



引文格式: 刘靖宇, 尹芳, 钱涵, 等. 塔里木河下游垦区土壤重(类)金属地球化学特征及潜在生态风险评价[J]. 西北地质, 2025, 58(2): 302–312. DOI: 10.12401/j.nwg.2023190

Citation: LIU Jingyu, YIN Fang, QIAN Han, et al. Geochemical Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Lower Tarim River Reclamation Area[J]. Northwestern Geology, 2025, 58(2): 302–312. DOI: 10.12401/j.nwg.2023190

塔里木河下游垦区土壤重(类)金属地球化学特征及潜在生态风险评价

刘靖宇^{1,2}, 尹芳^{3,*}, 钱涵⁴, 蒋磊², 武婷婷², 刘磊¹

(1. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054; 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 830057; 3. 长安大学土地工程学院, 陕西 西安 710054; 4. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 为查明塔里木河下游垦区土壤重(类)金属地球化学特征及潜在生态风险, 采集表层土壤样品 125 件, 测定其 As、Hg、Ni、Cr、Cu、Zn、Cd 和 Pb 8 种元素含量和 pH 值大小, 基于地统计学、内梅罗综合污染指数法 (Nemerow Comprehensive Pollution Index, P_n) 和潜在生态风险指数法 (Potential ecological Risk Index, RI) 对土壤重(类)金属潜在生态风险进行评价, 利用正定矩阵模型 (Positive Matrix Factorization, PMF) 对重(类)金属来源进行解析。结果表明: ①研究区内所有重(类)金属元素的含量均值未超过国家农用地土壤污染风险管控筛查值, 含量整体处于正常水平。②研究区 RI 指数的变化范围为 50.75~179.07, 生态风险轻微、中等、较强的样点分别占 29.37%、63.63% 和 7%, 说明研究区整体处于中等生态风险等级。③PMF 模型结果表明, 研究区土壤重(类)金属主要来自于自然因素 (48.88%), 其含量与地质背景密切相关; 其次为农业生产 (31.63%), 大量化肥、农药的使用导致耕地区重(类)金属含量较高; 煤炭燃烧 (12.20%) 和交通运输 (7.29%) 对重(类)金属元素累积也有一定的贡献。

关键词: 土壤; 塔里木河下游; 垦区; 地球化学特征; 生态风险

中图分类号: P66; X142

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2025)02-0302-11

Geochemical Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Lower Tarim River Reclamation Area

LIU Jingyu^{1,2}, YIN Fang^{3,*}, QIAN Han⁴, JIANG Lei², WU Tingting², LIU Lei¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang 'an University, Xi 'an 710054, shaanxi, China; 2. Urumqi Natural Resources Comprehensive Survey Center of China Geological Survey, Urumqi 830057, Xinjiang, China; 3. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, shaanxi, China; 4. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

收稿日期: 2023-01-17; 修回日期: 2023-09-20; 责任编辑: 贾晓丹

基金项目: 中国地质调查局项目“南疆地区盐渍化区(巴州)生态地质调查”(DD20191026), 中国地质调查局项目“环塔里木盆地绿洲区土壤盐渍化现状调查评价”(DD20220872), 中央高校基本科研业务费专项资金项目“陕北矿区生态修复的水土环境效益及现状”(300102353501)联合资助。

作者简介: 刘靖宇(1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事干旱区土壤环境质量调查评价工作。E-mail: liujingyu@mail.cgs.gov.cn。

* 通讯作者: 尹芳(1983-), 女, 博士, 副教授, 主要从事资源环境评价方面的研究。E-mail: yinf@chd.edu.cn。

Abstract: To identify the geochemical characteristics and potential ecological risk of heavy metals in soils of the lower Tarim River reclamation area, 125 surface soil samples were collected and their As, Hg, Ni, Cr, Cu, Zn, Cd and Pb concentrations and pH values were determined. The potential ecological risk of soil heavy metals was evaluated based on geostatistics, Nemerow Comprehensive Pollution Index(Pn) and Potential Ecological Risk Index(RI), and the sources of heavy metals were analysed using Positive Matrix Factorization (PMF). The results show that: ①The average values of all heavy (class) metal elements in the study area did not exceed the national screening values for soil pollution risk control on agricultural land, and the levels were generally at normal levels. ②The range of variation of the index in the study area was 50.75 to 179.07, with 29.37%, 63.63% and 7% of the sample points with slight, medium and strong ecological risk respectively, indicating that the study area as a whole was in the medium ecological risk class. ③The results of the PMF model show that the heavy (class) metals in the study area come mainly from natural factors (48.88%) and their content is closely related to the geological background; followed by agricultural production (31.63%), the use of large amounts of chemical fertilisers and pesticides leads to a high content of heavy (class) metals in the cultivated area; coal combustion (12.20%) and transportation (7.29%) also contribute to the accumulation of heavy (class) metal elements. Coal combustion (12.20%) and transportation (7.29%) also contribute to the accumulation of heavy (class) metals.

Keywords: soil; Lower Tarim River; reclamation area; geochemical characteristics; ecological risk

土壤是人类工农业生产的基础性资源,随着工业集约化、农村城镇化以及农业现代化进程的不断加快,土壤环境问题日益突出,其中,土壤重(类)金属污染是影响土壤环境的重要因素,其具有污染面积广、存在时间长、生态危害大等特点,且可通过食物链进入身体,危害人类健康(Zhuang et al., 2017),因此对土壤重(类)金属监测、溯源及治理已成为研究热点问题(Cai et al., 2012)。

近年来,国内外学者围绕土壤重(类)金属污染的特征、空间分布以及生态风险进行了系统研究(郑行泉, 2018; Chai et al., 2021),通过实地采样、室内分析和模型开发相结合(王海江等, 2017),利用地统计学(张慧文等, 2009)、GIS(王幼奇等, 2016)等手段构建重金属元素的空间分布格局。目前单因子指数法、内梅罗指数法和潜在生态危害指数法是土壤重金属风险评价的常用方法,单因子指数法(汪家权等, 2002)结果仅反映某种重金属的污染程度,无法综合评估重金属在土壤中的污染程度;内梅罗指数法(息朝庄等, 2008)虽综合各重(类)金属元素的协同效应,但是并没有考虑到受体受到污染物的毒性危害程度;潜在生态危害指数法(王幼奇等, 2016)在全面考虑了土壤重金属含量和重金属的环境效应、生态效应、毒理效应等基础上,综合反映出重(类)金属对生态环境的影响,具有快速、准确、简便等特性,是目前开展土壤重(类)

