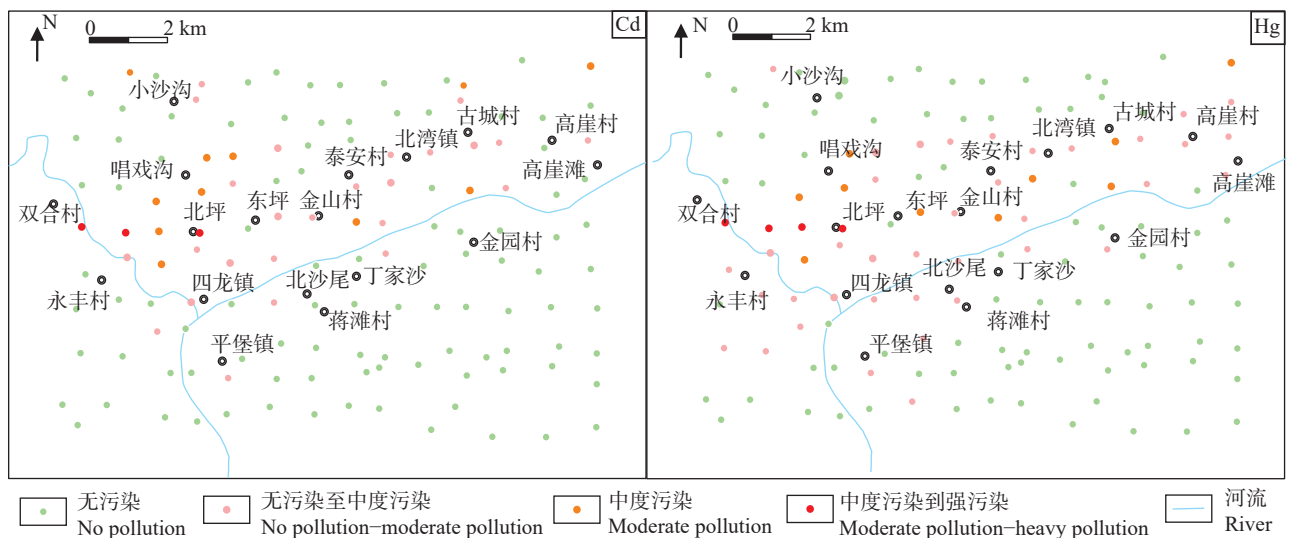


图 5 地累积指数法 Cd 和 Hg 元素污染程度分布图
Fig.5 Distribution map of Cd and Hg element pollution by geocumulative index method

表 9 调查区土壤重金属元素潜在生态风险法评价等级样品数占比统计 (%)

Table 9 Statistics on the number of samples of geochemical grade evaluation of heavy metal elements in the study area (%)

| 评价 | 指标 | 一等 | 二等 | 三等 | 四等 | 五等 |
|------------|---------|--------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------|
| | E_r^i | $E_r^i < 40$ | $40 \leq E_r^i < 80$ | $80 \leq E_r^i < 160$ | $160 \leq E_r^i < 320$ | $E_r^i \geq 320$ |
| | 描述 | 低潜在风险 | 中潜在风险 | 较高潜在风险 | 很高潜在风险 | 极高潜在风险 |
| 单项潜在生态风险系数 | As | 99.28 | 0.72 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Cd | 70.50 | 20.14 | 7.19 | 2.16 | 0.00 |
| | Cr | 83.45 | 10.07 | 5.04 | 1.44 | 0.00 |
| | Cu | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Hg | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Ni | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Pb | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Zn | 100.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 潜在生态风险指数 | RI | $RI < 150$ | $150 \leq RI < 300$ | $300 \leq RI < 600$ | $RI \geq 600$ | |
| | 描述 | 低潜在风险 | 中潜在风险 | 较高潜在风险 | 很高潜在风险 | |
| | RI | 86.33 | 10.79 | 2.88 | | |

