

河北某矿区土壤重金属元素污染特征及来源分析研究

余明^{1,2,3,4}, 边朋沙^{2,4*}, 鲁倩^{2,4}, 车健^{2,4}, 张硕^{2,4}(1. 河北省地质矿产勘查开发局博士后科研工作站; 2. 河北省地质实验测试中心;
3. 河北农业大学作物学博士后科研流动站; 4. 河北省矿产资源与生态环境监测重点实验室)

摘要:为明确河北某矿区土壤重金属元素污染特征及来源,在研究区内选取10个采样点,共采集土壤样本100件;利用综合质量影响指数法计算土壤样本中重金属元素的含量,并与标准值和背景值对比,确定土壤是否存在重金属元素超标现象;利用主成分法与因子分析确定重金属元素来源,同时结合多元线性回归模型得到污染源的贡献率;研究了重金属在土壤和农作物等不同介质中横向和纵向迁移规律。结果发现:研究区内土壤含有不同量的Cu、Cr、Zn、Ni、As元素,且均出现严重超标现象;重金属元素污染源主要为工业活动、煤炭燃烧、交通扬尘、矿区开采和运输扩散,不同介质中的重金属分布迁移规律表明其来源与矿业活动密切相关。研究结果可为该矿区土壤重金属污染防治提供数据支撑。

关键词:重金属元素;污染特征;污染来源;多元线性回归模型;背景值超标率;对数正态分布;污染源贡献率

中图分类号:TD167 X53

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0055-07

doi:10.11792/hj20250210

引言

重金属元素污染是劣化矿区土壤质量的一个重要因素,其具有污染强度大、降解难、稳定性高等诸多特点。当其含量超过土壤所能承受的最大容量时,会使土壤性质发生根本性改变,从而影响土壤所在地区整体的生态环境质量。被污染土壤中的重金属元素可通过多种方式直接或间接进入人体内,进而导致胎儿畸形、癌症等重大疾病。金属矿区采选作业是导致土壤中重金属元素超标的重要原因之一,因此,对矿区土壤中重金属元素的污染特征和来源进行分析,并研究其污染修复技术是十分有必要的。

近年来,国内外学者开展了大量关于土壤重金属污染评价、污染机理、污染特征和污染治理方面的研究工作^[1-2]。徐友宁等^[3]利用土壤环境质量法和土壤背景值法对某金矿区农田土壤汞污染进行了评价;张江华等^[4]对内梅罗指数和地质累积指数在土壤重金属评价中的差异进行了探讨;杨敏等^[5]研究了旬阳铅、锌矿带地质环境问题现状并提出了治理对策。大量研究表明,基于统计分析与污染程度评价并结合GIS的方法为解决土壤重金属污染空间分布等问题提供了行之有效的途径^[6-7]。

河北某矿区开采、选冶过程中产生的重金属污染破坏了矿区的生态环境,对当地居民的身体健康和生态安全造成了一定威胁^[8]。本文对该矿区及周边区域土壤重金属污染状况进行了调查研究,采集了矿区的表层和剖面土壤样品及农作物样品,并分析测定其中重金属元素的含量,采用综合质量影响指数法、单因素方差分析法和最小显著差异法对土壤重金属污染状况进行分析评价。利用GIS空间分析、垂向钻孔统计和植物富集系数等方法对重金属在矿区的迁移路径进行了分析。研究结果为该矿区土壤重金属污染防治提供了基础数据及工作方向,为类似矿区的土壤重金属污染修复治理提供科学依据。

1 土壤样品采集及处理

1.1 研究区概况

研究区为河北某矿区及周围区域。该矿区地处太行山东麓,在冀南平原与太行山脉相交地带,海拔整体较低,土壤类型以风沙土、褐土为主。受矿区影响,该区域土壤绿化率非常低,水土保持效果较差。

该矿区内出露古生界奥陶系、石炭系及新生界第四系地层,岩浆岩主要为中性闪长岩类岩体。矿石矿物主要为自形磁铁矿,其次为黄铁矿和黄铜矿等。矿

收稿日期:2024-08-05; 修回日期:2024-10-08

基金项目:河北省地质矿产勘查开发局博士后进站资助项目(454-0602-YBN-DYGM)

作者简介:余明(1987—),男,高级工程师,博士,从事岩矿分析测试与水土污染调查修复研究;E-mail:yumingshawo@163.com

*通信作者:边朋沙(1985—),女,高级工程师,硕士,从事微量元素分析、光谱分析等研究;E-mail:244151903@qq.com

石化学成分以Fe为主,其次为Si、Al、Ca、Mg、P等。研究区自中生代构造活动强烈,而其主​​要侵入岩为闪长岩,含有较高的F,在风化作用下,大量矿化剂进入土壤和地下水体,造成了其高F、Cl值。该矿区矽卡岩型铁矿石除含Fe元素外,还伴生有Cu和大量S及F,焦煤矿石中含有热液带来的F、S等元素,自然风化也可能造成土壤和地下水中含较高的Cu、F和S等元素。

