

西宁市某工业园区土壤重金属污染特征、健康风险及源解析

吕荣久^{1a},袁二军^{1a},史立群²,彭红明²,丛殿阁^{1a},徐建东^{1b},查春雷^{1a},屈宏飞^{1a}

(1.青海大学 a.地质工程学院;b.省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,西宁 810016;

2.青海省环境地质勘查局 青海省地质环境保护与灾害防治工程技术研究中心;

青海九零六工程勘察设计院有限责任公司,西宁 810001)

摘要:为揭示某工业园区周边土壤重金属污染状况及来源,以该工业园区主干道及周边土壤为研究对象,系统采集研究区内19个土壤样本,分析土壤中Cr、Ni、Zn、As、Cd和Pb 6种重金属元素含量及其分布特征.使用单因子指数法、内梅罗综合指数法和地累积指数法对研究区的土壤重金属污染程度进行定量评价,同时采用潜在生态风险指数和健康风险评价对土壤重金属进行风险评价;采用相关性分析、聚类分析、主成分分析和绝对因子分析—多元线性回归(APCS-MLR)模型对研究区土壤重金属进行源解析.结果表明,6种重金属含量均超出青海省土壤背景值,Zn和As最大值大于农用地土壤污染风险筛选值,6种重金属均在研究区西南部富集.单因子指数评价结果显示Cd污染较为严重,内梅罗综合污染指数结果显示Zn为重度污染,地累积指数评价结果显示As、Cd为轻至中度污染.潜在生态风险指数评价结果表明Cd生态风险为中级,其余元素为低级;综合潜在生态风险为低级;健康风险评价结果表示研究区存在非致癌风险和致癌风险,且儿童的非致癌风险和致癌风险均高于成人.研究区土壤重金属的污染源有3种,分别为自然源(36.63%)、工业生产活动源(34.29%)和交通活动-农业活动的综合源(29.08%).

关键词:土壤重金属污染;工业园区;分布特征;污染评价;APCS-MLR模型;源解析

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:1000-2367(2026)02-0059-12

土壤中的重金属含量受自然条件和人为活动的影响,表现出明显的时间与空间差异.随着城镇化、工业化和农业集约化进程的加速,人类活动对土壤中重金属分布的影响日益显著,导致某些重金属在土壤中积累,引发严重的污染问题.特别是在城市工业区域,由于人类活动的密集,包括金属冶炼、机械加工、化工制造、化石燃料的燃烧、交通运输以及日常生活等,加剧了工业区域土壤的重金属污染^[1-2].重金属通常存在于工业排放的废气、废水和固体废物中,可通过大气沉降、污水排放、雨水冲刷等多种方式渗透到土壤中.随着重金属在土壤中的迁移和积累,它们可能会污染农作物,并通过食物链的传递最终影响到人类,当这些污染物进入人体后,可能会对人体健康构成威胁^[3-4].

ZHU等^[5]运用Pb同位素示踪技术,对首钢工业区的表层土壤进行重金属源解析研究,发现该地区土壤中的Pb主要源自钢铁生产过程中产生的粉尘、煤炭燃烧以及自然背景,其中人为源占主要部分.陈霞等^[6]利用主成分分析对青藏高原东缘海东市的表层土壤进行来源分析,发现Cd、Pb、Zn来自人为产生的交通污染,Cr、Ni、Fe、Mn、Cu主要受土壤作用控制.马云霞等^[7]为了解河南省北部某开发区周边耕地土壤重金属污

收稿日期:2025-01-12;**修回日期:**2025-03-18.

基金项目:青海省自然科学基金(2021-ZJ-956Q);青海省科技厅横向项目(k152407).

作者简介:吕荣久(1999-),男,河南信阳人,青海大学硕士研究生,研究方向为环境地球化学,E-mail:1448605371@qq.com.

通信作者:袁二军(1986-),男,内蒙古包头人,青海大学副教授,博士,研究方向为环境地球化学,E-mail:yuanerjun319@163.com.

引用本文:吕荣久,袁二军,史立群,等.西宁市某工业园区土壤重金属污染特征、健康风险及源解析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2026,54(2):59-70.(Lü Rongjiu, Yuan Erjun, Shi Liqun, et al.Characterization, health risks and source analysis of soil heavy metal pollution in an industrial park in Xining City[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2026,54(2):59-70.DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.12.0001.)

染来源,利用受体模型进行重金属源解析.结果显示,土壤中Cr、Ni、Cu和As主要受成土母质等自然因素的影响,Cd、Pb、Hg、Zn主要受涉重金属企业工业源的影响.屈宏飞等^[8]采用主成分分析等方法解析某钢铁厂周边土壤的重金属污染源,将研究区重金属来源划分为自然源和工业活动综合源、工业活动和人类活动综合源.因此,对典型工业园区周边土壤重金属污染开展评价和源解析,对当地土壤利用和污染管控意义重大^[9].

本研究中的工业园是西宁市生产制造的核心,是西宁市实施“一带一路”倡议的关键产业平台^[10].以工业园区主干道及其周边土壤为研究对象,检测和分析Cr、Ni、Zn、As、Cd和Pb 6种重金属元素的含量及其在土壤中的分布情况,并评估土壤污染状况.同时,运用相关性分析、聚类分析、主成分分析以及APCS-MLR模型多种方法,对研究区域土壤中的重金属元素进行了定量源解析,确定其来源.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

西宁市位于青海省东北部,湟水中游河谷盆地.全市总面积约为7 665 km²,平均海拔2 295 m.西宁市属于高原半干旱大陆性气候,具有寒长暑短、温差大的特点.研究区位于西宁市城中区,研究区内现有企业105家,形成了以新能源产业为主导、传统产业协同发展的产业格局.其中,新能源产业集群优势明显,涵盖新能源汽车、动力电池、光伏组件等多个领域,产业集聚效应显著.研究区东北部为道路交会处,西南部有比亚迪工厂和污水处理厂,新能源产业主要集中于研究区南部.

1.2 样品采集与处理

本研究基于目标区域工厂的空间分布特征,采用系统采样法以500 m间距布设采样点,共设置19个监测点位(见图1).样点空间分布特征显示,采样网络主要沿锦川大道及同安路交通干线呈带状分布,该布设方案有效覆盖了工业聚集区及其毗邻道路辐射区域.采集表层0~20 cm的土壤,将石块和植物残体剔除后保留约500 g土样,装入密封袋中.样品晾干后,挑出植物根系等杂质,通过研磨,过200目筛子(0.074 mm)保留土样约200 g,送入实验室进行消解.消解过程如下:先称出0.05 g土样放入消解管中,然后加酸(每个样品先加入2 mL氢氟酸,然后加入7 mL王水),静置30 min后采用微波消解法^[11]进行消解,消解完成后放入石墨赶酸仪进行赶酸,随后定容至50 mL.通过iCAP QC电感耦合等离子体质谱仪

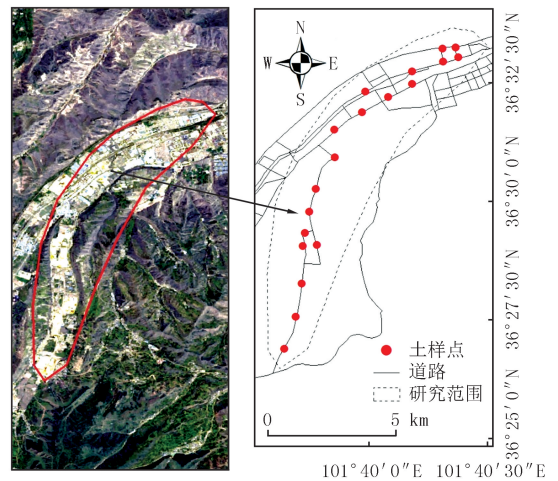


图1 研究区概况及采样点位置

Fig.1 Study area and sample sites

(ICP-MS)来测定各重金属质量含量,实验过程中加入空白、平行样,使用国家标准物质(GB W07401)进行仪器校准和实验质量控制,以确保土壤成分分析结果的准确性.

