

成都平原西缘典型水稻土壤风险元素及磷、硒来源解析与评价

张峻基, 施泽明, 廖容, 王钰, 王新宇

引用本文:

张峻基, 施泽明, 廖容, 王钰, 王新宇. 成都平原西缘典型水稻土壤风险元素及磷、硒来源解析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 327–338.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0280>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

珲春盆地农田重金属分布特征及源解析

郭晓东, 孙岐发, 赵勇胜, 蔡贺

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1875–1883 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1718>

贵州省某县辣椒种植区土壤重金属空间分布特征及来源解析

曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 滕浪, 吴康, 谢挺, 何腾兵

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 102–113 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0665>

麦玉轮作区农田土壤重金属调查及评价

李鹏, 张惠娟, 徐莉, 李辉信, 胡锋, 焦加国

农业环境科学学报. 2022, 41(1): 46–54 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0624>

基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析

霍明珠, 高秉博, 乔冬云, SainbuyanBayarsaikhan, 安毅, 霍莉莉

农业环境科学学报. 2021, 40(5): 978–986 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1277>

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

郑宇娜, 刘鹏, 刘金河, 周长瑞, 王琪, 冯美云, 刘冠宏, 朱旭东, 林匡飞

农业环境科学学报. 2022, 41(7): 1442–1451 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1395>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

张峻基, 施泽明, 廖容, 等. 成都平原西缘典型水稻土壤风险元素及磷、硒来源解析与评价[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(2): 327–338.

ZHANG J J, SHI Z M, LIAO R, et al. Source apportionment and evaluation of potentially toxic elements, P and Se, for paddy soils in the western margin of Chengdu Plain, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(2): 327–338.



开放科学 OSID

成都平原西缘典型水稻土壤风险元素及磷、硒来源解析与评价

张峻基², 施泽明^{1,3*}, 廖容¹, 王钰¹, 王新宇^{1,3}

(1. 成都理工大学地球化学系, 成都 610059; 2. 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都 610081; 3. 地学核技术四川省重点实验室, 成都 610059)

摘要:为探究成都平原水稻土壤风险元素来源及其风险性,本研究以成都平原西缘某地0~20 cm的水稻土壤为研究对象,以土壤中Ni、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Cd、Hg、P、Se这10种元素作为研究要素,借助统计学描述分析、聚类分析、主成分分析和GIS方法对10种元素的主要来源进行解析,并对其中8种重金属元素的污染风险进行评价。结果显示,研究区水稻土壤中Ni、Cr、Cu没有表现出明显的富集特征,Pb、Zn、As趋向于富集,Cd、Hg、P、Se有明显的富集现象。研究区人为活动影响较强的区域主要分布于I河至J河一带和L河沿岸地区。研究区内Cu、Cr、Ni、Se主要来源于成土母岩,Pb、As受磷石膏堆影响,Hg、P受居民生活废弃物影响,Zn、Cd受控于当地化工企业活动。研究区农耕土壤受Cd胁迫,内梅罗综合污染指数为1.20,达到轻度污染程度。

关键词:水稻土壤; 风险元素; 重金属污染; 源解析; 风险评价

中图分类号:X53;X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2023)02-0327-12 doi:10.11654/jaes.2022-0280

Source apportionment and evaluation of potentially toxic elements, P and Se, for paddy soils in the western margin of Chengdu Plain, China

ZHANG Junji², SHI Zeming^{1,3*}, LIAO Rong¹, WANG Yu¹, WANG Xinyu^{1,3}

(1. Geochemistry Department, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. Chengdu Center of China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Sichuan Province Key Laboratory of Nuclear Techniques in Geosciences, Chengdu 610059, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the effects of risk elements on rice soils in Chengdu Plain. Soils were collected at depths of 0 to 20 cm on the western margin of the Chengdu Plain. The sources of Ni, Cr, Cu, Pb, Zn, As, Cd, Hg, P, and Se in paddy soils were studied using statistical descriptive analysis, cluster analysis, principal component analysis, and GIS methods, and the ecological risks posed by heavy metals were evaluated. The results showed that Ni, Cr, and Cu were not enriched. Pb, Zn, and As were enriched, along with Cd, Hg, P, and Se. The area that was strongly influenced by human activities was mainly distributed between Rivers I and J and along River L. The Cu, Cr, Ni, and Se were mainly from the parent rock. Phosphogypsum influenced Pb and As. Hg and P were influenced by residential waste. Zn and Cd levels were controlled by chemical activities. Due to the influence of the high Cd content in cultivated soils, the Nemerow pollution index was 1.20, indicating that the pollution level of soils was mild.