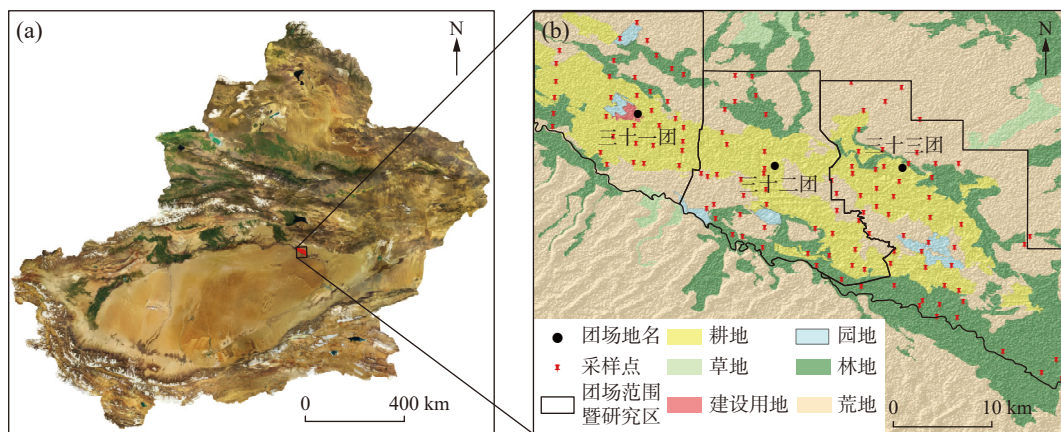
金属污染风险评价最常用的评价方法。主成分分析法(PCA)(孟晓飞等, 2022)、正定矩阵因子(PMF)(叶盼青等, 2022)等方法常用于解析土壤重金属的来源,其中,PMF源解析模型是最为广泛的受体模型之一,其具有不需要测量源指纹谱、分解矩阵中元素非负、可以利用数据标准偏差来进行优化等优点,是美国环保总署(USEPA)推荐使用的重金属来源解析方法(曾妍妍等, 2017; 麦尔耶姆·亚森等, 2017; 麦提吐尔逊·艾则孜等, 2018; 比拉力·依明等, 2019; 尹芳等, 2021)。目前,这些土壤重金属研究评价工作主要集中于中东部发达城市,新疆区内的相关研究也主要集中于天山北坡经济带及其他主要工业聚集区,塔里木河流域作为南疆地区经济社会可持续发展和生态系统安全保障的主要载体,前人已在流域内不同地区开展了土地利用变化、水资源承载力等相关研究(冯娟, 2015),但就绿洲土壤重(类)金属含量特征及潜在生态风险的研究相对较少。

基于此,笔者以塔里木河下游农二师塔里木垦区为研究区,采集土壤样品 125 件,对其中 7 项重金属元素(镉、汞、铅、铬、铜、镍、锌)、1 项类金属元素(砷)及 pH 值进行测定,采用地统计学、内梅罗综合污染指数法、潜在生态风险指数法和正定矩阵因子模型,对各元素空间分布、生态风险及来源进行解析,拟为该垦区土壤环境评价和污染治理提供科学依据。

1 区域背景

研究区(E 86°86′~87°35′, N 40°59′~40°98′)位于塔克拉玛干沙漠东北缘(图1),属塔里木河流域下游冲积平原,面积约 864.4 km²。研究区气候属于暖温带大陆性干旱气候,年平均气温 11.4℃,降水量与蒸发量比值约为 1:116。区内主要土壤类

型为棕漠土、灌淤土、灌淤土和风沙土,土壤有机质偏低,呈“缺磷、少氮、富钾”的特点。区域自然植被以胡杨(*Populus euphratica*)、怪柳(*Tamarix ramosissima*)、罗布麻(*Apocynum venetum*)和骆驼刺(*Alhagi maurorum*)为主,盛产棉花、香梨、红枣、鹿茸、葡萄、罗布麻、黑枸杞、牛羊肉等农产品,是中国主要的棉花、库尔勒香梨生产基地、马鹿繁育基地和蛭石生产基地。



a. 新疆维吾尔自治区遥感影像图; b. 研究区土地利用类型图

图1 研究区及采样点位置图

Fig. 1 Location diagram of the study area and the sampling point

2 研究方法

2.1 样品采集与处理

2019 年 6~8 月,在对研究区进行综合研究的基础上,以耕地、园地、林地和荒地 4 种土地利用类型为基底,采用棋盘式采样法,布设采样点 125 个,采样深度为 0~30 cm。利用美国 AMS 公司土壤取样器对每个样点采集土壤样品 3 kg,去除枯枝落叶等杂质后装入洁净的样品袋内。室温自然风干后过 20 目尼龙筛,留取 300 g 样品备用。实际采样过程中,为避免人为活动、交通运输等对结果的影响,对采样点的具体位置进行适当调整。

样品委托新疆有色地质勘查局测试中心进行分析,标准参照《区域地球化学样品分析方法》(DZ/T 0279—2016)。Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 含量利用美国赛默飞世尔 Xseries II 等离子体质谱仪测定,As 含量采用美国赛默飞世尔 XP+荧光光谱仪测定,Hg 含量用国产双道原子荧光分光光度计测定,Cd 含量用日本日立 Z-2010 原子吸收分光光度计测定,pH 值利用离子选择电极测定仪测定。测定过程质量控制通过全程序空白、国家

土壤标准物质(GBW 07544)、平行样测定实现,全流程空白均未检出,标准样品测定误差为-1.6%~3.2%,平行样测定标准偏差为 1.3%~3.7%,pH 值偏差不超过 0.12,均满足质控要求,测定结果真实可信。As、Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd 和 Pb 元素的检出限分别为 0.200 mg/kg、0.005 mg/kg、0.200 mg/kg、0.600 mg/kg、0.600 mg/kg、0.030 mg/kg、0.05 mg/kg 及 0.500 mg/kg。

2.2 数据处理

采用 Excel 对数据进行预处理,利用 SPSS 24.0 进行描述性统计分析,使用 GS+9.0 进行地统计学参数分析,利用 ArcGIS 10.2 制作空间分布图。通过 EPA PMF 5.0 软件对重(类)金属元素来源进行解析。

2.3 评价方法

采用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法评价研究区的重(类)金属污染状况,采用潜在生态风险指数法确定土壤生态风险等级,使用正定矩阵因子模型解析土壤重(类)金属来源。

2.3.1 单因子污染指数法(P_i)

直观反映污染元素在土壤环境中的具体情况,是常用的重(类)金属污染评价方法(陈锦等,2020)。计算公式为:

$$P_r = C_r / S_r \quad (1)$$

式中: C_r 为元素 r 实测值(mg/kg); S_r 为相应元素的土壤背景值(mg/kg), 文中标准参照新疆土壤元素

背景值(表1)。单因子污染指数法评价标准为: $P_r \leq 1$, 无污染; $1 < P_r \leq 2$, 轻度污染; $2 < P_r \leq 3$, 中度污染; $P_r \geq 3$, 重度污染。