1.3 重金属污染评价方法

1.3.1 单因子指数法

单因子指数法是用来评估土壤中特定重金属污染状况的一种方法^[12].

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

式中, P_i 为单因子指数, C_i 为实测重金属质量含量,mg/kg; S_i 为背景值,mg/kg,参考青海省土壤背景值(Cr,70.10;Ni,29.60;Zn,80.30;As,14.00;Cd,0.14;Pb,20.90).根据 P_i 值进行评价,标准为: ≤ 1 ,I级,无污染;(1,2],II级,轻微污染;(2,3],III级,轻度污染;(3,5],IV级,中度污染; > 5 ,V级,重度污染.

1.3.2 内梅罗综合污染指数法

内梅罗综合污染指数法在综合污染评价领域应用广泛,可以有效体现土壤环境中各类重金属的综合污

染程度^[12].

$$P_N = \sqrt{\frac{P_{i\max}^2 + P_{i\text{ave}}^2}{2}}, \quad (2)$$

式中, P_N 为内梅罗综合污染指数,无量纲; $P_{i\max}$ 为单因子指数最大值,无量纲; $P_{i\text{ave}}$ 为单因子污染指数平均值,无量纲.根据 P_N 值进行评价,标准^[12]为: ≤ 0.7 , I 级,无污染; $(0.7, 1]$, II 级,轻微污染; $(1, 2]$, III 级,轻度污染; $(2, 3]$, IV 级,中度污染; > 3 , V 级,重度污染.

1.3.3 地累积指数法

地累积指数法是一种常用于评估沉积物和土壤中重金属污染水平的定量分析方法^[13].

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5B_i} \right), \quad (3)$$

式中, I_{geo} 为地累积指数, C_i 为实测重金属质量含量, mg/kg; B_i 为背景值, mg/kg, 参考青海省土壤背景值.根据 I_{geo} 值进行评价,标准^[14]为: ≤ 0 , I 级,无污染; $(0, 1]$, II 级,轻微-中度污染; $(1, 2]$, III 级,中度污染; $(2, 3]$, IV 级,中-高度污染; $(3, 4]$, V 级,中-重度污染; $(4, 5]$, VI 级,重-极重度污染; > 5 , VII 级,极重度污染.

1.3.4 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法在土壤重金属的生态危害评价方面广泛应用,能有效体现某一种重金属的污染情况^[15].

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_i}{C_i^b}, \quad (4)$$

式中, RI 为多元素综合潜在生态风险指数, E_r^i 为单元素潜在生态风险指数, T_r^i 为毒性响应系数 (Cr, 2; Zn, 1; Ni、Pb, 5; As, 10; Cd, 30); C_f^i 为单因子指数, C_i 为实测重金属质量含量, mg/kg; C_i^b 为背景值, mg/kg, 参考青海省土壤背景值; n 为重金属总数量.评价标准^[14]见表 1.

表 1 潜在生态风险评价标准

Tab. 1 Classification of potential ecological risk index

等级	I	II	III	IV	V
富集程度	低	中	高	很高	极高
潜在生态风险指数 E_r^i	≤ 40	$(40, 80]$	$(80, 160]$	$(160, 320]$	> 320
综合生态风险指数 RI	≤ 110	$(110, 220]$	$(220, 440]$	$(440, 880]$	> 880

1.3.5 健康风险评价

采用美国环保署制定的人体健康风险评估模型^[16],对土壤中重金属污染导致的健康风险进行评估.土壤中的重金属主要经由 3 种途径对人体健康产生威胁,分别是经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触.计算式如下:

$$ADD_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{IngR} \times \text{CF} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6}, \quad (5)$$

$$ADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{InhR} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{PEF} \times \text{BW} \times \text{AT}}, \quad (6)$$

$$ADD_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{SA} \times \text{AF} \times \text{ABS} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{BW} \times \text{AT}} \times 10^{-6}, \quad (7)$$

$$LADD_{\text{ing}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{AT}} \times \left(\frac{\text{IngR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{IngR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right) \times 10^{-6}, \quad (8)$$

$$LADD_{\text{inh}} = \frac{C \times \text{EF}}{\text{PED} \times \text{AT}} \times \left(\frac{\text{InhR}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{InhR}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right), \quad (9)$$

$$LADD_{\text{derm}} = \frac{C \times \text{EF} \times \text{AF} \times \text{ABS}}{\text{AT}} \times \left(\frac{\text{SA}_{\text{child}} \times \text{ED}_{\text{child}}}{\text{BW}_{\text{child}}} + \frac{\text{SA}_{\text{adult}} \times \text{ED}_{\text{adult}}}{\text{BW}_{\text{adult}}} \right). \quad (10)$$

式中, ADD_{ing} 、 ADD_{inh} 和 ADD_{derm} 分别表示成人经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径的重金属日均暴露量, mg/(kg · d); $LADD_{\text{ing}}$ 、 $LADD_{\text{inh}}$ 和 $LADD_{\text{derm}}$ 分别表示儿童经口摄入、呼吸吸入和皮肤接触途径的重金属

日均暴露量, $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$; C 表示重金属实测值, mg/kg . 其他缩写的含义和取值如附录表 S1 所示.

$$HQ = \frac{ADD}{RfD}, \quad (11)$$

$$HI = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 HQ, \quad (12)$$

$$CR = ADD \times SF, \quad (13)$$

$$TCR = \sum_{i=1}^6 \sum_{j=1}^3 CR_{ij}. \quad (14)$$

式中, i 为重金属类型, j 为暴露途径; HQ 表示单项重金属非致癌风险, HI 表示多种重金属元素的综合非致癌风险, $HQ < 1$ 和 $HI < 1$ 不存在非致癌风险, CR 为单项重金属致癌风险, TCR 为总致癌风险, 当 $CR < 1E-06$ 和 $TCR < 1E-06$ 不存在致癌风险. 参考剂量 (RfD), $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$ 和斜率因子 (SF), $(\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d}))^{-1}$ 的取值见附录表 S2.