于 9.59~262.44, 其中介于 40~80 的点有 28 个, 占样本数量的 20.14%, 属于中潜在风险, 介于 80~160 的点有 10 个, 占样本数量 7.19%, 属于较高潜在风险, 介于 160~320 的有 3 个, 属于很高潜在风险。因此, 研究区主要污染为 Hg、Cd 污染, 应加强对 Hg、Cd 污染的监控治理。潜在生态风险指数计算结果, 显示 RI 介于 43.62~504.43, 小于 150 的有 120 个, 属于低潜在风险, 150~300 有 15 个, 占样本数量的 10.79%, 属于中潜在风险, 300~600 有 4 个, 属于较高潜在风险, 具体位置见图 6。由图 6 可以看出黄河以南均为低潜在风险, 中潜在分析均位于黄河北岸, 较高潜在风险位于东大沟河至北坪村。

4 生态风险评价

甘肃省白银地区土壤重金属污染监测、大气污染监测、水污染监测等研究开始时间较早, 已有报道表明, 自 1987 年起甘肃省白银市就对东大沟流域的土壤、农作物开始监测研究(宗子就, 1987)。多年以来, 不同学者针对白银地区重金属对土壤和作物的影响做了大量的调查研究, 主要表现在以下几个方面: 一是当地土壤和农作物中重金属的污染情况与分布变化特征的研究(孙成胜等, 2014; 王婷和倪鼎文, 2015; 倪鼎文等, 2015; 马廷民等, 2015; 李有文等, 2017; 张钊熔等, 2019), 白银区重金属污染水平和对人体健康评价(刘白林等, 2014; 蔡小冬等, 2014), 土壤和作物中重金属的相互影响(雷思维等, 2007; 李有文等, 2015; 郭远新等, 2019; 张嘉冕, 2020; 陈伟和王婷, 2020)及重金属的来源、迁移过程研究等(李小虎等, 2008; 张祥年等, 2010; 赵保卫和王刚, 2010; 田庆春等, 2012)。本次采用了地积累指数评价方法和潜在生态风险评价方法, 两种方法得出的结果趋于一致, 都显示 Cd、Hg 为研究区的主要风险指标。其余的几种重金属元素生态风险相对较低。元素 Hg、Cd 为土壤潜在生态风险指数(RI)的主要贡献者。本次取样重金属含量相对较高的耕地主要位于黄河北岸靠近东大沟河附近, 黄河南岸重金属含量相对较低。为了确定污染源及查明东大沟河水体和底泥重金属含量现状, 2017 年对东大沟河进行了水体和底泥样品的分析, 由分析结果(表 10, 表 11)可以看出, 东大沟河水体中 Cu、Pb、Zn、Cd 4 种重金属含量明显偏高, 分别

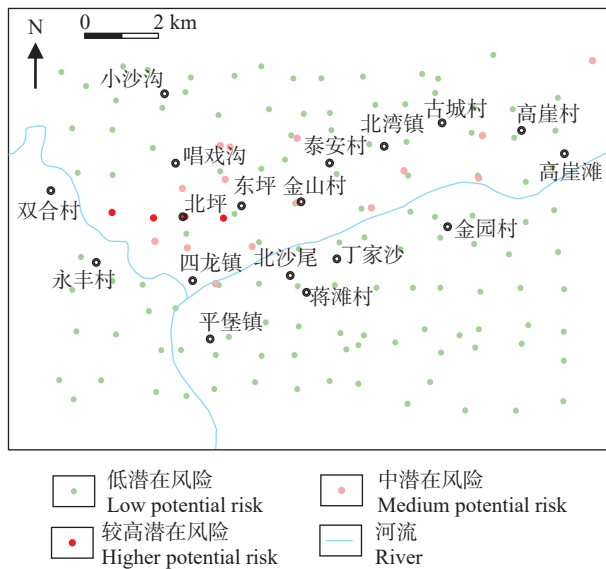


图 6 潜在生态风险评价法污染程度(RI)分布图
Fig.6 Distribution map of pollution degree (RI) of potential ecological risk assessment method

表 10 水体中重金属含量统计特征

Table 10 Statistical characteristics of the heavy metal contents in the water samples

| 元素 | 最大值/ (mg/L) | 平均值/ (mg/L) | 标准差 | 变异系数 | 地表水环境 IV级标准/(mg/L) |
|----|----------------|----------------|--------|------|-----------------------|
| Cu | 30.63 | 4.796 | 10.55 | 2.20 | 1 |
| Pb | 1.019 | 0.1759 | 0.28 | 1.61 | 0.05 |
| Zn | 77.35 | 13.34 | 25.25 | 1.89 | 2 |
| Cd | 0.8633 | 0.2164 | 0.27 | 1.23 | 0.005 |
| As | 0.152 | 0.048 | 0.05 | 1.12 | 0.1 |
| Hg | 0.00279 | 0.00057 | 0.0009 | 1.49 | 0.001 |