表1 土壤重(类)金属描述性统计表(n=125)

Tab. 1 Descriptive statistics of soil heavy metals(n=125)

元素	最小值 (mg/kg)	最大值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准差 (mg/kg)	偏度	峰度	变异 系数(%)	新疆背景值 (mg/kg)	国家筛查值 (mg/kg)
As	2.40	24.60	9.63	3.71	1.07	1.49	38	11.20	25.00
Hg	0.01	0.03	0.01	0.01	0.89	-0.04	42	0.02	3.40
Cr	23.29	75.70	42.19	10.48	0.69	0.12	25	49.30	250.00
Ni	11.71	39.20	21.39	5.61	0.55	-0.18	26	26.60	190.00
Cu	8.92	40.90	18.96	6.79	0.93	0.62	36	26.70	100.00
Zn	29.68	93.10	52.15	13.91	0.53	-0.32	27	68.80	300.00
Cd	0.07	0.26	0.14	0.04	0.72	0.46	26	0.12	0.60
Pb	10.08	32.58	17.48	3.06	1.29	3.79	17	19.40	170.00
pH	8.01	9.46	8.66	0.29	0.25	0.05	3.3	—	—

注: 背景值参照新疆土壤元素地球化学背景值(2011)(叶盼青等, 2022)。

2.3.2 内梅罗综合污染指数法(P_n)

综合各重(类)金属元素的协同效应, 突出最富集元素对环境的污染危害, 同时反映多元素对土壤的综合污染程度(奉大博等, 2022; 王雪婷, 2022)。计算公式为:

$$P_n = \sqrt{(P_{rmax}^2 + P_{ravg}^2)/2} \quad (2)$$

式中: P_{rmax} 为重(类)金属单因子污染指数最大值; P_{ravg} 为重(类)金属单因子污染指数平均值。内梅罗综合污染指数法评价标准为: $P_n \leq 1$, 无污染; $1 < P_n \leq 2$, 轻度污染; $2 < P_n \leq 3$, 中度污染; $P_n \geq 3$, 重度污染。

2.3.3 潜在生态风险指数法(RI)

突出重(类)金属元素的生态、环境和毒理效应, 根据单因子污染指数计算各重(类)金属生态风险指数, 最后综合各重(类)金属元素生态风险指数获得研究区潜在生态风险等级(Nalan et al., 2020; Ajani et al., 2021)。计算方法如下:

(1) 单项重(类)金属的潜在生态风险指数

$$E_r = T_r \times P_r \quad (3)$$

式中: P_r 为单因子污染指数; T_r 为重(类)金属毒性响应系数, 笔者参考沉积学毒性系数(林丽钦, 2009)。

(2) 综合潜在生态风险指数

$$RI = \sum E_r \quad (4)$$

式中: E_r 为各单项重(类)金属的潜在生态风险指数。

2.3.4 正定矩阵因子(PMF)源解析模型

土壤中重(类)金属元素的来源复杂, 其途径既可以是单一性, 也可以是多元性。笔者通过 PMF 模型对研究区土壤重(类)金属元素的主要来源进行解析。系统导入各元素的原始数据、不确定度数据, 依次确定各元素的信噪比、因子数、拟合精度等相关参数, 使其满足规范要求。

PMF 模型将样品各元素浓度矩阵(X_{ij})分解成源贡献因子矩阵(G_{ij})、源成分谱因子矩阵(F_{ik})和残差矩阵(E_{kj}), 通过求解定量识别各重(类)金属来源的贡献率(陈明等, 2022), 具体公式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p G_{ij} F_{ik} + E_{kj} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为第 i 个样品中第 j 个元素的含量; G_{ij} 为第 j 个源对第 i 个样品的贡献; F_{ik} 为第 k 个源中第 j 个元素的含量; E_{kj} 是残差矩阵。

PMF 模型通过最小二乘法经多次迭代运算得到目标函数 Q , 从而得到最优的因子矩阵和源剖面。目标函数 Q 的定义如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{X_{ij} + \sum_{k=1}^p G_{ij} F_{ik}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: U_{ij} 为第 i 个样品第 j 个元素的不确定度:

$$U_{ij} = 5/6 \times MDL \quad (C \leq MDL) \quad (7)$$

$$U_{ij} = \sqrt{(C \times RSD)^2 + (MDL/2)^2} \quad (C > MDL) \quad (8)$$

式中: C 为重(类)金属元素含量, mg/kg; RSD 为

相对标准偏差; *MDL* 为方法检出限, 参考分析测试标准数据。

3 研究结果

3.1 土壤重(类)金属含量统计特征

由表 1 可知, 研究区土壤中 As、Hg、Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 8 种元素的均值分别为 9.63 mg/kg、0.01 mg/kg、42.19 mg/kg、21.39 mg/kg、18.96 mg/kg、52.15 mg/kg、0.14 mg/kg 和 17.48 mg/kg, 其中 Cd 均值

是新疆土壤地球化学背景值的 1.17 倍, 其他元素均值低于新疆土壤地球化学背景值, 所有元素的均值未超过国家农业用地土壤环境质量标准(GB15618-2018)中规定的风险筛查值。

偏度和峰度分别描述了样本数据分布的对称和高低程度。由表 2 可知, 偏度方面: 所有元素的偏度均大于 0, 特别是 As、Pb 元素的偏度大于 1, 处于正偏态。峰度方面: 除 Pb 元素峰度大于 3 外, 其他元素的峰度均小于 1。说明部分采样点重(类)金属含量较高, 处于区域异常状态。

表 2 相关理论参数及最优拟合模型

Tab. 2 Related theoretical parameters and optimal fitting model

元素	理论模型	块金值 C_0	基台值 Sill	块金比 (%)	变程 (m)	决定系数 R^2	残差 RSS
As	指数	0.02	0.14	0.89	4 920.00	0.77	6.10×10^{-5}
Hg	高斯	0.02	0.14	0.84	3 222.00	0.18	1.08×10^{-4}
Cr	指数	0.01	0.06	0.87	4 200.00	0.35	9.66×10^{-5}
Ni	指数	0.01	0.07	0.89	3 570.00	0.22	4.01×10^{-5}
Cu	指数	0.01	0.12	0.89	2 520.00	0.23	1.16×10^{-4}
Zn	指数	0.01	0.07	0.89	3 240.00	0.24	4.20×10^{-5}
Cd	高斯	0.01	0.06	0.83	2 286.00	0.24	5.15×10^{-5}
Pb	高斯	0.00	0.04	0.83	3 186.00	0.38	8.35×10^{-6}
pH	高斯	0.00	0.00	0.84	3 984.00	0.21	1.76×10^{-8}