该研究区工业以冶金和矿业为主,大量的矿业开采活动和冶炼与加工所形成的废水、废气、废渣,势必

对环境造成污染。

1.2 样品采集

以该矿区为研究对象,以土壤为研究载体,根据矿区自然地理、河流水系分布、土地利用等情况,选取涵盖尾矿库、采矿区、选矿厂等地段及周边区域等10个采样区(如图1所示),每个采样区采集10件样品,共得到100份土壤样品,同时采集对应的农作物样品,并对样品中Cu、Cr、Zn、Ni、As等重金属元素含量进行分析。

1)土壤样品。根据土壤类型和利用状况,划分不

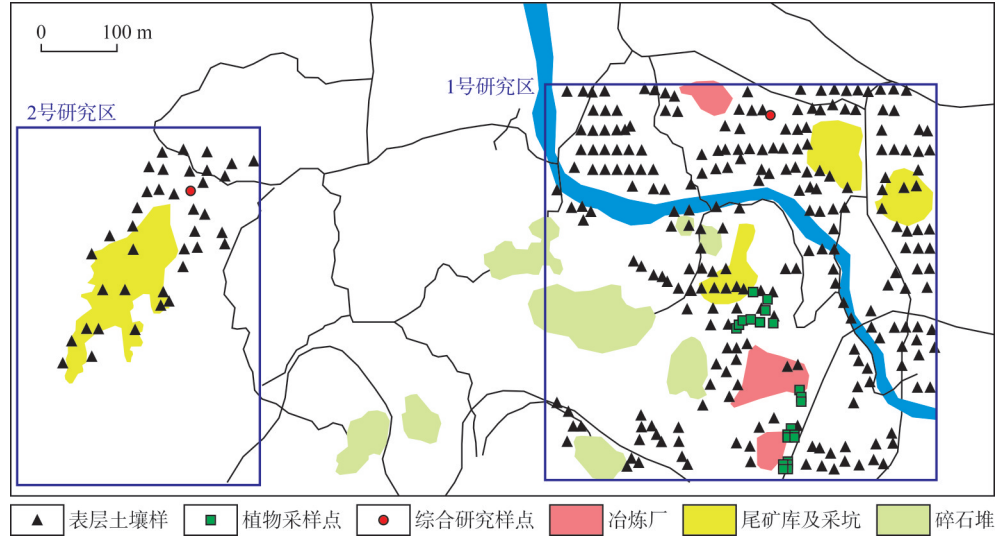


图1 研究区域及采样点分布情况

Fig. 1 Study area and sampling points distribution

同功能区进行采样点布置。土壤样品采样点布设方法视情况采用对角线法、梅花形法、棋盘式法和蛇形法,多点取样混合成一个代表样。每个采样点土壤样品由多点采集混合而成,混匀后缩分至1 kg。采样密度平均100个/4km²,重点区进行加密采样。去除表层杂物和浮土后,采集深度0~20 cm的土壤。

在研究区不同功能区布设土壤柱状剖面,采集深层土壤。柱状剖面样品采集遵循自然分层和限距结合的原则,在2 m深度剖面上采集4件样品。

2)农作物样品。该区主要农作物为玉米和小麦,在作物收获期采集可食用部分样品,同时采集表层土壤样品,采样量大于500 g,每个样品由不同株的多个样品组合而成。

1.3 样品前处理及分析测试

土壤样品采集后,去除枯枝、石子等,避光自然风干,在60℃恒温箱中烘干至恒质量,研磨至200目,过筛,四分法得到200 g左右样品,装袋备用。

准确称取0.5 g样品置于聚四氟乙烯坩埚中,润湿后加入10 mL HCl($\rho=1.19\text{ g/mL}$),在电热板上低温加热,蒸发至约5 mL时加入15 mL HNO₃($\rho=1.42\text{ g/mL}$),

继续加热蒸至近黏稠状,加入10 mL HF($\rho=1.15\text{ g/mL}$),并继续加热除去基质中的硅,再加入5 mL HClO₄($\rho=1.67\text{ g/mL}$),并加热至白烟冒尽。消解结束后,用纯净水将消解液稀释至100 mL容量瓶中,定容。

土壤中As采用氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定,植物中As和Cu、Ni、Zn、Cr采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。检测方法依据DZ/T 0130—2006《地质矿产实验室测试质量管理规范》、DZ/T 0279—2016《区域地球化学样品分析方法》、DZ/T 0258—2014《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)》。