Keywords: paddy soil; potentially toxic elements; heavy metal contamination; source apportionment; risk evaluation

收稿日期: 2022-03-24 录用日期: 2022-08-04

作者简介: 张峻基(1987—), 男, 四川成都人, 博士, 主要从事环境调查和评价及土壤修复研究。E-mail: zhangjunji69@163.com

*通信作者: 施泽明 E-mail: shizm@cdut.edu.cn

基金项目: 四川省自然资源厅项目(KJ-2019-3)

Project supported: Department of Natural Resources of Sichuan Province Project(KJ-2019-3)

土壤是地球生态系统最基本的结构单元^[1],可以为生物生长提供必需的营养元素。但在过去20年里,全球范围内的土壤重金属污染问题凸显^[2]。欧洲有大约350万个点位可能受到污染,其中包括一些受重金属污染的农田土壤;我国也有部分农田土壤受到重金属污染^[3]。研究显示,土壤中重金属超过自身承载能力,不仅会导致土壤质量下降^[4],而且会在植物体内富集,并通过食物链进入人体,危害人类身体健康^[5-6]。因此,重金属在土壤中的富集和污染程度成为国内外学者关注的焦点^[7]。

土壤中重金属的源解析有助于对土壤重金属污染管控和防治^[8]。目前,用于分析土壤重金属来源的方法主要有基于多元统计原理的相关分析、聚类分析和主成分分析,以及同位素标记法等^[9-10]。这些方法在实际应用中各有利弊,如:基于多元统计的分析方法可视化差,分析结果存在多解性;同位素标记法受限于检测技术,尚不能普及所有重金属元素,而现有同位素检测又受仪器检出限的制约。国内外越来越多的研究将GIS与多元统计方法结合,用以分析土壤重金属的空间分布特征和来源。GIS可视化较好,能展示研究区的地质信息,弥补多元统计方法的不足,二者结合能通过建立潜在结构识别不同污染源^[11]。然而,很多研究只是简单地将GIS用于展示研究区的地质信息^[12-13],只有少数研究系统地将GIS和多元统计相结合。

成都平原西缘是四川省重要的居民聚集区、农业耕作区和工业区。区内人口聚居,城镇率达到52.4%;农业以粮食作物耕作为主,其占农作物耕作面积的65.2%,粮食作物中又以水稻种植最为普遍;区内工业发达,是国家重要的工业区,有一批大型骨干化工企业。研究区农耕土壤受重金属影响较大,导致水稻中Cd等重金属含量较高。研究发现,自然因素和人类活动影响了该地区农耕土壤质量和粮食安全^[14-15]。前人在对成都平原西缘农耕土壤中重金属来源的研究上存在较大分歧,如Li等^[16]认为高地地质背景值、河流迁移、工业企业和交通对该地区土壤Cd影响显著,且自然地质因素的影响更为突出;任加国等^[17]认为该地区重金属空间分布与企业分布、污水灌溉、农业施肥以及其他自然因素有一定的相关性;Zhang等^[18]认为L河一带重金属含量和分布受矿山开采、大气降尘和工矿企业的影响较大。本研究以成都平原西缘某地典型农耕土壤——水稻土作为研究对象,将GIS技术、多元统计方法和风险评价方法相结

合,深入探讨研究区水稻土壤中Ni、Cr、Cu、Pb、Zn、As、Cd、Hg、P、Se等10种元素的来源,并对其中8种重金属元素进行风险评估,以为当地农耕土壤污染管控及治理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处成都平原西缘,北西接龙门山系,地势自北西向南东缓倾斜,属平原地形,面积约714.3 km²。上覆地层主要为全新统洪积层(Q₄^{al})、更新统冰水沉积层(Q₂^{gl}),偶见白垩系剑门关组(K_j)。区内水系包括I河、J河、K河、L河及灌溉渠等。I河、J河、K河、L河自龙门山系流出,从北西方向流入研究区;灌溉渠引自岷江,自南西向北东横贯整个研究区,并为农田灌溉提供水源。研究区人口密集,聚居地呈星点密布。农业以水稻种植为主,广布于研究区内。工业主要以磷化工和化肥生产为主,大部分沿河排布建设。