变异系数(CV)反映了数据的变异程度, CV 值越大, 表明元素在各个采样点中含量差异越大(陈喜等, 2022)。由表 2 可知, 除 As、Hg 元素属于强变异外, 其他元素均处于中等变异水平, 说明部分区域存在重(类)金属含量异常现象。受研究区干旱少雨气候的控制, 元素迁移聚集受限, 导致异常点零星分布。土壤 pH 值介于 8.01~9.46, 平均值为 8.66, 呈强碱性, 其偏度、峰度和变异系数分别为 0.25、0.05 和 3.3%, 说明区内土壤 pH 值变化幅度较小。

3.2 土壤重(类)金属含量空间分布规律

土壤是时空连续体, 受多种成土因素的共同控制, 成土因素的变化易导致土壤理化性质发生改变, 致使其空间分布非均一。由于土壤样品仅代表采样点本身的性质, 为准确表达各元素的空间分布规律, 借助 GIS 和地统计学理论, 利用克里金(Kriging)插值构建空间模型, 分析各元素的空间分布格局(胡明等, 2021)。通过 GS+9.0 软件确定相关参数及最优拟合模型(表 2), 利用 ArcGIS 10.2 简单克里金插值模块对已知点位数据空间插值估计未采样点的属性值, 绘制了

研究区土壤重(类)金属元素空间分布图。

由图 2a~图 2h 可知, 8 种元素的分布范围各不相同, 但高值区均主要集中在研究区的西北和东南部, 呈现环岛状分布格局。As、Ni 及 Pb 元素分布表现出相对的一致性, 含量高值区在西北和东南部分布面积较广, 中部零星分布。Hg、Cr 和 Cd 元素也在东南部出现较大范围含量高值区。Cu 和 Zn 元素含量整体较低, 仅在东南部小范围出现高值区。前人研究发现, 土壤 pH 对土壤重(类)金属的影响主要体现在两方面, 一方面是其决定着元素的形态、溶解度和有效性, 另一方面是影响元素在固相土粒上的专项吸附能力(杨秀敏等, 2017; 杨淑媛, 2022)。由图 2i 发现, 区内 pH 值空间分布呈现“西北高、东南低”, 与土壤中各重(类)金属的空间分布格局一致性较差, 表现出一定的负相关关系。原因可能是随着 pH 值升高, 土壤阳离子交换量上升, 阳离子的吸附量和吸附能力加强, 导致西北部土壤重(类)金属的溶解态减少、颗粒态增多, 一定程度影响着重(类)金属元素的空间分布格局。

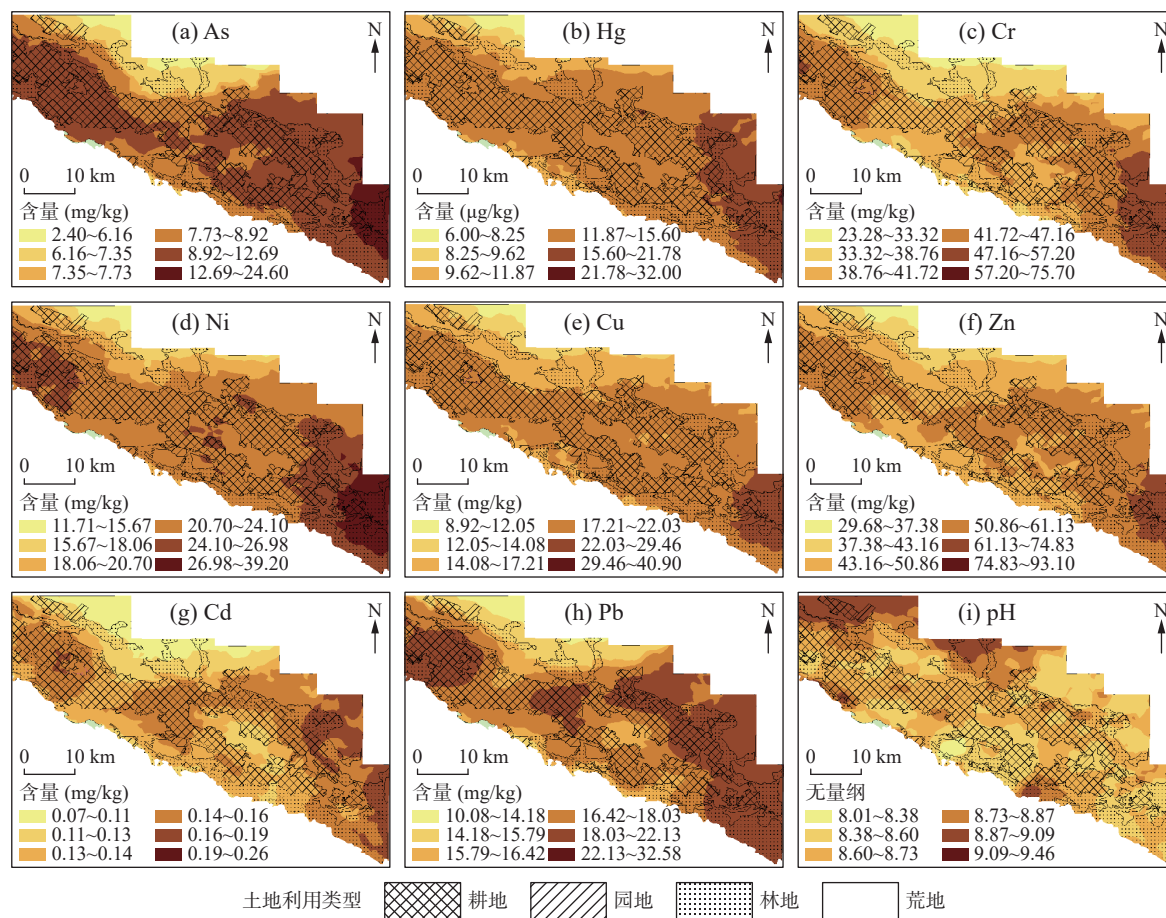


图2 研究区土壤重(类)金属含量空间分布示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the spatial distribution of soil heavy metal content in the study area

综上所述,研究区的东南部是土壤重(类)金属含量高值的集中分布区,其次是西北部,中部地区各元素含量值较低。结合野外采样实际可知,三十三团五连、九连、十连及营建连等是土壤重(类)金属含量高值的分布区,同时这里也是当地规模化农业种植的重点区域。

3.3 土壤重(类)金属污染特征和空间分布规律

研究区土壤各重(类)金属的单项污染指数(P_r)平均值大小顺序依次为: $Cd(1.16) > Pb(0.90) > As(0.86) = Cr(0.86) > Hg(0.85) > Ni(0.80) > Zn(0.76) > Cu(0.71)$ 。根据 P_r 分级标准,区内 Cd 元素属于轻度污染,其他元素属于无污染。