2 研究方法

2.1 综合质量影响指数法

土壤综合质量影响指数(Influence index of comprehensive quality of soil, IICQ_s)是一种综合评估土壤污染程度的指标。其整合了土壤中污染物的累积数量等多方面因素,通过对各种污染物的含量、毒性、迁移性等特征进行量化分析,进而得出一个反映土壤污染状况的综合数值。本文通过IICQ_s分析土壤重金属

元素污染程度,计算公式为:

$$IICQ_s = X \times (1 + RIE) + Y \times DDD\!B/DDS\!B \quad (1)$$

式中: $IICQ_s$ 为土壤综合质量影响指数; X 、 Y 为测定结果超出标准值和背景值的土壤样品数量; RIE 为土壤相对影响当量; $DDDB$ 、 $DDSB$ 分别为重金属元素测定结果与背景值的偏离程度及重金属元素标准值与背景值的偏离程度。

RIE 越大,说明土壤受重金属元素污染越严重。其计算公式为:

$$RIE = \left(\sum_{i=1}^N P_{ssi} \frac{1}{n} \right) / N = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{C_{Si}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] / N \quad (2)$$

式中: N 为重金属元素*i*测定种类; n 为*i*的氧化数; P_{ssi} 为重金属元素*i*测定结果与标准值之间的影响当量; C_i 、 C_{Si} 分别为*i*的测定结果、标准值。

$DDDB$ 、 $DDSB$ 表达式分别为:

$$DDDB = \left(\sum_{i=1}^N P_{Sbi} \frac{1}{n} \right) / N = \left[\sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i}{C_{Bi}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] / N \quad (3)$$

$$DDSB = \sum_{i=1}^N \left(\frac{C_{Si}}{C_{Bi}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

式中: C_{Bi} 为*i*的背景值; P_{Sbi} 为重金属元素*i*标准值与背景值的影响当量。

$DDDB$ 越大,说明土壤重金属元素污染越严重。 $DDSB$ 越大,说明重金属元素标准值与背景值的偏离程度越大,对重金属元素的缓冲性^[9]就越强。

$IICQ_s$ 评定准则为:当 $X = 0$ 时,可得 $Y = 0$,那么 $IICQ_s = 0$,认定此时为背景状况。当 $Y \geq 1$ 时, X 存在 2 种可能性:一是 $X = 0$,则可得 $0 < IICQ_s < 1$,此时认定为侵袭与累积状况^[10],即重金属元素测定结果偏离了背景值,但各项元素含量均未超标;二是 $X \geq 1$,说明此时土壤中重金属元素的测定结果已经超过了标准值, $IICQ_s > 1$,在忽略农产品质量的情况下,即可认定这部分区域的土壤已经被污染;而在考虑农产品质量时,需要结合农产品中重金属元素含量进行计算。

2.2 数据统计与分析方法

对于土壤中各类重金属元素含量在空间上的差异性,利用单因素方差分析法和最小显著差异法进行分析。同时,利用主成分法与因子分析对各类重金属元素的来源进行判定,并利用多元线性回归模型^[11]对污染来源进行贡献率计算。数据分析软件选择 Rx64 3.5.2 和 SPSS 22 等 2 种。

3 研究结果及分析

3.1 矿区土壤重金属元素含量特征

经过样本处理和数据分析后,得到研究区域内

Cu、Cr、Zn、Ni、As 等 5 种重金属元素含量统计结果,如表 1 所示。

表 1 研究区域 5 种重金属元素含量统计结果

Table 1 Statistical results of 5 heavy metal elements in the study area

统计指标	Cu	As	Zn	Cr	Ni
样本数	100	100	100	100	100
最小值/(mg·kg ⁻¹)	6.39	0.24	19.6	10.66	7.52
中位数/(mg·kg ⁻¹)	25.5	9.99	79.7	77.85	29.1
最大值/(mg·kg ⁻¹)	170.9	139.08	1 133.2	745.91	56.62
算术平均值/(mg·kg ⁻¹)	46.55	16.53	157.2	131.28	30.18
几何平均值/(mg·kg ⁻¹)	32.7	10.61	98.39	96.97	28.56
标准差/(mg·kg ⁻¹)	47.15	20.57	178.93	109.55	9.81
变异系数/%	101	124	114	83	33
土壤背景值/(mg·kg ⁻¹)	26.1	10.2	56.15	71	30.02
背景值超标率/%	44.5	48.1	66.17	58.2	45.35
土壤基线值/(mg·kg ⁻¹)	36.68	16.81	97.5	94.19	44.33
基线值超标率/%	22	22.68	46.1	40.3	9.66
筛选值 ¹⁾ /(mg·kg ⁻¹)	100	30	250	100	100
超标率/%	19.5	12.04	20.44	7.46	1.86