1.3.6 APCS-MLR 模型

APCS-MLR 模型的步骤是先进行主成分分析, 获取绝对主成分因子得分. 接着, 将这些因子得分作为自变量, 土壤中各类重金属的质量含量作为因变量, 进行多元线性回归分析. 最后, 依据回归系数来确定各类污染源对土壤重金属质量含量的贡献率^[17].

(1) 对数据标准化处理:

$$Z_{ij} = \frac{C_{ij} - \bar{C}_j}{\sigma_j}, \quad (15)$$

式中, Z_{ij} 为元素 j 的第 i 个样品质量含量的标准化结果, C_{ij} 是元素 j 在第 i 个样品中的质量含量, mg/kg ; \bar{C}_j 是元素 j 的质量含量平均值, mg/kg ; σ_j 是元素 j 的标准差.

(2) 为各重金属元素引入一个质量含量为 0 的人为样本, 进行标准化:

$$(Z_0)_j = \frac{0 - \bar{C}_j}{\sigma_j} = -\frac{\bar{C}_j}{\sigma_j}, \quad (16)$$

式中, $(Z_0)_j$ 为元素 j 质量含量为 0 的人为样本的标准化结果.

(3) 运用 PCA 主成分分析法, 求得经过标准化处理后的污染物质量含量样本所对应的因子得分. 而每种污染物元素的绝对因子 (APCS) 可以通过真实样本的因子得分与 Z 的因子得分相减来估算得出. 将土壤中各种重金属质量含量作为因变量, 以 $APCS_k$ 作为自变量, 进行多元线性回归分析, 再通过回归系数来计算不同污染源对土壤重金属的贡献率.

$$C_j = b_{oj} + \sum_{k=0}^p (b_{kj} \times APCS_k), \quad (17)$$

式中, b_{oj} 是重金属 j 回归方程常数项; p 表示因子个数; b_{kj} 是源 k 对重金属 j 的回归系数; $b_{kj} \times APCS_k$ 表示源 p 对 C_j 的贡献率.

(4) 为保障贡献率计算准确无误, 避免源解析结果可能产生的偏差, 在计算环节采用污染源贡献率的绝对值进行运算. 已知源的贡献率公式如下:

$$PC = \frac{|b_{kj} \times APCS_k|}{|b_{oj}| + \sum_{j=1}^n |b_{kj} \times APCS_k|} \times 100\%. \quad (18)$$

未知源的贡献率公式如下:

$$PC = \frac{|b_{kj}|}{|b_{oj}| + \sum_{j=1}^n |b_{kj} \times APCS_k|} \times 100\%, \quad (19)$$

式(18)、(19)中, n 均为污染源个数.

1.4 数据处理

通过 Excel 2019 处理重金属含量数据, 采用 SPSS 25.0 进行相关性分析、聚类分析和主成分分析, ArcGIS 10.8 进行空间插值得到重金属分布特征, Origin 2024 进行图表绘制.

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量特征

研究区内 6 种重金属质量含量特征见表 2, Cr、Ni、Zn、As、Cd、Pb 平均值分别为 86.48、39.77、125.25、23.70、0.26 和 22.42 mg/kg, 分别是青海省土壤背景值的 1.23、1.34、1.56、1.69、1.86、1.07 倍, 6 种元素平均值均大于青海省土壤背景值^[18], Zn 和 As 最大值均大于农用地土壤污染风险筛选值^[19]. 6 种重金属元素变异系数均大于 12%, 其中 Pb 为中度变异, 其余 5 种重金属元素均为高度变异, 变异系数越大, 受人为活动影响越大^[20].

表 2 土壤重金属质量含量统计分析

Tab. 2 Statistical characteristics of heavy metals concentration in soil

元素	Cr	Ni	Zn	As	Cd	Pb
最大值/(mg·kg ⁻¹)	219.38	68.20	371.51	37.11	0.46	27.30
最小值/(mg·kg ⁻¹)	49.70	28.62	54.76	15.82	0.13	18.06
平均值/(mg·kg ⁻¹)	86.48	39.77	125.25	23.70	0.26	22.42
标准差	38.60	9.95	67.37	6.16	0.09	2.76
变异系数/%	44.64	25.02	53.79	25.98	37.04	12.30
青海省背景值/(mg·kg ⁻¹)	70.10	29.60	80.30	14.00	0.14	20.90
农用地土壤污染风险筛选值(mg·kg ⁻¹)	250	190	300	25	0.60	170

为进一步了解研究区土壤重金属元素空间分布特征, 采用反距离权重法对重金属质量含量进行插值分析, 结果如图 2. 空间分布特征显示 Cr、Ni 和 Zn 在研究区西南部富集, As、Cd 和 Pb 在研究区东北部、中部和西南部富集, Pb 在研究区东北部富集最严重. 研究区域内重金属质量含量的空间分布呈现显著异质性, 其主要因素可归纳为以下两方面: (1) 区域内制造业类企业密集分布于中部及西南部工业集聚区, 导致该区域重金属排放负荷显著高于其他区域; (2) 东北部作为主要交通枢纽节点且人流量密集, 导致 Pb 含量较高.

2.2 土壤重金属污染评价

2.2.1 重金属污染特征

各重金属元素的单因子污染指数 P_i 的平均值分别为 1.23 (Cr)、1.34 (Ni)、1.56 (Zn)、1.69 (As)、1.86 (Cd)、1.07 (Pb) (见图 3). Cd 的污染较为严重, 有 31.58% 样点土壤呈轻至中度污染, 其余元素也存在一定程度的污染. 内梅罗综合污染指数法计算各重金属元素 P_N 分别为 2.38 (Cr)、1.79 (Ni)、3.45 (Zn)、2.22 (As)、2.70 (Cd)、1.20 (Pb), 表明 Zn 为重度污染, Cr、As、Cd 为中度污染, Ni、Pd 为轻度污染.

各重金属元素的地累积指数 (I_{geo}) 平均值分别为 -0.38 (Cr)、-0.20 (Ni)、-0.10 (Zn)、0.13 (As)、0.22 (Cd)、-0.49 (Pb) (见图 4), 其中, As 和 Cd 为轻至中度污染, 其余 4 种重金属元素的 I_{geo} 平均值小于 0, 表明总体上无污染. 这说明研究区内的土壤已经出现了不同程度的 As 和 Cd 污染.

2.2.2 潜在生态风险评价指数法

根据潜在生态风险评价指数 (E_r^i) 和综合风险指数 RI 的结果 (见图 5), 可知 Cr、Ni、Zn、As 和 Pb 的 E_r^i 值均小于 40, 表明这些元素的生态风险较低. 相比之下, Cd 的平均 E_r^i 值为 55.93, 属于中等生态风险水平. 具体来看, 低生态风险等级的样品占比 26%, 中等生态风险等级的样品占比 58%, 高生态风险等级的样品占比 16%; RI 的平均值为 88.97, 生态风险为低级, 低生态风险等级样品占比 74%, 中生态风险等级样品占比 26%. Cd 的生态风险等级明显高于其他重金属元素. 综上, Cd 为研究区土壤重金属污染的关键元素.