由表3可知, Hg、Cr、Ni、Cu、Zn 和 Pb 等 6 种元素无污染样点数的占比均超 70%。Cd 元素有 60.83% 的样点处于轻度污染状态。同时, 0.7% 点位 As、Cd 元素处于中等污染水平,表明 Cd、As 是引起研究区土壤重(类)金属污染的主要元素。 P_n 变化范围为 0.61~1.95, 平均值为 1.04, 且轻度污染样本占比大于

无污染样本,根据其分级标准,说明研究区处于轻度污染水平。根据计算的 P_r 和 P_n 指数,利用 Arcgis10.2 的普通克里金插值模块,绘制了各元素的 P_r 和 P_n 指数的空间分布图(图3)。由图3a~图3h可知,各元素 P_r 指数的空间分布格局各不相同,其中 Cu 元素表现为全域无污染; Zn 元素仅在东南部出现了零星分布的轻度污染区,整体上也处于无污染水平; Cd 是研究区污染面积最大、程度最高的元素; As、Hg、Cr、Ni 和 Pb 等 5 种元素在研究区东南部出现了小面积的轻度污染区。从 P_n 指数的空间分布情况来看(图3i),除正北向部分区域和南部零星地区无污染外,整个研究区基本处于轻度污染水平,其中以东南部最为集中。

3.4 土壤重(类)金属潜在生态风险评价

结合上述分析发现, P_n 指数在评价过程中突出了 P_r 指数最大的重金属元素对土壤污染影响,使 Cd 元素在 P_n 指数中占比过大,导致评价灵敏性不足,无形中增大了土壤重金属污染的面积和程度,无法全面反映研究区土壤重金属污染的综合特征,这与其他学者

表 3 不同污染级别的样本数占总样本数的百分数(n=125)

Tab. 3 The number of samples with different contamination levels is a percentage of the total number of samples (n=125)

指数	元素	无污染	轻度污染	中度污染	重度污染
单因子污染指数 (P_r)	As	69.93%	29.37%	0.70%	0
	Hg	72.03%	29.97%	0	0
	Cr	78.32%	21.68%	0	0
	Ni	81.82%	18.18%	0	0
	Cu	88.81%	11.19%	0	0
	Zn	86.71%	13.29%	0	0
	Cd	38.46%	60.83%	0.70%	0
	Pb	78.32%	21.68%	0	0
内梅罗综合污染指数 (P_n)	—	48.95%	51.05%	0	0

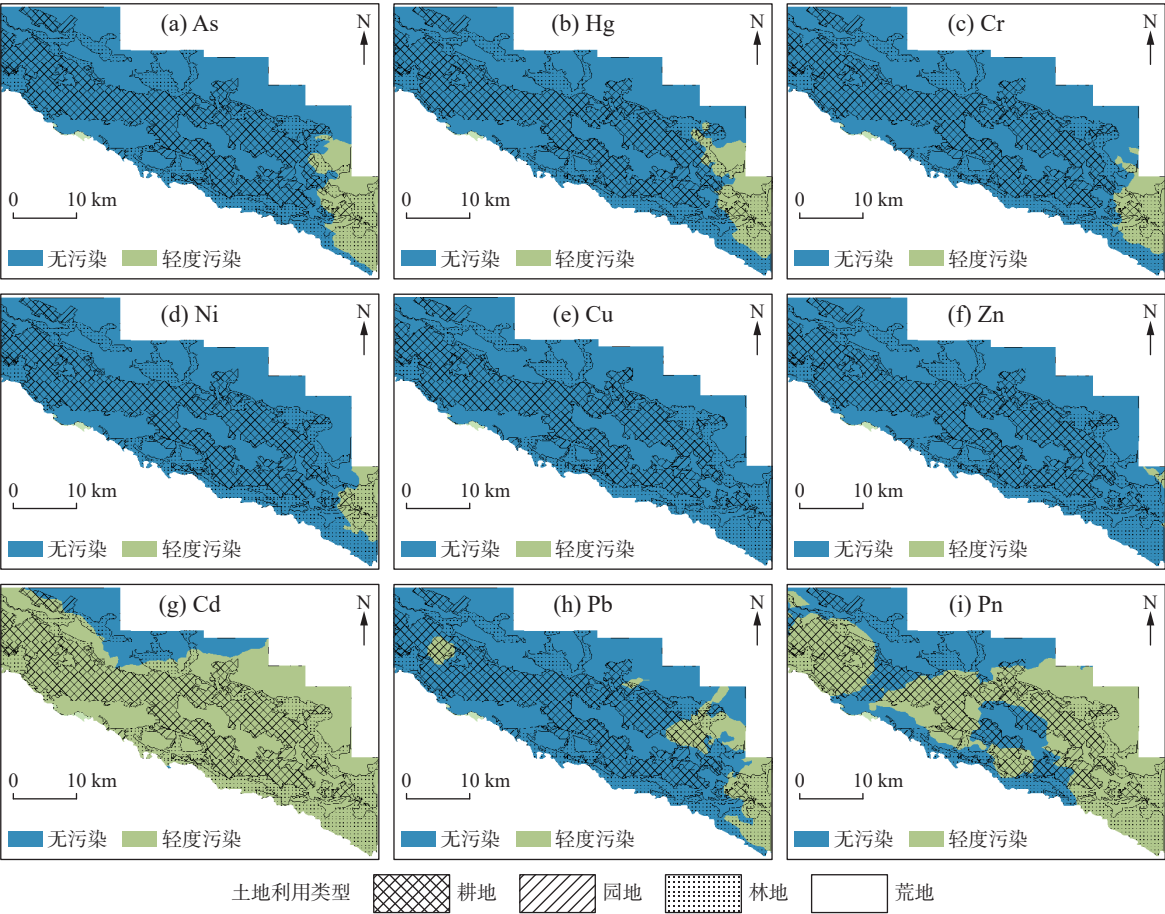


图3 土壤重(类)金属的 P_r 和 P_n 空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution map of P_r and P_n of soil heavy metals

在相邻研究区的结论较一致(阿吉古丽·马木提等, 2017)。同时, 由于各重(类)金属元素之间毒性响应系数差异较大, 为确保评价结果的准确性, 需要对潜在生态风险评价标准进行优化。参考相关文献(马建华等, 2020; 吴梅等, 2023), 借鉴前人研究成果(阿吉

古丽·马木提等, 2017), 对研究区潜在生态风险评价标准进行调整如下(表 4)。

由表 5 可知, 除 Cd 和 Hg 元素外, 其他元素的 E_r 指数均小于 30, 生态风险等级为轻微。Cd、Hg 元素属于中等生态风险样点数占比分别为 61.54%、53.85%,