注:1)GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》。

由表 1 可知:除了 Ni 元素以外,其他 4 种重金属元素的算术平均值远远大于土壤背景值,说明这 4 种元素已经对研究区域土壤造成了污染积累。Ni 元素的几何平均值低于土壤背景值,但背景值超标率却高达 45.35 %,说明虽然研究区域土壤中 Ni 元素污染没有特别严重,但分布极广。Zn 元素的几何平均值最高、背景值超标率最大,说明研究区域土壤中 Zn 污染最严重、分布范围最广。其他 3 种重金属元素对土壤的污染程度和分布范围处于中间水平。根据 5 种重金属元素的变异系数^[12],研究区域重金属元素污染为离散化分布状态,从高到低排序为 As>Zn>Cu>Cr>Ni。

土壤基线值(W_s)用来评判研究区域土壤是否受重金属元素污染。通常情况下,当土壤重金属元素浓度服从正态分布时^[13], $W_s=2(W_b + E)$ (W_b 为土壤背景值, E 为标准差);当土壤重金属元素浓度服从对数正态分布^[14-15]时, $W_s = \beta^2 E^2$ (β 为几何平均值)。

研究区域内 5 种重金属元素含量均满足对数正态分布,且只有 Ni 元素的基线值超标率小于 10 %,进一步说明 Ni 元素对研究区域内土壤的污染范围最小。Zn 元素和 Cr 元素的基线值超标率均高于 40 %,说明这 2 种重金属元素对土壤污染范围最广。

以 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》筛选值为参考可以发现,Zn 元素和 Cu 元素的超标率都在 15 % 以上,说明这 2 种重金属元素对研究区域内土壤污染最严重。Cr 元素和 Ni 元素的超标率均在 10 % 以下,说明这 2 种重金属元素对土壤的污染程度最轻。

综上所述,导致研究区域内土壤污染最严重的 2 种重金属元素是 Zn 和 Cu,应采取相应措施进行控制,避免其含量过高危害研究区域内人体健康和生态环境。

3.2 综合质量影响指数法评价

利用式(1)~(4)对研究区域内土壤综合质量影响指数进行计算,10个采样点的 $IICQ_s$ 参数如表 2 所示。

表 2 10 个采样点的 $IICQ_s$ 参数

Table 2 $IICQ_s$ parameters for 10 sampling points

采样点	RIE	$DDDB$	$DDSB$	X	Y	$IICQ_s$
T1	0.627	1.620	15.901	0	7	0.713
T2	0.620	1.592	15.901	0	6	0.601
T3	0.594	1.411	15.901	0	6	0.532
T4	0.581	1.333	15.901	0	6	0.503
T5	0.572	1.292	15.901	0	4	0.325
T6	0.560	1.212	15.901	0	4	0.305
T7	0.549	1.140	15.901	0	2	0.143
T8	0.543	1.107	15.901	0	2	0.139
T9	0.531	1.066	15.901	0	2	0.134
T10	0.522	1.040	15.901	0	2	0.131

注: RIE 、 $DDDB$ 、 $DDSB$ 、 Y 、 $IICQ_s$ 由研究区域内土壤背景值计算得到。

由表 2 可知:距离中心矿区越远的区域, RIE 和 $DDDB$ 越小,说明这部分区域土壤重金属元素污染程

度越低。总体而言, $DDDB$ 普遍较大,说明研究区域内土壤的承受能力较强,对重金属元素污染有着较强的缓冲性。同时,10个采样点的 Y 值均大于 1, X 值均为 0, $0 < IICQ_s < 1$,说明研究区域内土壤已经受到重金属元素污染,并产生了累积现象^[16-18],需要采取相关措施及时控制和处理。

3.3 矿区土壤重金属元素空间分布特征

对采集到的 100 件土壤样品进行重金属含量测试分析,所得数据利用 arcgis 软件进行统计制图,得到重金属元素污染累积指数图(如图 2 所示)。利用 GPS 坐标将重金属元素污染累积指数图与研究区的基本地质地貌图进行叠加,从空间上可以得到重金属元素污染累积指数和矿区不同功能区之间的关联关系,得出相关规律。

从总体污染程度和污染源空间分布位置来看,规律如下:

1)1 号研究区内分布的主要为农田、菜地、山地、居民区、道路、河流、采坑、选矿厂、冶炼厂、利用尾矿废石等充填的塌陷采空区、利用尾矿砂改造的农田等。从重金属元素污染累积指数图中颜色来看,污染程度最高的深红色区域主要分布在露天采坑、冶炼厂、选矿厂、利用尾矿废石等充填的塌陷采空区等位置,其他区域颜色较浅,反映重金属污染程度较低。

2)2 号研究区主要为尾矿库、山地、沿山地逐层修建的农田。尾矿库走向为北东向—南西向,尾矿坝在研究区东北部。颜色较深、污染程度较高的区域主要位于尾矿坝下面的农田,其他区域颜色较浅。