表 11 底泥中重金属含量统计特征

Table 11 Statistical characteristics of the heavy metal contents in the sediments

| 元素 | 最大值/ 10^{-6} | 平均值/ 10^{-6} | 标准差 | 变异系数 | 甘肃省土壤 背景值/ 10^{-6} |
|----|----------------|----------------|--------|------|-------------------------|
| Cr | 80.1 | 61.6 | 10.6 | 0.2 | 70.2 |
| Zn | 13800 | 5999.3 | 4417.7 | 0.7 | 68.5 |
| Pb | 15900 | 4819.5 | 5387.4 | 1.1 | 18.8 |
| Cu | 8449.8 | 1795.6 | 2282.6 | 1.3 | 24.1 |
| Cd | 2908 | 502.816 | 832.31 | 1.7 | 0.116 |
| Hg | 476.6 | 65.07 | 129.15 | 2 | 0.02 |

是地表水环境质量(IV)级标准的 4.8、3.5、6.7、43.3 倍。底泥中重金属 Zn、Pb、Cu、Cd、Hg 含量分别是甘肃省土壤背景值的 87.6 倍、256.4 倍、74.5 倍、4334.6 倍、3253.5 倍。这也说明东大沟河及两岸受重金属污染最为严重,应注意继续监测其生态风险。

土壤重金属可以经过多种渠道到达人体,如口腔摄入、鼻腔呼吸、皮肤接触和食物链途径(刘白林, 2017)等。食物链途径是指农田土壤中的重金属元素通过人体取食受污染农产品而进入机体,这种方式造成的健康风险始终比经由口腔摄取、鼻腔吸入和皮肤接触农田土壤而产生的风险高得多。刘白林(2017)研究发现研究区受农田土壤重金属污染的影响,春小麦籽粒中 Cd、Pb、Zn 3 种元素的平均浓度分别是相关国家标准(GB 2762—2012)所规定最大允许浓度值的 18.80 倍、3.65 倍和 1.53 倍。与此同时,玉米籽粒中 Cd 和 Cr 的平均浓度分别超《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762—2012)中规定限值的 140% 和 50%。研究区春小麦籽粒中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 含量明显高于玉米籽粒和水稻籽粒,各元素平均浓度未超过相关国际中规定的限值,表明其处于相对安全的状态。但由于水稻主要种植于黄河两岸,受东大沟河污染较小,东大沟河两侧几乎无水稻种植,因此不

能判定,整个地区种植水稻无风险,尤其需要考虑土壤受污染程度及种植区域。由于东大沟河两侧受污染土壤区的春小麦籽粒中重金属 Cd、Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 含量明显高于玉米籽粒,因此,种植玉米理论上可以降低重金属污染对人体的危害程度。这也与近几年东大沟河两侧以种植玉米为主和引黄灌溉的措施相一致。

5 结 论

(1)采用单因子指数法、内梅罗指数法、地积累指数法和潜在生态危害指数法对区内表层土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 8 种污染进行了分析和评价;单因子指数法统计结果显示研究区土壤污染主要为 Cd、As 的污染。内梅罗综合指数 P_2 介于 0.339~2.869,均值为 0.603, P_2 显示 85.61% 的土壤为清洁,7.91% 为轻微污染,5.04% 为轻度污染,1.44% 为中度污染。地积累指数法结果显示研究区土壤重金属污染总体处于 0~2 级,以 Cd、Hg、As、Pb 污染为主。潜在生态危害指数法结果显示,研究区污染以 Cd、Hg 污染为主。Cd 潜在生态风险最大。潜在生态危害综合指数平均值为 211.80,表明该地区土壤总体处于中等危害程度。

(2)通过研究区主要污染重金属元素 Cd、Hg、As、Pb 与土壤中有机质的相关性分析,发现 4 种重金属元素与有机质含量之间具有正相关的关系,尤以 Cd、Hg、Pb 最为明显。有机质含量在 0 至 0.5 之间相关性最为明显,通常有机质含量越高,重金属含量越高,有机质含量在 0.5~1.0,相关性明显减弱,但这时重金属含量出现较多的高离散值。