表 4 调整前后潜在生态风险评价标准

Tab. 4 Evaluation criteria of potential ecological risks before and after adjustment

指标		生态危害等级				
		轻微	中等	强	很强	极强
调整前	单项生态风险指数 (E_r)	< 40	40~80	80~160	160~320	> 320
	综合生态风险指数 (RI)	< 150	150~300	300~600	> 600	
调整后	单项生态风险指数 (E_r)	< 30	30~60	60~120	120~240	> 240
	综合生态风险指数 (RI)	< 70	70~140	140~280	> 280	

表 5 潜在生态风险评价

Tab. 5 Assessment of potential ecological risks

		潜在生态风险系数 (E_r)							综合潜在生态 污染指数 (RI)
元素		As	Hg	Cr	Ni	Cu	Zn	Cd	
最小值		2.14	14.12	0.94	2.20	1.67	0.43	18.32	50.75
最大值		21.96	75.29	3.07	7.37	7.66	1.35	66.00	179.07
均值		8.60	34.03	1.71	4.02	3.55	0.76	34.76	91.93

生态风险等级为中等,说明 Hg、Cd 是研究区土壤生态风险等级上升的主控元素。同时 RI 指数的变化范围为 50.75~179.07,属于轻微、中等、较强生态风险的样点数分别占比 29.37%、63.63% 和 7.00%,说明研究区整体生态风险等级为中等。

4 土壤重(类)金属来源解析

通过 PMF 模型对 125 个土壤样品进行解析,得到研究区土壤重(类)金属来源的贡献谱。由图 4 可知,因子 1 的主载荷元素为 As,贡献率为 76.1%。结合图 2 可知,区内 As 含量空间分布差异性较大,其含量高值区主要集中于研究区东南部,靠近塔里木河下游,说明重(类)金属的空间分布受到地表水、地下水等水文环境的影响。前人研究表明,研究区北部的天山山脉岩石中含砷矿物,受大气降水、冰川融水的影响,导致了岩石中的 As 元素的渗出,为区内土壤中 As 元素的富集提供了丰富的物源。同时,因子 2 的主载荷元素为 Cu、Cr、Ni 和 Zn,贡献率分别为 40%、34%、33.5% 和 28.10%。由重(类)金属元素的空间分布(图 2)可得,Cu、Cr、Ni 和 Zn 空间分布较为一致,表现出显著的相关性,且在研究区东南含量较高,受地形和水动力条件的影响,土壤重(类)金属元素的迁移、活化和富集主要集中在东南部。Cu、Cr 和 Ni 是亲铁元素,在自然界与铁共生。从地质背景分析,它们一般由基性或超基性岩等岩浆来源较深的岩石发育而来,主要与成

土母质中的暗色矿物如角闪石、辉石等含量有关(曹佰迪等, 2022)。从化学反应分析,这 4 种元素活性较弱,难以与氧或弱酸发生化学反应,它们在氧化、碱性环境下,母岩风化产物较难发生转化(冯博鑫等, 2023)。且 Cu、Cr、Ni 和 Zn 元素的均值均小于新疆土壤背景值,整体受污染程度较小,人类活动影响较小。因此认为其来源与地质背景密切相关。故因子 1、因子 2 可代表自然因素源。

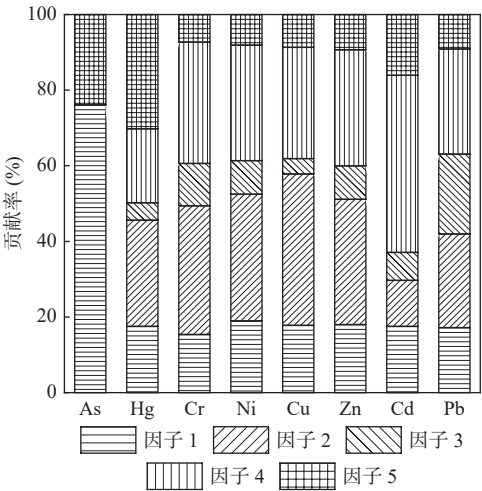


图4 重(类)金属 PMF 因子贡献率图

Fig. 4 Contribution rate of heavy metal PMF factors

因子 3 的主载荷元素为 Pb,贡献率分别为 21.10%。相关研究证实,Pb 元素是机动车尾气排放的主要污染物(Begum et al., 2010),特别是 Pb 常被作为交通来源的识别性元素(余飞等, 2023),加之 Pb 元素拥有较长

的半衰期,易富集。贯穿研究区的 218 国道,是新疆主干交通网络,车辆众多,且以大型货车为主。加之研究区属农业集中区,各类农业机械出入频繁,轮胎磨损、尾气排放等一定程度上增加了 Pb 等元素的积累。故因子 3 可代表交通运输源。

因子 4 的主载荷元素为 Cd, 贡献率分别为 46.80%。农业土壤中 Cd 的主要来源通常是含有无机化合物和矿物质的农用化学品、化肥和农药。长期使用过量的化肥和农药是导致表层土壤 Cd 富集的主要原因,因此 Cd 元素常被用作农药和化肥等使用的标识(Gray et al., 1999)。研究区土地利用类型以耕地为主,棉花、香梨等经济作物的大规模种植,需要消耗大量的化肥和农药,同时,由图 2g 可知,Cd 含量高值区业主要集中于耕地范围内,区内土壤盐渍化较为严重,为保障农业种植,当地常在灌溉水中添加矿源黄腐酸钾,用来改良土壤,该添加剂的长期使用也可导致 Cd 等重(类)金属元素的富集。故因子 4 可代表农业生产源。

因子 5 的主载荷元素为 Hg, 贡献率分别为 30.20%。前人研究表明土壤中 Hg 的来源与煤炭有关(Hu et al., 2018), Hg 蒸气主要通过沉降的方式进入土壤,沉积的主要来源有热电燃烧煤、企业燃煤加热器等(周雪明等, 2017)。研究区为南疆主要城市群之一,生产生活电力需求大,易导致重(类)金属元素积累。故因子 5 可代表煤炭燃烧源。

结合以上数据,计算各重(类)金属来源的贡献比例(图 5),其中自然因素(48.88%)对土壤重(类)金属来源的贡献率最大,其次为农业生产(31.63%),同时交通运输(7.29%)和煤炭燃烧(12.20%)也引起部分地区的重(类)金属富集。