2.2.3 健康风险评价

研究区土壤重金属非致癌风险结果见表 3, 3 种暴露途径下, 成人和儿童 HI 均大于 1, 存在非致癌风险. 单一重金属元素: 成人中除 Cr 存在非致癌风险外, 其余 5 种重金属元素 HQ 均小于 1, 不存在非致癌风险; 儿童 6 种重金属元素中 Cr、As 和 Pb 的 HQ 大于 1, 且 As 是儿童非致癌健康风险的主要贡献元素, 儿童可能因为 As 摄入超标患非致癌疾病, 需加强对研究区 As 超标治理, 加强对儿童的防护.

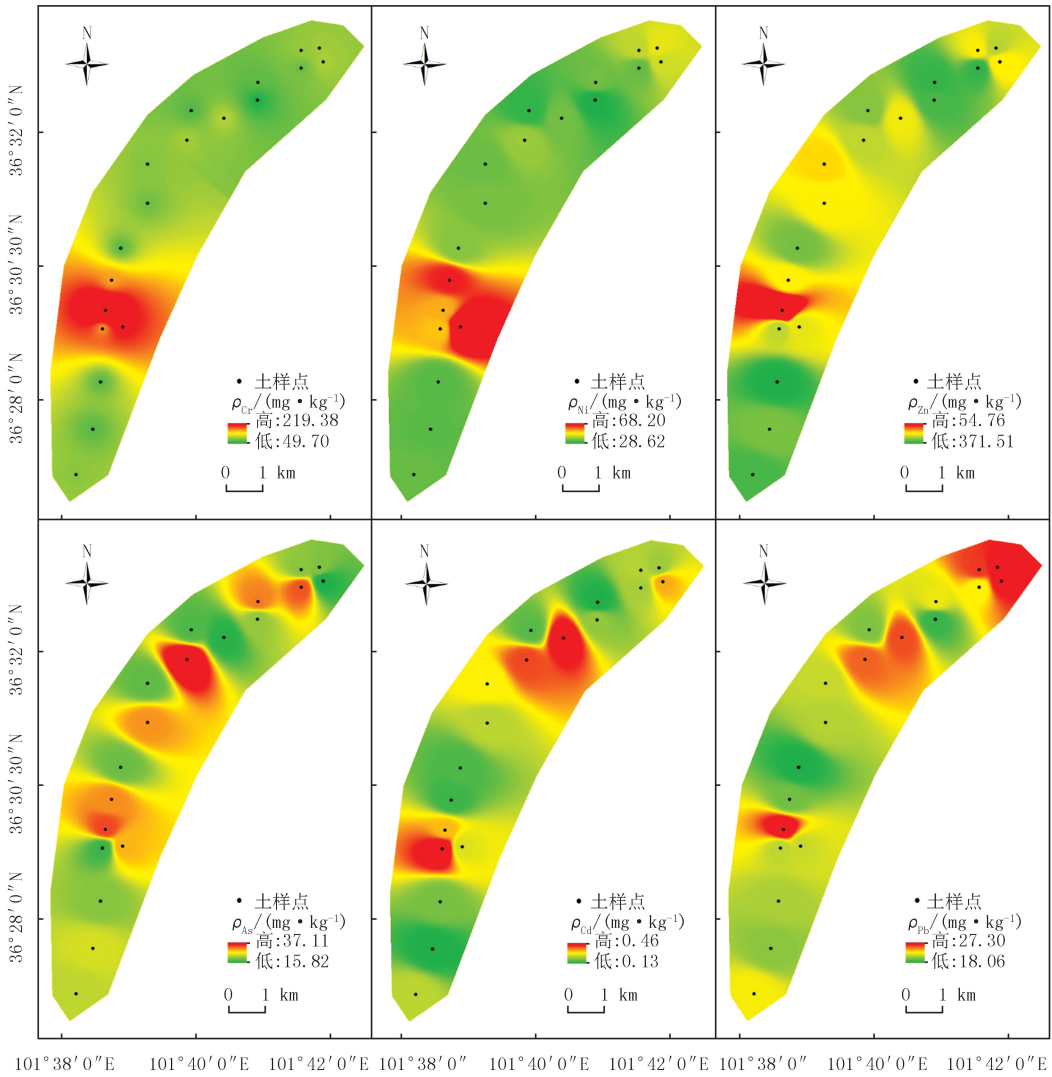


图2 重金属质量含量空间分布特征

Fig.2 Spatial distribution characteristics of heavy metal content

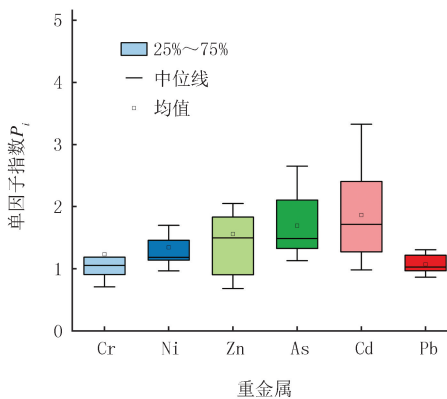


图3 单因子指数法结果

Fig.3 Single factor index method results

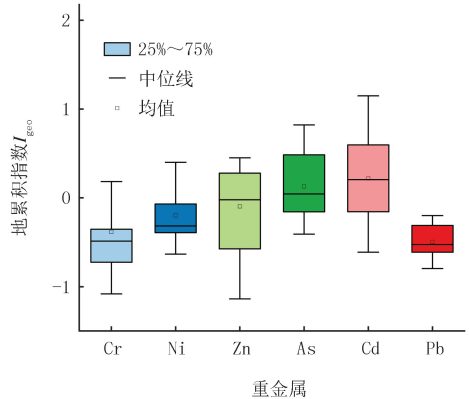


图4 地累积指数法结果

Fig.4 Geo-accumulation index method results

研究区土壤重金属致癌风险结果(见表 4),儿童值($1.14E-03$)大于成人 TCR 值($4.65E-05$),均大于

1E-06,存在致癌风险.As 和 Cd 是致癌风险的主要贡献元素,儿童 As 和 Cd 的值和成人 As 和 Cr 的 CR 值均大于 1E-06,表明当地人有患癌症的风险,并且儿童致癌风险远高于成人.

综上,研究区的非致癌风险远高于致癌风险,儿童的非致癌风险和致癌风险均高于成人,表明儿童对研究区土壤重金属的暴露反应比成人更为敏感,受到的危害更大,因为儿童特殊的生理特征和行为习惯,其暴露于环境重金属的可能性更大^[21].