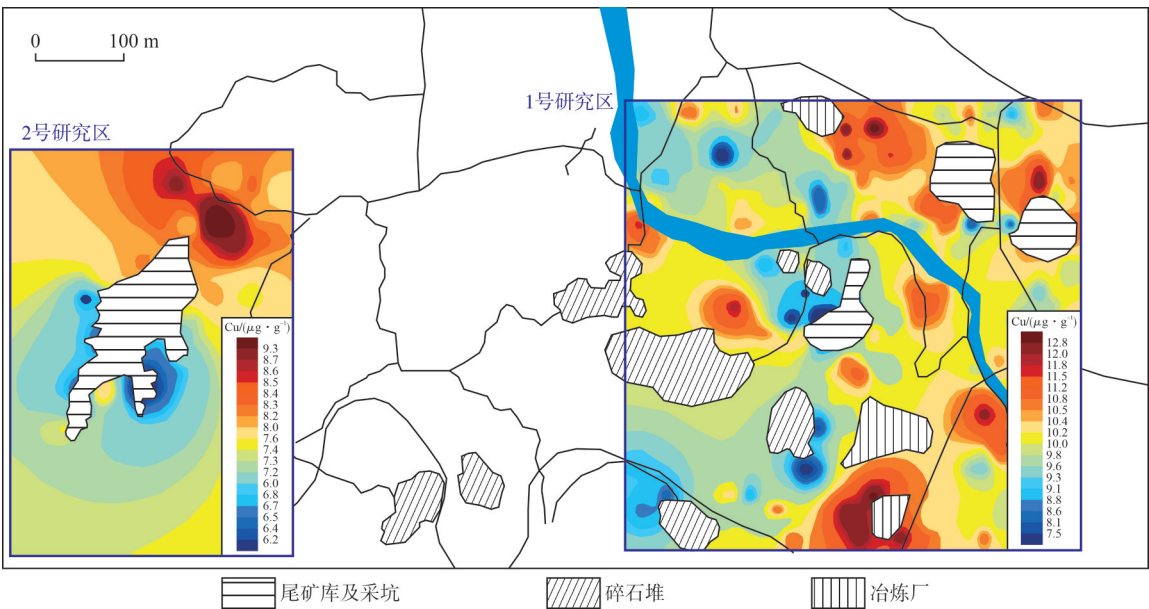


图 2 矿区土壤重金属元素污染累积指数图

Fig. 2 Cumulative heavy metal element pollution index in soil of the mining area

综合来看,该矿区土壤污染主要由矿山生产活动造成,重金属污染源主要分布在与采矿、选矿、冶炼及矿山废弃物相关的区域。

3.4 土壤重金属元素迁移路径及规律

1)元素在横向空间的迁移规律。1号研究区污染区域呈杂乱分布,围绕多个污染源形成多个小污染区域。在每个小污染区域,围绕污染源呈环带状逐级往外扩散,从污染源中心向外,污染程度逐渐降低。实地考察发现,这些污染较重区域为选矿厂、采坑、冶炼厂等位置。这说明重金属迁移路径为沿着这些污染源逐渐向外扩散,重金属浓度随着与污染源距离的

越来越远而越来越低。

2)元素在纵向空间的迁移规律。元素剖面分布特征可以提供有关成土母质和成壤演化作用的重要信息,识别人类活动叠加的污染强度和影响深度,反映土壤中元素污染的强度、深度及元素迁移能力,是土壤元素尤其是重金属元素污染来源解析的重要方法之一。

在该矿区不同位置取4个深层钻孔样品,编号1~4,钻孔深2 m,在每个钻孔中分别在位于表层10 cm、40 cm、100 cm、150 cm深度处各采集1件样品。剖面土壤中各元素质量分数随深度变化趋势如图3所示。