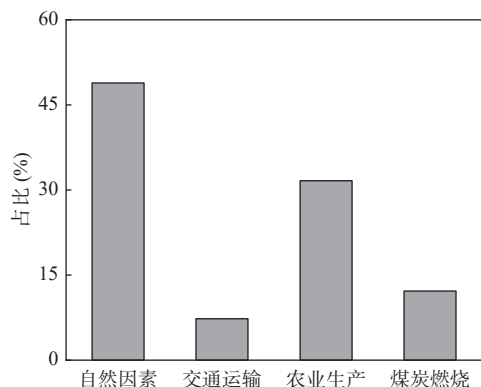


图5 不同污染源贡献率图

Fig. 5 Contribution rate of different pollution sources

5 结论

(1)研究区 Cd 元素的均值是其土壤背景值的 1.17 倍,其他元素均值都未超过新疆背景值,所有元素的均值未超过国家风险筛查值。说明研究区土壤重(类)金属含量整体处于正常水平,土壤环境质量相对较好。

(2)研究区 Cd 元素有 60.83% 的样点处于轻度污染状态,从 P_r 指数和 P_n 指数的空间分布格局来看,研究区污染面积最大、程度最高的元素也是 Cd 元素,因此 Cd 元素的污染需要引起关注。总的来说,研究区土壤重(类)金属污染程度不高,处于轻度水平。

(3)Hg 和 Cd 中等生态风险样点数分别占比 53.85%、61.54%,生态风险为中等,其他元素为轻微级。同时 RI 指数的变化范围为 50.75~179.07,属于轻微、中等、较强生态风险的样点数分别占比 29.37%、63.63% 和 7%。说明研究区基本处于中等生态风险等级,风险形势整体可控。

(4)PMF 源解析结果表明,研究区自然因素(48.88%)对土壤重(类)金属来源的贡献率最大,其次为农业生产(31.63%),交通运输(7.29%)和煤炭燃烧(12.20%)对重(类)金属元素积累的贡献相对较少。

参考文献(References):

- 阿吉古丽·马木提, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 开都河下游绿洲耕地土壤重金属污染及潜在生态风险[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2331-2341.
- MAMUT Ajigul, EZIZ Mamattursun, MAMUTI Aniwar, et al. Heavy metal contamination and potential ecological risks in the soil of the lower Kaidu River oasis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(6): 2331-2341.
- 比拉力·依明, 阿不都艾尼·阿不里, 师庆东, 等. 基于 PMF 模型的准东煤矿周围土壤重(类)金属污染及来源解析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(9): 185-192.
- BILAL Imin, ABDUGHENI Abliz, SHI Qingdong, et al. Analysis of heavy metal pollution and sources in soils around Zhundong coal mine based on PMF model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(9): 185-192.
- 曹佰迪, 李文明, 周一凡, 等. 鄱阳湖流域沉积物中重金属元素分布特征及生态风险浅析[J]. 西北地质, 2022, 55(4): 343-353.
- CAO Baidi, LI Wenming, ZHOU Yifan, et al. Distribution characteristics and ecological risks of heavy metal elements in sediments of Poyang Lake basin[J]. Northwestern Geology, 2022, 55(4):

- 343–353.
- 陈锦, 郭锦. 单因子法及综合污染指数法在矿山土壤重金属污染评价中的应用[J]. *世界有色金属*, 2020, (9): 281–282.
- CHEN Jin, GUO Jin. Application of single factor method and integrated pollution index method in the evaluation of heavy metal pollution in mine soils[J]. *World Nonferrous Metals*, 2020, (9): 281–282.
- 陈明, 王琳玲, 曹柳, 等. 基于 PMF 模型的某铅锌冶炼城市降尘重金属污染评价及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 44(6): 3450–3462.
- CHEN Ming, WANG Linling, CAO Liu, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution from dustfall in a lead-zinc smelting city based on PMF model[J]. *Environmental Science*, 2022, 44(6): 3450–3462.
- 陈喜, 黄日超, 黄峰, 等. 西北内陆河流域水循环和生态演变与功能保障机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 12–21.
- CHEN Xi, HUANG Richao, HUANG Feng, et al. Study on water cycle and ecological evolution and function guarantee mechanism of inland river basins in Northwest China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 12–21.
- 冯博鑫, 徐多勋, 张宏宇, 等. 基于最小数据集的周至地区土壤重金属地球化学特征及成因分析[J]. *西北地质*, 2023, 56(1): 284–292.
- FENG Boxin, XU Duoxun, ZHANG Hongyu, et al. Geochemical characteristics and genesis of heavy metals in soils of Zhouzhi area based on minimum data set[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(1): 284–292.
- 冯娟. 浅析实施塔里木河干流下游生态输水工程的重要意义[J]. *中国水运*, 2015, 15(2): 138–139.
- FENG Juan. An analysis of the importance of implementing the ecological water transfer project in the downstream of the main stream of Tarim River[J]. *China Water Transport*, 2015, 15(2): 138–139.
- 奉大博, 董树义, 杨棣, 等. 广东韶关乐昌铅锌矿土壤重金属污染特征及评价[J]. *矿物岩石*, 2022, 42(3): 123–133.
- FENG Dabo, DONG Shuyi, YANG Di, et al. Characteristics and evaluation of heavy metal contamination in soils of Shaoguan Lechang Pb-Zn mine, Guangdong[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2022, 42(3): 123–133.
- 胡明, 薛娇, 严玉林, 等. 北京市特征河流沉积物重金属污染评价与来源解析[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(23): 73–81.
- HU Ming, XUE Jiao, YAN Yulin, et al. Evaluation and source analysis of heavy metal pollution in sediments of characteristic rivers in Beijing[J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(23): 73–81.
- 林丽钦. 应用毒理学安全评价数据推算重金属毒性系数的探讨: 2009 重金属污染监测、风险评价及修复技术高级研讨会[C], 中国山东青岛, 2009.
- 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. *地理研究*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- MA Jianhua, HAN Changxu, JIANG Yuling. Some issues in the application of potential ecological risk index method[J]. *Geographical Research*, 2020, 39(6): 1233–1241.
- 麦尔耶姆·亚森, 买买提·沙吾提, 尼格拉·塔什甫拉提, 等. 渭干河-库车河绿洲土壤重金属分布特征与生态风险评价[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(20): 226–233.
- YASEN Maierymu, SAWUT Mamat, TAXIPULATI Nigela, et al. Characteristics of heavy metal distribution and ecological risk evaluation in the oasis soil of Weigan River-Kuche River[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(20): 226–233.
- 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提. 新疆焉耆盆地辣椒地土壤重金属污染及生态风险预警[J]. *生态学报*, 2018, 38(3): 1075–1086.
- EZIZ Mamattursun, MAMUT Ajigul, MAMUTI Aniwar. Early warning of heavy metal pollution and ecological risk in pepperlands of Yanqi Basin, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(3): 1075–1086.
- 孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 等. 石家庄市栾城区农田土壤重金属分布特征及作物风险评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(9): 4779–4790.
- MENG Xiaofei, GUO Junmei, YANG Junxing, et al. Distribution characteristics of heavy metals in agricultural soils of Luancheng District Shijiazhuang and evaluation of crop risk[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(9): 4779–4790.
- 汪家权, 刘万茹, 钱家忠, 等. 基于单因子污染指数地下水质量评价灰色模型[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2002, (5): 697–702.
- WANG Jiaquan, LIU Wanru, QIAN Jiazhong, et al. A grey model for groundwater quality evaluation based on single factor pollution index[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2002, (5): 697–702.
- 王海江, 董天宇, 朱永琪, 等. 玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属剖面分布特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(11): 2216–2225.
- WANG Haijiang, DONG Tianyu, ZHU Yongqi, et al. Characterization of soil heavy metal profiles in long-term continuous crop cotton fields in the Manas River basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2216–2225.
- 王雪婷. 沈阳市农村土壤环境监测与重金属污染评价[D]. 沈阳: 辽宁大学, 2022.
- WANG Xueting. Monitoring the quality of rural soil environment and evaluation of heavy metal pollution in Shenyang[D]. Shenyang: Liaoning University, 2022.
- 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. *环境科学*, 2016, 37(2): 710–716.
- WANG Youqi, BAI Yiru, WANG Jianyu. GIS-based evaluation and distribution characteristics of soil heavy metal pollution in different functional areas of Yinchuan City[J]. *Environmental Science*, 2016, 37(2): 710–716.