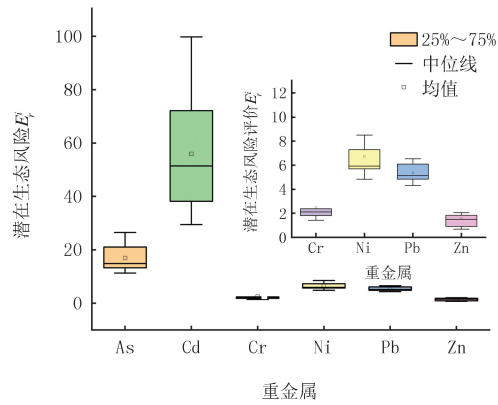


图5 潜在生态风险评价结果

Fig.5 Potential ecological risk index results

表 3 成人和儿童 3 种途径下非致癌风险值

Tab. 3 Non-carcinogenic risk values by three pathways in adults and children

类别	重金属	经口摄入 HQ	呼吸吸入 HQ	皮肤接触 HQ	HQ	HI
成人	Cr	2.11E-06	1.30E-01	4.82E+00	4.95E+00	5.86E+00
	Ni	1.46E-07	8.33E-05	2.46E-02	2.47E-02	
	Zn	3.06E-08	1.80E-05	1.40E-03	1.41E-03	
	As	5.80E-06	8.31E-03	6.45E-01	6.53E-01	
	Cd	1.87E-08	1.10E-05	8.54E-02	8.54E-02	
	Pb	4.70E-07	2.75E-04	1.43E-01	1.43E-01	
儿童	Cr	9.99E+00	7.15E-02	1.41E+00	1.15E+01	4.23E+01
	Ni	6.89E-01	4.57E-05	7.19E-03	6.96E-01	
	Zn	1.45E-01	6.00E-05	4.08E-04	1.45E-01	
	As	2.74E+01	4.56E-03	1.88E-01	2.76E+01	
	Cd	8.85E-02	6.04E-06	2.49E-02	1.13E-01	
	Pb	2.22E+00	1.51E-04	4.17E-02	2.26E+00	

表 4 成人和儿童 3 种途径下致癌风险值

Tab. 4 Cancer risk values by three pathways in adults and children

类别	重金属	经口摄入 CR	呼吸吸入 CR	皮肤接触 CR	CR	TCR
成人	Cr	0.00E+00	5.37E-06	0.00E+00	5.37E-06	4.65E-05
	Ni	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	Zn	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	As	8.94E-11	1.51E-10	4.10E-05	4.10E-05	
	Cd	3.92E-12	6.80E-13	1.79E-07	1.79E-07	
	Pb	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
儿童	Cr	0.00E+00	7.37E-06	0.00E+00	7.37E-06	1.14E-03
	Ni	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	Zn	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	
	As	1.06E-03	2.07E-10	2.99E-05	1.09E-03	
	Cd	4.63E-05	9.32E-13	1.30E-07	4.64E-05	
	Pb	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	

2.3 土壤重金属源解析

2.3.1 相关性分析

相关性分析能够揭示不同元素之间的内在联系,一般将相关性强的元素视为可能源自同一污染源或具有相似的传播路径^[22].通过对研究区 6 种土壤重金属进行 Pearson 相关性分析(见图 6),可知只有 As 和 Cd 之间呈负相关,其余元素均呈正相关,Cr-Ni-Zn 相关系数较高($r > 0.7$),表明这 3 种重金属之间具有相同污染源可能性较高;Zn-Pb、Cd-Pb 呈显著相关性($r > 0.5$),这表明这 3 种重金属可能有相似的污染源.而 As 与其他 5 种重金属之间的相关系数较小,范围在 -0.12 到 0.32 之间,这意味着 As 与它们有相似污染源的可能性较低.

2.3.2 聚类分析

聚类分析能够揭示土壤中各元素间的相似性和差异性,有助于识别元素之间的分布差异和变化趋势,对于理解元素的迁移和转化过程具有重要的指导作用^[17].从聚类分析结果(见图 7)来看,研究区的 6 种土壤重金属可以分为 3 类:Cr、Zn 和 Ni 归为一类,Cd 和 Pb 归为一类,As 单独成为一类.这一分类结果与相关性分析的结论相近.

2.3.3 主成分分析

使用 SPSS 25.0 对研究区土壤中 6 种重金属元素的数据进行主成分分析,KMO 检验值是 $0.569 > 0.5$,Bartlett 球形度检验的概率为 $0.000 < 0.05$,表明研究区土壤中 6 种重金属元素的含量在空间上存在良好的相关性,适合进行主成分分析^[23].分析结果(见表 5),将初始特征值 > 1.000 的两个因子作为主成分因子,将 2 个主成分因子标准化后进行正交旋转,旋转后的累计

贡献率为 70.92%.因子 1 的方差贡献率为 36.63%,Cr、Ni、Zn 和 As 的荷载系数较高,分别为 0.823、0.786、0.626 和 0.698,表明 Cr、Ni、Zn 和 As 可能来自同一污染源;因子 2 的方差贡献率为 34.29%,Zn、Cd 和 Pb 的荷载系数较高,分别为 0.615、0.856 和 0.788.

表 5 主成分因子荷载矩阵

Tab. 5 Principal component factor loading matrix

元素	因子 1	因子 2	元素	因子 1	因子 2
Cr	0.823	0.479	Pb	0.148	0.788
Ni	0.786	0.179	特征值	2.961	1.294
Zn	0.626	0.615	方差贡献率/%	36.63	34.29
As	0.698	-0.255	累计方差贡献率/%	36.63	70.92
Cd	-0.032	0.856			

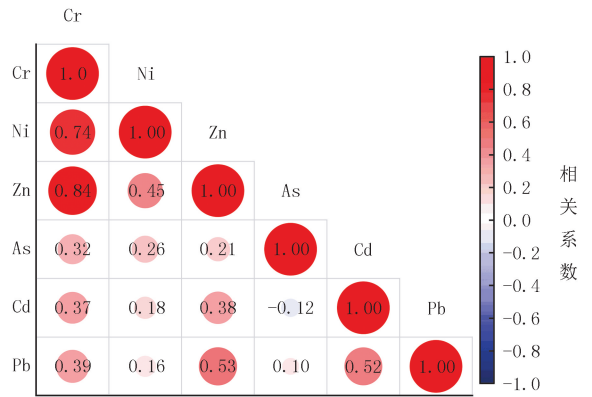


图6 相关性分析结果

Fig. 6 Related analysis results

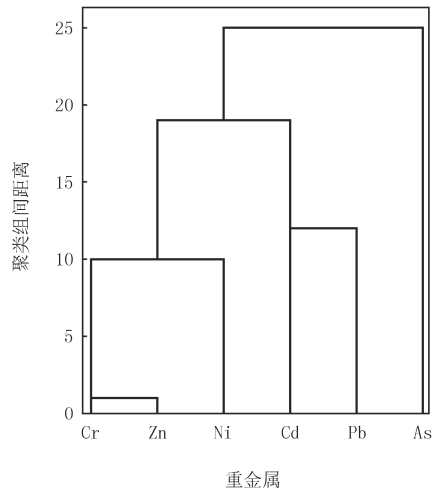


图7 聚类分析结果

Fig. 7 Cluster analysis results

2.3.4 APCS-MLR 模型分析

使用 APCS-MLR 模型对研究区土壤中的 Cr、Ni、Zn、As、Cd 和 Pb 6 种重金属元素分别进行了多元线性回归分析(见表 6)。分析结果显示,这些重金属元素的拟合 R^2 值各有不同,其中 Cr 的拟合 R^2 为 0.895, Ni 为 0.606, Zn 为 0.741, As 为 0.497, Cd 为 0.700, Pb 为 0.598。除 As 的拟合 R^2 (0.497) 较低外,其余 5 种重金属元素的拟合 R^2 均大于 0.5, 预测值/实测值(E/O)均为 1, 表明 APCS-MLR 模型的拟合度好, 可信度高。