(3)研究区土壤重金属污染范围主要为黄河北岸区,黄河南岸相对较为安全。污染程度最高的区域位于东大沟河与黄河交汇处的耕地区,主要是由于东大沟河上游早期污水灌溉及城镇区域日常生活所致,如农业施肥、污水灌溉、工厂排污、燃煤排放等。随着引黄灌溉及矿山环境治理等措施,生态风险程度有所降低,但仍应加强后期重金属污染监测与生态治理。

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).
- 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).
- Cai Xiaodong, Sun Chengsheng, Cai Liqun. 2014. Study on evaluation and spatial distribution characteristics of heavy metal pollution in arable layer soil of Baiyin district[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 30(32): 194–200 (in Chinese with English abstract).
- Chen Wei, Wang Ting. 2020. Speciation features and health risk assessment of Cd in soil–wheat system in Baiyin sewage irrigation area in China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 34(4): 878–886 (in Chinese with English abstract).
- Chen Zhenyu, Zhao Yuanyi, Chen Danli, Huang Haitao, Zhao Yu, Wu Yujing. 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.
- China Environmental Monitoring Station. 1990. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1–501(in Chinese)
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Niu Yanbin, Li Suimin, Song Zefeng. 2011. An assessment of the heavy metal pollution and potential ecological hazards in urban soil of Tangshan City[J]. *Geology in China*, 38(5): 1379–1386 (in Chinese with English abstract).
- Cui Xingtao, Luan Wenlou, Song Zefeng, Ma Yunchao. 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).
- Dai Jierui, Pang Xugui, Song Jianhua, Dong Jian, Hu Xueping, Li Xiaopeng. 2018. A study of geochemical characteristics and ecological risk of elements in soil of urban and suburban areas of Zibo City, Shandong Province[J]. *Geology in China*, 45(3): 617–627 (in Chinese with English abstract)
- Dong Qiuyao, Wen Haotian, Wang Pan, Song Chao, Lai Shuya, Yang Zhenjing, Zhao Yuanyi, Yan Mingjiang. 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(4): 567–579.
- Gong Xiaofeng, Chen Chunli, Zhou Wenbin, Jian Minfei, Zhang Zhenhui. 2006. Assessment on heavy metal pollution in the sediment of Poyang lake[J]. *Environmental Science*, 27(4): 732–736 (in Chinese with English abstract).
- Guan Honchun, Li Yunhuai, Peng Miaozi, Liu Daobin. 2013. The evaluation of heavy metal pollution and its potential ecological risk of urban topsoil in Huangshan city[J]. *Geology in China*, 40(6): 1949–1958 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yuanxin, Wang Fang, Zhang Zhaorong, Hei Huan, Duan Xingxing. 2019. Investigation on soil corn pollution in Silongtown, Baiyincity, Gansu Province[J]. *West-China Exploration Engineering*, 31(5): 162–164 (in Chinese).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 14: 975–1001.
- He Zhipeng, Song Jinming, Zhang Naixing, Xu Yayan, Zheng Guoxia, Zhang Peng. 2008. Variation characteristics and controlling factors of heavy metals in the south Yellow sea surface seawater[J]. *Environmental Science*, 29(5): 1153–1162 (in Chinese with English abstract).
- Lei Siwei, Wu Guozhen, Wang Xingfeng. 2017. Investigation and analysis of heavy metal distribution patterns in soil and spring wheat in Baiyindistrict[J]. *Gansu Metallurgy*, 29(4): 86–88 (in Chinese).
- Li Xiangmin, Ma Zhongping, Sun Jiming, Yu Jiyuan. 2009. A LA–ICP–MS chronological study of basic volcanics in Baiyin ore–field, Gansu, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 28(7): 901–906 (in Chinese with English abstract).
- Li Xiaohu, Tang Zhongli, Chu Fengyou. 2008. Analysis on speciation and transportation of heavy metals in water and sediment in Baiyin mine[J]. *Earth and Environment*, 36(3): 218–224 (in Chinese with English abstract).
- Li Youwen, Cao Chun, Ju Tianzhen, Zhao Xutao, Mou Ruiqiang, Liu Siqi, Du Mingzhuo. 2015. Heavy metal pollution characteristics and ecological risk assessment of different vegetable soils of Baiyin, Gansu, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 34(11): 3205–3213 (in Chinese with English abstract).
- Li Youwen, Wang Jing, Ju Tianzhen, Wang Li, Lin Ning, Zhang Shengnan, Zha Xianghao. 2017. Heavy metal pollution characteristics and human health risk assessment in soils from different functional areas of Baiyin, Gansu, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 36(5): 1408–1418 (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 Bailin, Ma Xinwang, Zhu Saiyang, Ai Shiwei, Zhang Wenya, Zhang Yingmei. 2014. Speciations and risk assessment of heavy metals in different layers of lands irrigated by the Yellow river in Baiyin[J]. *Journal of Lanzhou University(natural sciences)*, 50(3): 431–436 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bailin. 2017. Heavy Metal Contamination in Farmland Soils and Its Transfer in the Soil–Crop–Human System within the Dongdagou Watershed, Baiyin, Gansu[D]. Lanzhou: Lanzhou University(in Chinese with English abstract).
- Liu Ruiping, Xu Youning, Zhang Jianghua, Wang Wenke, 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: 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).