- 吴梅, 刘属灵, 袁余洋, 等. 土壤重金属潜在生态风险指数法优化研究-以重庆市城口县为例[J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 473-480.
- WU Mei, LIU Shuling, YUAN Yuyang, et al. Optimization of the potential ecological risk index method for soil heavy metals in Chengkou County, Chongqing[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(2): 473-480.
- 息朝庄, 戴塔根, 黄丹艳. 湖南株洲市土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 中国地质, 2008, (3): 524-530.
- XI Chaozhuang, DAI Tagen, HUANG Danyan. Characteristics of soil heavy metals distribution and pollution evaluation in Zhuzhou, Hunan[J]. Geology in China, 2008, (3): 524-530.
- 杨淑媛. 植酸改性生物炭对土壤中 Pb、Zn、Cd 形态转化的影响研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.
- YANG Shuyuan. Study on the effect of phytate modified biochar on the morphological transformation of Pb, Zn, Cd in soil[D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2022.
- 杨秀敏, 任广萌, 李立新, 等. 土壤 pH 值对重金属形态的影响及其相关性研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(6): 79-83.
- YANG Xiumin, REN Guangmeng, LI Lixin, et al. Study on the influence of soil pH on heavy metal morphology and its correlation[J]. China Mining Magazine, 2017, 26(6): 79-83.
- 叶盼青, 阿不都艾尼·阿不里, 孙小丽, 等. 天山北坡经济带土壤重金属污染评价及来源分析[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4704-4712.
- YE Panqing, ABLIZ Abdugheni, SUN Xiaoli, et al. Evaluation and source analysis of soil heavy metal pollution in the economic zone on the north slope of Tianshan Mountain[J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4704-4712.
- 尹芳, 封凯, 尹翠景, 等. 青海典型工业区耕地土壤重金属评价及源解析[J]. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5217-5226.
- YIN Fang, FENG Kai, YIN Cuijing, et al. Evaluation and source analysis of heavy metals in arable soils of typical industrial areas in Qinghai[J]. China Environmental Science, 2021, 41(11): 5217-5226.
- 余飞, 王佳彬, 王锐, 等. 基于乡镇尺度的地质高背景区耕地土壤重金属来源分析与风险评价[J]. 环境科学, 2023, 44(5): 2838-2848.
- YU Fei, WANG Jiabin, WANG Rui, et al. Source analysis and risk assessment of heavy metals in arable soils in a high geological background area based on township scale[J]. Environmental Science, 2023, 44(5): 2838-2848.
- 张慧文, 马剑英, 张自文, 等. 地统计学在土壤科学中的应用[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2009, 45(6): 14-20, 27.
- ZHANG Huiwen, MA Jianying, ZHANG Ziwen, et al. Application of geostatistics in soil science[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2009, 45(6): 14-20, 27.
- 郑行泉. 重金属铜对动物的急性毒性试验[J]. 福建畜牧兽医, 2018, 40(5): 14-16.
- ZHENG Xingquan. Acute toxicity test of heavy metal copper to animals[J]. Fujian Animal Husbandry and Veterinary Medicine, 2018, 40(5): 14-16.
- 周雪明, 郑乃嘉, 李英红, 等. 2011~2012 北京大气 PM_{2.5} 中重金属的污染特征与来源分析[J]. 环境科学, 2017, 38(10): 4054-4060.
- ZHOU Xueming, ZHENG Naijia, LI Yinghong, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in atmospheric PM_{2.5} in Beijing from 2011 to 2012[J]. Environmental Science, 2017, 38(10): 4054-4060.
- 曾妍妍, 周金龙, 王松涛, 等. 新疆若羌县农田土壤重金属分布特征及污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(9): 87-91.
- ZENG Yanyan, ZHOU Jinlong, WANG Songtao, et al. Characteristics of heavy metal distribution and pollution evaluation in agricultural soils of Ruoqiang County, Xinjiang[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(9): 87-91.
- Ajani G E, Popoola S O, Oyatola O O. Evaluation of the Pollution Status of Lagos Coastal Waters and Sediments using Physico-chemical Characteristics Contamination Factor Nemerow Pollution Index Ecological Risk and Potential Ecological Risk Index[J]. International Journal of Environment and Climate Change, 2021, 2(4): 1-16.
- Begum B A, Biswas S K, Hopke P K. Key issues in controlling air pollutants in Dhaka, Bangladesh[J]. Atmospheric Environment, 2010, 45(40): 7705-7713.
- Cai L, Xu Z, Ren M, et al. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2012, 78(1): 2-8.
- Chai L, Wang Y, Wang X, et al. Quantitative source apportionment of heavy metals in cultivated soil and associated model uncertainty[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 215(1): 112150-112150.
- Gray C W, McLaren R G, Roberts A H C, et al. The effect of long-term phosphatic fertiliser applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New Zealand[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 1999, 54(3): 267-277.
- Hu W, Wang H, Dong L, et al. Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach[J]. Environmental Pollution, 2018, 237(3): 650-661.
- Nalan K, DENGÍZ O. Assessment of potential ecological risk index based on heavy metal elements for organic farming in micro catchments under humid ecological condition[J]. Eurasian Journal of Soil Science, 2020, 9(3): 194-201.
- Zhuang P, Lu H, Li Z, et al. Multiple exposure and effects assessment of heavy metals in the population near mining area in South China[J]. PLOS ONE, 2017, 9(4): 94484-94485.