表 6 APCS-MLR 模型相关系数

Tab. 6 Correlation coefficient of APCS-MLR model

重金属	实测值(O)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	APCS-MLR 模型			重金属	实测值(O)/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	APCS-MLR 模型		
		预测值(E)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	E/O	R^2			预测值(E)/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	E/O	R^2
Cr	86.84	86.48	1.00	0.895	As	23.70	23.70	1.00	0.497
Ni	39.77	39.77	1.00	0.606	Cd	0.26	0.26	1.00	0.700
Zn	125.25	125.26	1.00	0.741	Pb	22.42	22.42	1.00	0.598

在主成分分析的基础上,利用 APCS-MLR 模型计算元素贡献率(见图 8)。因子 1($F1$)以 Cr(44.48%)和 Ni(36.23%)贡献为主,Cr 和 Ni 主要富集在工业园区西南部,根据文献[24],Cr 和 Ni 等重金属元素主要受土壤母质和成土过程影响[25],从地球化学过程来看,成土母质在风化作用过程中会逐渐释放包含重金属元素在内的矿物成分,通过地球化学循环形成元素迁移与富集特征,因此这些重金属在自然土壤环境中普遍存在本底含量。这一现象体现了地质背景对土壤元素组成的决定性作用。此外,Cr 和 Ni 的变异系数相对较小,Cr 和 Ni 的平均 I_{geo} 均小于 0,说明受人为影响较小,且 Cr 和 Ni 的平均值均未超出农用地土壤污染风险筛选值,表明含有自然源。可初步确定因子 1 为自然源。

因子 2 ($F2$) 以 Zn (44.13%) 和 Cd (82.95%) 贡献为主,这两种元素均超过青海省土壤背景值(见表 2),Cd 和 Zn 的最大值分别是青海省土壤背景值的 4.43 和 3.33 倍,Zn 和 Cd 的变异系数较大,为高度变异,表明这两种元素受人为影响严重。Zn 和 Cd 主要富集在工业园区西南部,Cd 也在工业园区中部富集。有研究表明,Cd 的来源与工业活动密切相关,活动中产生的粉尘和废气是土壤中 Cd 富集的主要原因[26-27]。Zn 的富集区建有西宁比亚迪汽车厂,在汽车工业生产过程中,特别是在涂装工序中,会产生 Zn 等污染物废水,这些废水经过长时间积累,会以粉层等形式富集在土壤中。因此,因子 2 为工业生产活动源。

因子 3 ($F3$) 以 Ni (51.53%)、As (62.17%) 和 Pb (70.15%) 贡献为主,研究区土壤中 Ni、As 和 Pb 的平均值均大于青海省土壤背景值(见表 2)。Ni 主要富集于工业园区西南部,As 和 Pb 主要富集于工业园区北部、中部和西南部,其中 Pb 在工业园区东北部含量最高,且东北部为道路交会处,路况复杂、车流量较多。从元素含量空间分布来看,研究区被西塔高速和 G227 国道包围,中间有创业路、麟河路等,且部分土壤样点在交通道路两侧采集,Pb 是交通活动的一个重要来源[28-29]。Pb 是汽车尾气的标志性元素,机动车使用的汽油在高温燃烧过程中会与空气中的氧气发生反应,产生含有机酸、醛、酮、醇等有机化合物,这些化合物可能会导致交通道路两旁土壤中的 Pb 和 Ni 含量升高[28]。现有研究表明,As 元素主要来源于多种农业投入品和废弃物,包括复合肥料、农药、杀虫剂、除草剂、家畜粪便以及农业生活垃圾等[30]。研究区中部和北部居住人口相对密集,研究区西南部有污水处理厂,因此,可以得出因子 3 为交通活动和农业活动的综合源。

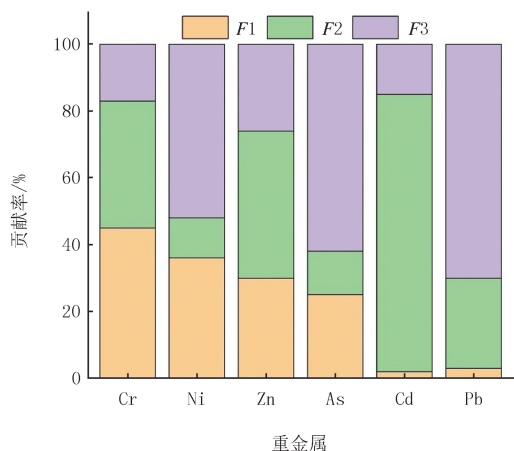


图8 土壤重金属污染源贡献率

Fig. 8 Source contribution ratios of heavy metals of soil

3 结 论

研究区土壤6种重金属元素均超出青海省土壤背景值,Cr、Zn和Cd的变异系数均大于36%,为高度变异,受人类活动影响很大.单因子指数评价结果表明Cd的污染程度最大;内梅罗综合污染指数结果表明Zn为重度污染;地累积指数评价结果表明As、Cd和Zn在研究区存在一定的累积;潜在生态风险指数评价结果表明Cd的平均值为55.93,生态风险为中级;RI的平均值为88.97,生态风险为低级;健康风险评价结果表明As和Cd是致癌风险的主要贡献元素.源解析显示,研究区土壤中Cr和Ni主要来源于自然源,Zn和Cd主要来源于工业生产活动源,Pb和As主要来源于交通活动-农业生产活动的综合源.

附录见电子版(DOI:10.16366/j.cnki.1000-2367.2025.01.12.0001).