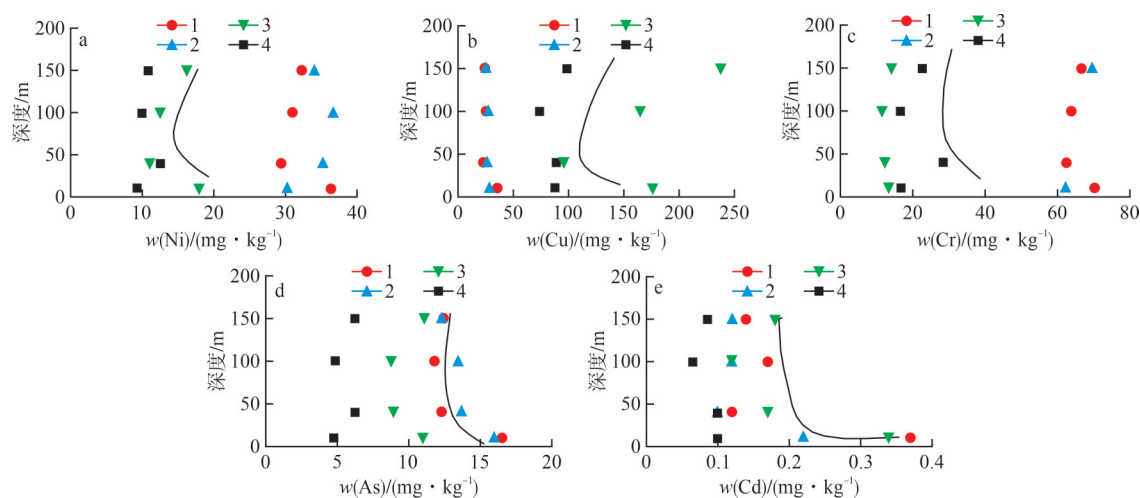


图3 剖面土壤中各元素质量分数随深度变化趋势

Fig. 3 Variation trends of mass fractions of each element with depth in soil profiles

由图3可知:大部分剖面表层土壤中都见到重金属元素的富集,矿区表层土壤重金属富集与外部输入有关。但是,不同重金属在不同剖面的富集程度有较明显的差异。大部分元素在土壤中的质量分数随取样深度的增加而逐渐降低,从上到下基本符合上高下低的变化规律。部分元素的质量分数在剖面中部位置降低后,在下层位置有轻微富集现象,元素质量分数在纵向呈现高一低一稍高的变化趋势。造成这种异常变化的原因,可能是上层土壤中的元素经过淋滤作用和扩散作用,在向下迁移过程中逐渐降低,但到了下部一定深度之后,迁移能力降低,从而在剖面下部某个位置发生了轻微的再次富集。

3)农作物中重金属迁移特征。污染土壤中生长的可食用作物不仅品质下降,同时也极易受到重金属的污染。为了研究矿区土壤、农作物中重金属元素的富集、迁移和分布规律,明确不同农作物对土壤重金属元素吸收积累的差异,系统采集该矿区农作物小麦、玉米及土壤样品,研究其在土壤和农作物间的迁移情况。重金属元素的富集系数(重金属元素在植物

各个部分含量与土壤中重金属元素含量比值)是评价重金属迁移能力及超富集植物的重要指标。富集系数越大,表明重金属元素越易从土壤富集至植物中,即该元素的迁移能力越强。

从富集系数(如图4所示)看:农作物小麦对主要重金属元素的富集系数均高于玉米。农作物对重金属元素的富集能力表现为 $Zn > Cu > Ni > As > Cr$, Zn 、 Cu 易富集于植物体内。11件农作物样品的 Zn 、 Cu 富集系数均大于1.5%,为中高富集,但元素含量均未超过食品标准;其他3种元素的富集系数均小于1.5%,为低富集。6件小麦样品的 Zn 、 Cu 富集系数均大于4.5%,为高富集;5件玉米样品中,2件样品的 Cu 富集系数大于4.5%,其余3件富集系数为3.9%~4.4%,为中富集。

在农作物中富集系数较高的重金属元素,在土壤中的含量也较高,即元素在该矿区具有较高的背景值,这也是导致农作物中元素富集的重要原因之一。除了具有较高的环境背景值外,不同重金属元素在农作物体内吸收和迁移的能力不同,也导致了最终富集

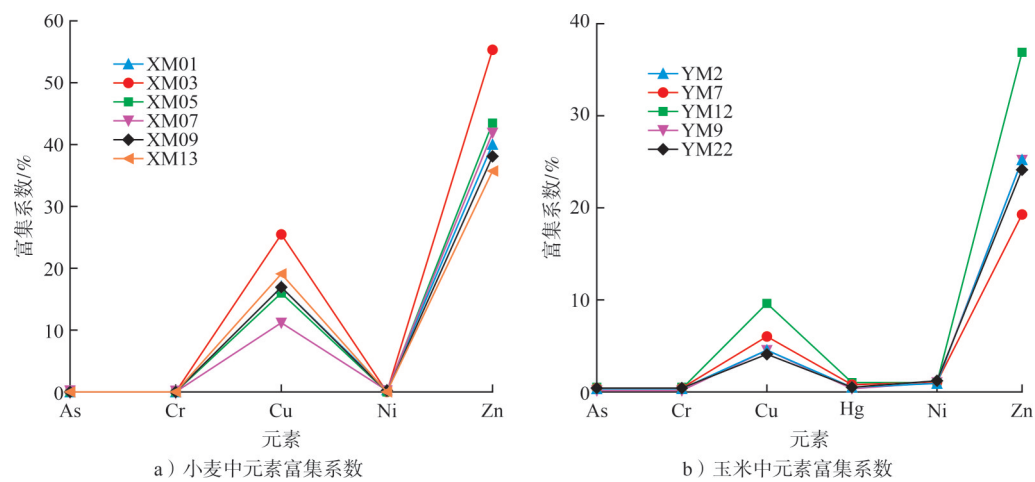


图4 5种重金属元素在农作物中的富集系数

Fig. 4 Enrichment coefficients of 5 heavy metal elements in crops

程度的差异,还需要进一步研究。

3.5 矿区土壤重金属元素来源及贡献率分析

3.5.1 重金属元素来源识别

为精准判断研究区域内各种重金属元素的来源,同时确定不同污染源排放的主要重金属元素种类,利用主成分法和因子分析对Cu、Cr、Zn、Ni、As等5种重金属元素进行来源识别。