- Ma Tingmin, Gao Jianfeng, Wang Chengkui, Shui Qingchuan, Zhang Chunxia, Chen Jing. 2015. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment of surface soil in Dongdagou sewage irrigation area of Baiyincity[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, (15): 215–217 (in Chinese).
- Ni Dingwen, Nan Hai, Wang Ting. 2015. Current situation and source analysis of soil heavy metal pollution in Baiyin city[J]. *Gansu Agricultural Science and Technology*, (8): 67–70 (in Chinese).
- Sun Chao, Chen Zhenlou, Bi Chunjuan, Liu Yaolong, Zhang Cui, Wang Dongqi, Shi Guitao, Ye Mingwu. 2009. Evaluation on environmental quality of heavy metals in agricultural soils of Chongming island, Shanghai[J]. *Acta Geographica Sinica*, 64(5): 619–628 (in Chinese with English abstract).
- Sun Chengsheng, Cai Xiaodong, Zhang Renzhi, Cai Liqun. 2014. GIS-based spatial variability and pollution evaluation studies of heavy metal in arable layer of Baiyin district[J]. *Arid land geography*, 37(4): 750–758 (in Chinese with English abstract).
- Tian Qingchun, Yang Taibao, Shi Peihong, Zeng Chaosheng, Wang Taixiang. 2012. Analysis of heavy metal sources and measures for preventing and controlling them in Baiyin city[J]. *Environment Monitoring in China*, 28(6): 40–45 (in Chinese with English abstract).
- Wan Jinbao, Wang Jianyong, Wu Dan. 2008. Current assessment on heavy metal pollution in the sediment of Le'an river[J]. *Environmental Science and Technology*, 31(11): 130–133 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fangting, Bao Ke, Huang Changsheng, Liu Ruiping, Han Wenjing, Yi Chengyun, Li Long, Zhou Yun. 2022. Distribution, characteristics, and research status of microplastics in the trunk stream and main lakes of the Yangtze River: A review[J]. *China Geology*, 5: 171–184.
- Wang Ting, Ni Dingwen. 2015. Research advances on Cd pollution in farmland soil in Baiyin district[J]. *Gansu Agriculture Science and Technology*, (9): 80–84 (in Chinese with English abstract).
- Wei Jikang, Yu Xiaoxia, Wang Baoxin, Wang Gang. 2021. The speciation, bioavailability and influence factors of soil heavy metals in typical areas along the eastern coast of Zhejiang[J]. *Environmental Pollution and Control*, 43(10): 1231–1237 (in Chinese with English abstract).
- Xu Wanling, Wang Yuting, Li Huijie, Zhu Weihong. 2014. Research on environmental quality and ecological risk assessment of heavy metals for soil in ginseng plantation of Changbai Mountain area— A case study of Dunhua city[J]. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 40(1): 89–94 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhengqi, Ni Shijun, TuoXianguo, Zhang Chengjiang. 2008. Calculation of heavy metals' Toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science and Technology*, 31(2): 112–115 (in Chinese with English abstract).
- Yan Mingcai, Gu Tiexin, Chi Qinghua, Wang Chunshu. 1997. abundance of chemical elements of soils in China and super genesis geochemistry characteristics[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 21(3): 161–167 (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 Area[J]. *Geology in China*, 49(3): 979–992 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hui, Ma Xinpeng, Su Hang, Sui Hongjun Shi Xiaolei, Li Xinyang, Yang Huan, Zheng Zhizhi. 2018. Soil heavy metal background values and pollution degree in southern Songnen Plain of Heilongjiang Province[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 36(6): 230–236 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jiamian. 2020. Characteristics of selenium enrichment and heavy metal pollution in Baiyin city[J]. *Gansu Science and Technology*, 36(18): 35–37 (in Chinese).
- Zhang Jianghua, Zhao Aning, Wang Zhongfu, Ke Hailing, Chen Huaqing. 2010. Discussion on the differences of heavy metals contamination in soil assessment with Nemerou index and Geo-accumulation index with Xiaoqingling gold belt as example[J]. *Gold*, 31(8): 43–46 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiangnian, Xin Cunlin, Li Chunliang. 2010. Geochemical characteristics of heavy metal's contamination and its surface geochemical mechanism in Baiyin City, Gansu Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 29(4): 124–131 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaorong, Duan Xingxing, Xia Minzhe. 2019. Contamination situation and evaluation of heavy metal pollution in water and sediments of Dongdagou area, Baiyin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(3): 649–657 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Baowei, Wang Gang. 2010. Preliminary investigation and assessment of farmland soils contaminated by heavy metal around Baiyin City[J]. *Environmental Science and Technology*, 33(11): 79–81 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Yalong, Guo Zhijuan, Wang Chengwen, Chen Jie, Peng Min, Cheng Hangxin. 2019. Assessment of heavy metal pollution and potential ecological risks of soils in Zhenxiong County, Yunnan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 43(6): 1358–1366 (in Chinese with English abstract).
- Zong Zijiu. 1987. Research on the atmospheric diffusion law and pollution control strategies in Baiyinregion[J]. *Environmental Engineering*, (5): 56–62 (in Chinese).