参 考 文 献

- [1] 李晓曼,李青青,杨洁,等.上海市典型工业用地土壤和地下水重金属复合污染特征及生态风险评价[J].环境科学,2022,43(12):5687-5697.
LI X M,LI Q Q,YANG J,et al.Compound pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in soil and groundwater of typical industrial lands in Shanghai[J].Environmental Science,2022,43(12):5687-5697.
- [2] 徐玉玲,冯巩固,蒋晓煜,等.兰州市某交通干道土壤重金属分布特征及其对绿化植物的影响[J].应用生态学报,2020,31(4):1341-1348.
XU Y L,FENG G L,JIANG X Y,et al.Distribution characteristics of heavy metals in soil and its influence on greening plants in a main road of Lanzhou City,Northwest China[J].Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(4):1341-1348.
- [3] 王梦梦,原梦云,苏德纯.我国大气重金属干湿沉降特征及时空变化规律[J].中国环境科学,2017,37(11):4085-4096.
WANG M M,YUAN M Y,SU D C.Characteristics and spatial-temporal variation of heavy metals in atmospheric dry and wet deposition of China[J].China Environmental Science,2017,37(11):4085-4096.
- [4] 吴同亮,王玉军,陈怀满.2016—2020年环境土壤学研究进展与热点分析[J].农业环境科学学报,2021,40(1):1-15.
WU T L,WANG Y J,CHEN H M.Research progress and hotspots of environmental soil science between 2016—2020 based on bibliometrics analysis[J].Journal of Agro-Environment Science,2021,40(1):1-15.
- [5] ZHU G X,GUO Q J,XIAO H Y,et al.Multivariate statistical and lead isotopic analyses approach to identify heavy metal sources in topsoil from the industrial zone of Beijing Capital Iron and Steel Factory[J].Environmental Science and Pollution Research,2017,24(17):14877-14888.
- [6] 陈霞,刘亮,王彦瑜,等.青藏高原东缘海东市表土重金属污染特征及源解析[J].南京林业大学学报(自然科学版),2026,50(1):112-120.
CHEN X,LIU L,WANG Y Y,et al.Characteristics of heavy metal pollution in topsoil of Haidong City on the eastern edge of the Qinghai-Xizang Plateau and source parsing[J].Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition),2026,50(1):112-120.
- [7] 马云霞,彭华,朱泽军,等.河南省北部某开发区周边耕地土壤重金属风险评价及源解析[J].河南师范大学学报(自然科学版),2025,53(1):66-75.
MA Y X,PENG H,ZHU Z J,et al.Risk assessment and source analysis of heavy metals in cultivated soil around a development zone of northern Henan Province[J].Journal of Henan Normal University(Natural Science Edition),2025,53(1):66-75.
- [8] 屈宏飞,袁二军,史立群,等.某钢铁厂周边土壤重金属污染特征、健康风险及源解析[J].中国无机分析化学,2025,15(8):1135-1148.
QU H F,YUAN E J,SHI L Q,et al.Characterization, health risks and source analysis of heavy metal pollution in soil surrounding an iron and steel plant[J].Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry,2025,15(8):1135-1148.
- [9] 赵琳兴,雷红平,王雁鹤,等.黄河上游典型工业园区周边土壤重金属污染评价及来源解析[J].环境科学,2025,46(6):3890-3901.
ZHAO L X,LEI H P,WANG Y H,et al.Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution around typical industrial parks in upper reaches of Yellow River[J].Environmental Science,2025,46(6):3890-3901.
- [10] 黄建中,黄亮,周有军.价值链空间关联视角下的产城融合规划研究:以西宁市南川片区整合规划为例[J].城市规划,2017,41(10):9-16.
HUANG J Z,HUANG L,ZHOU Y J.Planning of city-industry integration from the perspective of the spatial association of value chain: a case study on the integration planning of Nanchuan area,Xining city[J].City Planning Review,2017,41(10):9-16.
- [11] 中华人民共和国环境保护部.土壤和沉积物 金属元素总量的消解 微波消解法:HJ 832—2017[S].北京:中国环境出版社,2017.
- [12] 尹伊梦,赵委托,黄庭,等.电子垃圾拆解区土壤-水稻系统重金属分布特征及健康风险评价[J].环境科学,2018,39(2):916-926.
YIN Y M,ZHAO W T,HUANG T,et al.Distribution characteristics and health risk assessment of heavy metals in a soil-rice system in

- an E-waste dismantling area[J].*Environmental Science*,2018,39(2):916-926.
- [13] MULLER G.Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J].*GeoJournal*,1969,2(3):109-118.
- [14] 张亚峰,马强,施泽明,等.黄河流域青海段土壤重金属累积特征及源解析[J].*环境科学*,2025,46(10):6612-6620.
ZHANG Y F,MA Q,SHI Z M,et al.Pollution assessment and source apportionment of heavy metals in soil of Qinghai section of the Yellow River Basin[J].*Environmental Science*,2025,46(10):6612-6620.
- [15] 曾祥英,王晨,于志强,等.湘江岳阳段沉积物重金属污染特征及其初步生态风险评估[J].*地球化学*,2012,41(1):63-69.
ZENG X Y,WANG C,YU Z Q,et al.The occurrence,distribution and preliminary risk assessment of heavy metals in sediments from Xiangjiang River(Yueyang Section)[J].*Geochimica*,2012,41(1):63-69.
- [16] 郑永立,朱明,郑彤,等.电子垃圾拆解区农田土壤和地表水重金属污染特征和潜在风险评价[J].*环境化学*,2023,42(9):2946-2960.
ZHENG Y L,ZHU M,ZHENG T,et al.Characteristics and risk assessment of heavy metal in farmland soils and surface water in e-waste dismantling area[J].*Environmental Chemistry*,2023,42(9):2946-2960.
- [17] 张海霞,蔡昞祖,赵海萍,等.基于 PMF 和 APCS-MLR 模型的工业城市大气降尘金属源解析及综合污染评价[J].*环境工程学报*,2022,16(11):3816-3827.
ZHANG H X,CAI A Z,ZHAO H P,et al.Source apportionment of metals in atmospheric deposition of a typical industrial city based on PMF and APCS-MLR and comprehensive pollution assessment[J].*Chinese Journal of Environmental Engineering*,2022,16(11):3816-3827.
- [18] 中国环境监测总站主编.中国土壤元素背景值[M].北京:中国环境科学出版社,1990.
- [19] 生态环境部,国家市场监督管理总局.土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准:GB 15618—2018[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [20] 于路加,马海军,王翠平.银川市黄河滩区土壤重金属污染特征、生态风险评价与来源解析[J].*环境科学*,2024,45(5):2971-2982.
YU L J,MA H J,WANG C P.Characteristics,ecological risk assessment,and source apportionment of soil heavy metals in the Yellow River floodplain of Yinchuan City[J].*Environmental Science*,2024,45(5):2971-2982.
- [21] YANG Q Q,LI Z Y,LU X N,et al.A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China:Pollution and risk assessment[J].*Science of The Total Environment*,2018,642:690-700.
- [22] 孟利,左锐,王金生,等.基于 PCA-APCS-MLR 的地下水污染源定量解析研究[J].*中国环境科学*,2017,37(10):3773-3786.
MENG L,ZUO R,WANG J S,et al.Quantitative source apportionment of groundwater pollution based on PCA-APCS-MLR[J].*China Environmental Science*,2017,37(10):3773-3786.
- [23] 张传华,王钟书,刘力,等.基于 APCS-MLR 受体模型和地统计法的矿区周边农用地土壤重金属来源解析[J].*环境科学*,2023,44(6):3500-3508.
ZHANG C H,WANG Z S,LIU L,et al.Source analysis of soil heavy metals in agricultural land around the mining area based on APCS-MLR receptor model and geostatistical method[J].*Environmental Science*,2023,44(6):3500-3508.
- [24] 张宏泽,崔文刚,黄月美,等.黔中喀斯特地区临近矿区耕地土壤重金属污染评价及其源解析[J].*环境科学学报*,2022,42(4):412-421.
ZHANG H Z,CUI W G,HUANG Y M,et al.Evaluation and source analysis of heavy metal pollution of farmland soil around the mining area of Karst region of central Guizhou Province[J].*Acta Scientiae Circumstantiae*,2022,42(4):412-421.
- [25] 周旭,吕建树.山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J].*地理研究*,2019,38(2):414-426.
ZHOU X,LYU J S.Sources,distribution and ecological risk of soil heavy metals in Guangrao county,Shandong province[J].*Geographical Research*,2019,38(2):414-426.
- [26] 王乔林,宋云涛,王成文,等.滇西地区土壤重金属来源解析及空间分布[J].*中国环境科学*,2021,41(8):3693-3703.
WANG Q L,SONG Y T,WANG C W,et al.Source identification and spatial distribution of soil heavy metals in Western Yunnan[J].*China Environmental Science*,2021,41(8):3693-3703.
- [27] 孟令华,杜小亮,刘乾,等.泰安市城区土壤重金属污染特征及风险评价[J].*中国无机分析化学*,2022,12(5):41-49.
MENG L H,DU X L,LIU Q,et al.Pollution characteristics and risk assessment of heavy metals in soil in urban area of Tai'an[J].*Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry*,2022,12(5):41-49.
- [28] 卫晓锋,孙紫坚,陈自然,等.基于成土母质的矿产资源基地土壤重金属生态风险评价与来源解析[J].*环境科学*,2023,44(6):3585-3599.
WEI X F,SUN Z J,CHEN Z R,et al.Ecological risk assessment and source apportionment of heavy metals in mineral resource base based on soil parent materials[J].*Environmental Science*,2023,44(6):3585-3599.
- [29] ALSBOU E M E,ALI AL-KHASHMAN O.Heavy metal concentrations in roadside soil and street dust from Petra region,Jordan[J].*Environmental Monitoring and Assessment*,2017,190(1):48.
- [30] LYU J S,LIU Y,ZHANG Z L,et al.Identifying the origins and spatial distributions of heavy metals in soils of Ju country(Eastern China) using multivariate and geostatistical approach[J].*Journal of Soils and Sediments*,2015,15(1):163-178.