经了解,研究区域内有1家热电厂,在进行各类工业活动时对周围土壤造成了一定程度的污染。同时,发电过程离不开煤炭,煤炭燃烧过程也对土壤造成了污染。因此,将工业活动^[19]视为因子1,煤炭燃烧视为因子2。此外,矿区内运输矿石的车辆众多,汽车制动、轮胎磨损、轴承运转^[20]及刹车片磨损都会释放一定含量的重金属元素,且汽车尾气排放过程中也会释放重金属元素,因此将交通扬尘视为因子3。矿区开采对地质环境造成了严重影响,将矿区开采和运输扩散视为因子4。

按照特征向量大于1、累积方差贡献率高于80%的准则对研究区域的4类因子进行主因子提取,并对因子载荷进行分析,结果如表3和表4所示。

表3 研究区域4类因子总方差解释

Table 3 Total variance explained by 4 types of factors in the study area

因子	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
因子1	5.672	40.51	40.51
因子2	2.731	19.51	60.02
因子3	1.845	13.18	73.20
因子4	1.116	7.97	81.18

由表4可知:因子1中,Cr元素和Ni元素的因子载荷较大,均为0.85以上,这是因为Cr元素和Ni元素大多由金属冶炼、加工等一系列工业活动产生。因子2

表4 研究区域重金属元素因子载荷

Table 4 Loadings of heavy metal element factors in the study area

元素	因子1	因子2	因子3	因子4
As	0.099	0.945	0.011	0.196
Cr	0.926	0.152	-0.129	0.036
Cu	0.663	0.342	0.345	0.394
Ni	0.855	0.190	0.325	0.150
Zn	-0.006	-0.066	0.689	0.016

中,As元素因子载荷最大,为0.945,这是因为As元素主要由煤炭燃烧产生。因子3中,Zn元素因子载荷最大,Cu元素和Ni元素为中等水平,这是由于这3种重金属元素多为汽车制动和尾气排放产生,因此较其他2种重金属元素的因子载荷高。因子4中,5种重金属元素的因子载荷普遍较低,说明研究区域内地质环境变化并未对土壤污染产生显著影响。

3.5.2 重金属元素污染源贡献率分析

基于研究区域内土壤因子分析结果,利用多元线性回归模型对每个主因子中重金属元素的来源和贡献率进行计算,结果如表5所示。其中,US为研究区域内对土壤造成污染的其他重金属元素来源,即不确定因子;E/O为由多元线性回归模型得到的重金属元素模拟值与真实值的比值; R^2 为多元线性回归模型决定系数。

由表5可知:As、Cr、Cu和Ni元素的 R^2 值均高于0.8,说明多元线性回归模型可以实现很好的拟合;Zn元素的 R^2 值仅为0.480,说明模型拟合无法取得理想效果。根据归一法,将贡献率低于1%的值去除,As、Cr、Cu和Ni元素的4个主因子贡献率相加后小于100%,说明还存在其他污染贡献源。研究区域内,工业活动、煤炭燃烧、矿区开采和运输扩散贡献的

表 5 研究区域重金属元素来源及贡献率
Table 5 Sources and contribution rate of heavy metal
elements in the study area

指标		As	Cr	Cu	Ni	Zn
贡献率/%	因子1	18.99	98.55	22.42	81.77	0
	因子2	15.87	1.42	0	0	0
	因子3	0	0	0	5.62	98.62
	因子4	6.79	0	77.58	0	1.38
US/%		58.34	0.03	0	12.62	0
E/O		1.000	1.000	1.024	1.000	0.999
R ²		0.942	0.898	0.906	0.958	0.480

As 元素分别为 18.99 %、15.87 %、和 6.79 %，土壤样本中有 58.35 % 的 As 元素存在不确定因子；工业活动贡献了 98.55 % 的 Cr 和 81.77 % 的 Ni，有 12.61 % 的 Ni 元素来自其他未知污染源；交通扬尘贡献了 98.62 % 的 Zn 元素，剩余 1.38 % 由矿区开采和运输扩散贡献，Zn 元素中不存在未知污染源；Cu 元素主要由矿区开采和运输扩散提供，剩余 22.42 % 由工业活动贡献。