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.
- 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.
- 蔡小冬, 孙成胜, 蔡立群. 2014. 基于改进 AHP 与 GIS 的白银区耕地土壤重金属污染评价[J]. 中国农学通报, 30(32): 194-200.
- 陈伟, 王婷. 2020. 白银市污灌区土壤-小麦系统镉赋存特征及其健康风险评价[J]. 核农学报, 34(4): 878-886.
- 崔邢涛, 栾文楼, 牛彦斌, 李随民, 宋泽峰. 2011. 唐山城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 中国地质, 38(5): 1379-1386.
- 崔邢涛, 栾文楼, 宋泽峰, 马云超. 2016. 石家庄市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.
- 代杰瑞, 庞绪贵, 宋建华, 董建, 胡雪平, 李肖鹏. 2018. 山东淄博城市和近郊土壤元素地球化学特征及生态风险研究[J]. 中国地质, 45(3): 617-627.
- 弓晓峰, 陈春丽, 周文斌, 简敏菲, 张振辉. 2006. 鄱阳湖底泥中重金属污染现状评价[J]. 环境科学, 27(4): 732-736.
- 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其潜在生态风险评价[J]. 中国地质, 40(6): 1949-1958.
- 郭远新, 王芳, 张钊熔, 黑欢, 段星星. 2019. 甘肃省白银市四龙镇土壤——玉米污染情况调查[J]. 西部探矿工程, 31(5): 162-164.
- 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 徐亚岩, 郑国侠, 张蓬. 2008. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. 环境科学, 29(5): 1153-1162.
- 雷思维, 吴国振, 王兴峰. 2007. 白银区土壤和春小麦中重金属分布规律调查分析[J]. 甘肃冶金, (4): 86-88.
- 李向民, 马中平, 孙吉明, 余吉远. 2009. 甘肃白银矿田基性火山岩的 LA-ICP-MS 同位素年代学[J]. 地质通报, 28(7): 901-906.
- 李小虎, 汤中立, 初凤友. 2008. 白银矿山水体和沉积物中重金属及其化学形态分布特征[J]. 地球与环境, 36(3): 218-224.
- 李有文, 曹春, 巨天珍, 赵旭涛, 牟瑞强, 刘思琪, 杜名倬. 2015. 白银市不同区域蔬菜地土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 生态学杂志, 34(11): 3205-3213.
- 李有文, 王晶, 巨天珍, 王莉, 林宁, 张胜楠, 查向浩. 2017. 白银市不同功能区土壤重金属污染特征及其健康风险评价[J]. 生态学杂志, 36(5): 1408-1418.
- 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价[J]. 中国地质, 48(3): 749-763.
- 刘白林, 马新旺, 朱赛勇, 艾世伟, 张文雅, 张迎梅. 2014. 白银黄灌农业区不同土层重金属赋存形态及其风险评价[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 50(3): 431-436.
- 刘白林. 2017. 甘肃白银东大沟流域农田土壤重金属污染现状及其在土壤-作物-人体系统中的迁移转化规律[D]. 兰州: 兰州大学.