Characterization, health risks and source analysis of soil heavy metal pollution in an industrial park in Xining City

Lü Rongjiu^{1a}, Yuan Erjun^{1a}, Shi Liqun², Peng Hongming², Cong Diange^{1a},
Xu Jiandong^{1b}, Zha Chunlei^{1a}, Qu Hongfei^{1a}

(1. a. School of Geological Engineering; b. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China; 2. Qinghai Engineering Research Center of Geoenvironment Protection and Geohazard Prevention; Qinghai 906 Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd., Qinghai Bureau of Environmental Geology Exploration, Xining 810001, China)

Abstract: In order to reveal the heavy metal pollution status and sources of soil around an industrial park, 19 soil samples were systematically collected from the main road of the industrial park and its surrounding soil, and the contents of six heavy metal elements, Cr, Ni, Zn, As, Cd and Pb, and their distribution characteristics in the soil were analyzed. The quantitative evaluation of the degree of soil heavy metal pollution in the study area was carried out by using the single factor index method, Nemerow comprehensive pollution index and geo-accumulation index method, while the risk evaluation of soil heavy metals was carried out by using the potential ecological risk index and health risk assessment; and the source analysis of soil heavy metals in the study area was carried out by using the related analysis, cluster analysis, principal component analysis and absolute factor analysis-multiple linear regression (APCS-MLR) model. The results showed that the levels of six kinds of heavy metal were beyond the Qinghai Province soil background value, the maximum values of Zn and As were higher than the risk assessment value of soil pollution in farmland, and all the six kinds of heavy metals were enriched in the southwest of the study area. The evaluation result of single factor index is more serious Cd pollution; the result of Nemerow comprehensive pollution index is heavy pollution of Zn; the evaluation result of geo-accumulation index is slight to moderate pollution of As and Cd. The evaluation results of potential ecological risk evaluation index indicated that Cd ecological risk was medium level and the rest of elements were low level; the comprehensive potential ecological risk was low level; the results of health risk evaluation showed that there were non-carcinogenic and carcinogenic risks in the study area and the non-carcinogenic and carcinogenic risks of children were higher than those of adults. There are three sources of contamination of soil heavy metals in the study area, which are natural sources (36.63%), sources of industrial production activities (34.29%) and combined sources of transportation activities-agricultural activities (29.08%).

Keywords: soil heavy metal pollution; industrial park; distribution characteristics; pollution assessment; APCS-MLR model; source resolution

[责任编辑 赵晓华 刘洋]

附 录

表 S1 健康风险评估模型相关参数取值

Tab. S1 Value of exposure parameter of health risk assessment model

参数	含义	单位	取值	
			儿童	成人
<i>IngR</i>	摄入频率	mg/d	200.00	100.00
<i>CF</i>	转换频率	kg/mg	1×10^{-6}	1×10^{-6}
<i>ED</i>	暴露年限	a	6.00	24.00
<i>EF</i>	暴露频率	d/a	350.00	350.00
<i>BW</i>	平均体质量	kg	15.90	62.10
<i>AT</i> (非致癌)	平均暴露时间(非致癌)	d	6×365	2.4×365
<i>AT</i> (致癌)	平均暴露时间(致癌)	d	70×365	70×365
<i>InhR</i>	呼吸频率	m^3/d	7.60	20.00
<i>PEF</i>	灰尘排放因子	m^3/kg	1.36×10^9	1.36×10^9
<i>SA</i>	暴露皮肤表面积	cm^2	2 800.00	5 700.00
<i>AF</i>	皮肤附着因子	mg/cm^2	0.20	0.20
<i>ABS</i>	皮肤呼吸因子	无量纲	0.001	0.001

表 S2 重金属参考剂量(*RfD*)和斜率因子(*SF*)取值

Tab. S2 Corresponding reference dose(*RfD*) and slope factors(*SF*) values of heavy metals

项目			Cr	Ni	Zn	As	Cd	Pb
土壤	<i>RfD</i>	经口摄入	3.00×10^{-3}	2.00×10^{-2}	3.00×10^{-1}	3.00×10^{-4}	1.00×10^{-3}	3.50×10^{-3}
		呼吸吸入	2.86×10^{-5}	2.06×10^{-2}	3.00×10^{-1}	1.23×10^{-4}	1.00×10^{-3}	3.52×10^{-3}
		皮肤接触	6.00×10^{-5}	5.40×10^{-3}	3.00×10^{-1}	1.23×10^{-4}	1.00×10^{-5}	5.25×10^{-4}
	<i>SF</i>	经口摄入	—	—	—	1.50	6.10	—
		呼吸吸入	42	—	—	4.30×10^{-3}	1.80×10^{-3}	—
		皮肤接触	—	—	—	15.10	6.10	—

注：“—”表示无数据。