综上所述，研究区域内土壤重金属元素污染源从高到低排列依次为工业活动>煤炭燃烧>交通扬尘>矿区开采和运输扩散。每种重金属元素的来源都十分复杂，且贡献率均不相同，对于 As、Cr 和 Ni 元素的未知污染来源，还需进一步考究。

4 结 论

研究对河北某矿区土壤重金属元素污染特征及来源进行分析，得出以下结论：

1)通过对研究区域内土壤综合质量影响指数进行分析可知：距离中心矿区越近，土壤受污染程度越高；距离越远，则污染程度越低。虽然矿区周围土壤中重金属元素的测定结果已经超出了背景值，但通过与评价标准对比后发现，该区域土壤重金属元素污染较轻。

2)研究区域内造成土壤污染的重金属元素主要来源于工业活动、煤炭燃烧、交通扬尘、矿区开采和运输扩散。

3)该矿区重金属迁移路径与选矿厂、采坑、冶炼厂等矿业活动区域高度相关，不同介质中重金属元素含量变化趋势具有一致性，表明重金属污染与矿业开采活动具有显著的相关性，其来源为矿业生产活动导致的重金属释放。

4)研究区域土壤中的 As、Cr 和 Ni 元素存在不同

比例的未知污染来源，还需进一步探究。

〔参 考 文 献〕

[1] 刘硕,吴泉源,曹学江,等.龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J].环境科学,2016,37(1):270-279.

[2] 毛香菊,马亚梦,邹安华,等.内蒙古草原某铜钼矿区土壤重金属污染特征研究[J].环境科学与技术,2016,39(6):156-173.

[3] 徐友宁,柯海岭,刘瑞萍,等.某金矿区农田土壤汞污染评价[J].黄金,2006,27(7):47-50.

[4] 张江华,赵阿宁,王仲复,等.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,2010,31(8):43-46.

[5] 杨敏,杨兵,陈华清,等.旬阳铅锌矿带地质环境问题现状及治理对策[J].黄金,2024,45(1):93-106.

[6] 雷凌明,喻大松,陈玉鹏,等.陕西泾惠渠灌区土壤重金属空间分布特征及来源[J].农业工程学报,2014,30(6):88-96.

[7] 战玉柱,姜霞,陈春霄,等.太湖西南部沉积物重金属的空间分布特征和污染评价[J].环境科学研究,2011,24(4):363-370.

[8] 徐国志,董迎春,邓金火,等.河北邯邢铁矿区矿山环境生态地球化学评价[J].地质通报,2014,33(11):1 827-1 835.

[9] 孙涛,宋世杰,常青,等.煤矸石堆积区土壤重金属形态组成与生物有效性的空间变化特征——以峰峰矿区为例[J].煤田地质与勘探,2022,50(10):85-95.

[10] 江丽,钟九生,黄国金,等.贵州丹寨县铅锌矿区小流域土壤重金属污染特征及生态风险评价[J].有色金属(冶炼部分),2021(3):57-64.

[11] 他维媛,周书宇,金盛华,等.商洛市尾矿区土壤重金属污染评价及来源分析[J].环境污染与防治,2023,45(5):687-693,699.

[12] 常凯威,邵啸,杨韬,等.川南地区某硫铁矿废渣堆周边农田土壤重金属污染水平及源解析[J].四川大学学报(自然科学版),2023,60(3):159-165.

[13] 孙晓寅,孙永昌,王婷婷,等.秦岭北麓矿区周边农田土壤重金属污染及风险评价[J].工业安全与环保,2022,48(8):87-92.

[14] 赵恒谦,常仁强,金倩,等.河北西石门铁矿区土壤重金属污染空间分析及风险评价[J].岩矿测试,2023,42(2):371-382.

[15] 王小慧,肖细元,郭朝晖,等.象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力[J].环境科学,2023,44(1):426-435.

[16] 张驰,陈伟,孙从建,等.黄土残垣沟壑区坝地土壤重金属含量特征及潜在生态健康风险评价[J].西南农业学报,2023,36(5):1 057-1 065.

[17] 孙小丽,阿不都艾尼·阿不里,哈力旦·艾赛都力,等.基于PMF模型的五彩湾矿区土壤重金属污染空间分布与来源解析[J].中国矿业,2022,31(11):62-70.

[18] 杨延梅,张田,郑明霞,等.基于水化学及当地稳定同位素的地下水硝酸盐污染空间分布特征及污染源解析[J].环境科学研究,2021,34(9):2 164-2 172.

[19] 郑宇娜,刘鹏,刘金河,等.台州市典型电子垃圾拆解场地周边农田土壤重金属污染特征和来源解析[J].农业环境科学学报,2022,41(7):1 442-1 451.

[20] 赵鹏,解静芳,王淑楠,等.太原市采暖季PM2.5中水溶性无机离子污染特征及来源解析[J].环境化学,2021,40(11):3 482-3 490.

(下转第 88 页)