- 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.
- 马廷民, 高建峰, 王承魁, 水清川, 张春霞, 陈静. 2015. 白银市东大沟污灌区表层土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 现代农业科技, (15): 215-217.
- 倪鼎文, 南海, 王婷. 2015. 白银市土壤重金属污染现状及来源分析[J]. 甘肃农业科技, (8): 67-70.
- 孙超, 陈振楼, 毕春娟, 刘耀龙, 张翠, 王东启, 史贵涛, 叶明武. 2009. 上海市崇明岛农田土壤重金属的环境质量评价[J]. 地理学报, 64(5): 619-628.
- 孙成胜, 蔡小冬, 张仁陟, 蔡立群. 2014. 基于 GIS 的白银区耕地耕地土壤重金属空间分异及污染评价[J]. 干旱区地理, 37(4): 750-758.
- 田庆春, 杨太保, 石培宏, 曾潮生, 王泰祥. 2012. 白银市土壤重金属污染源分析及防治措施[J]. 中国环境监测, 28(6): 40-45.
- 万金保, 王建永, 吴丹. 2008. 乐安河沉积物重金属污染现状评价[J]. 环境科学与技术, 31(11): 130-133.
- 王婷, 倪鼎文. 2015. 白银区农田土壤 Cd 污染研究概述[J]. 甘肃农业科技, (9): 80-84.
- 韦继康, 余晓霞, 王保欣, 王刚. 2021. 浙江东部沿海典型地区土壤重金属赋存形态、生物有效性及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 43(10): 1231-1237.
- 徐万玲, 王钰婷, 李会杰, 朱卫红. 2014. 长白山地区园参地土壤环境质量及重金属潜在生态风险评价——以敦化市为例[J]. 延边大学学报(自然科学版), 40(1): 89-94.
- 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.
- 鄢奇才, 顾铁新, 迟清华, 王春书. 1997. 中国土壤化学元素丰度与表生地球化学特征[J]. 物探与化探, 21(3): 161-167.
- 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.
- 张慧, 马鑫鹏, 苏航, 隋虹均, 史晓磊, 李昕阳, 杨欢, 郑志志. 2018. 松嫩平原黑龙江省南部土壤重金属背景值及污染程度分析[J]. 干旱地区农业研究, 36(6): 230-236.
- 张嘉冕. 2020. 白银土壤富硒与重金属污染特征[J]. 甘肃科技, 36(18): 35-37.
- 张江华, 赵阿宁, 王仲复, 柯海玲, 陈华清. 2010. 内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异探讨——以小秦岭金矿带为例[J]. 黄金, 31(8): 43-46.
- 张祥年, 辛存林, 李春亮. 2010. 甘肃省白银市土壤重金属污染地球化学特征及其表生地球化学成因[J]. 地质科技情报, 29(4): 124-131.
- 张钊熔, 段星星, 夏明哲. 2019. 白银东大沟水体和底泥中重金属污染评价[J]. 物探与化探, 43(3): 649-657.
- 赵保卫, 王刚. 2010. 白银市郊区农田土壤重金属污染初步调查与评价[J]. 环境科学与技术, 33(11): 79-81.
- 中国环境监测总站主编. 1990. 中国土壤元素背景值[M]. 中国环境科学出版社.
- 周亚龙, 郭志娟, 王成文, 陈杰, 彭敏, 成杭新. 2019. 云南省镇雄县土壤重金属污染及潜在生态风险评估[J]. 物探与化探, 43(6): 1358-1366.
- 宗子就. 1987. 白银地区大气扩散规律及污染控制对策研究[J]. 环境工程, (5): 56-62.