1.2 样品采集与分析

于2015年4月对研究区水稻土壤进行现场调查和采样。基于GIS技术,按照2 km×2 km的网格标准对全区耕层土壤进行逐格采集,共采集140个水稻土壤样品(图1)。使用梅花形采样法采集样品,每个子

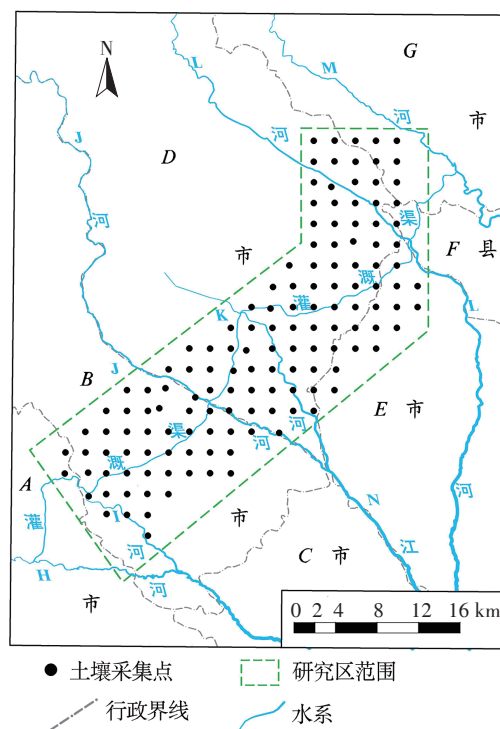


图1 研究区采样点位分布图

Figure 1 Soil sampling sites and study area

样品采集深度为0~20 cm,去除杂草、砾石等杂质后充分混合,并用四分法取1.0 kg样品装入聚乙烯自封袋中。采样过程中详细记录采样时间、地点、位置和周围环境信息等。样品被转运至实验室后,置于阴凉通风处自然风干。剔除杂质后,使用玛瑙研钵研细,分别过2、0.85 mm和0.075 mm孔径尼龙筛,保存备用,以供测定土壤pH和元素含量。同时采集研究区内磷石膏样品,用以测定重金属元素含量。

土壤pH的测定:将10 g过2 mm孔径尼龙筛的风干土壤放入烧杯中,加25 mL去CO₂的蒸馏水,搅拌后静置30 min,用酸度计(成都世纪方舟科技有限公司,PHS-320)测定pH值。

2015年对处理完成后的样品进行元素测试分析。Cd、Cr、Zn、Ni、Cu、Pb的检测分析方法遵照《固体废物 金属元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 766—2015)和《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995):使用盐酸-硝酸-高氯酸消解样品,提取Cd、Cu、Zn、Ni;使用盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸消解样品,提取Pb;使用硫酸-硝酸-氢氟酸消解样品,提取Cr。电感耦合等离子体质谱仪ICP-MS分析仪(Perkin Elmer SCIEX,仪器型号:ELAN DCRG-e)测定上述各元素含量。P的检测分析方法遵照《硅酸盐岩石化学分析方法 X射线荧光光谱法 测定主微量元素》(GB/T 14506.28—2010),将样品压制成片,使用X射线荧光光谱仪(日本理学,仪器型号为ZSX primus II)分析元素含量。Hg、As、Se的检测分析方法遵照《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法》(GB/T 22105—2008):使用(1:1)王水消解样品,加盐酸、硫酸、抗坏血酸稀释定容,原子荧光仪(AFS-930,北京吉天分析仪器公司)测定Hg、As;样品经硝酸-高氯酸-盐酸消解,加盐酸、Fe³⁺混合溶液稀释定容,原子荧光仪测定Se。测试时,使用空白样和国家标准物质(GSS-5)进行质量控制,标准样品平均回收率为

90%~105%。每测定20个样品插入平行样重复检测,相对误差控制在±5%以内。

1.3 重金属风险评价方法

土壤单项污染指数常用于评价沉积物和土壤中某种重金属的污染程度^[19]。其优点在于使用简单、灵活,能反映单个重金属元素的污染程度。其计算公式为^[20]:

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

式中: P_i 为土壤单项污染指数; C_i 为土壤中重金属*i*的实测值,mg·kg⁻¹; S_i 为土壤中重金属*i*的土壤环境质量标准值,mg·kg⁻¹。土壤环境质量标准参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018),土壤样品pH为4.6~8.5,平均值为6.5。 P_i 值越大,土壤受重金属*i*污染越严重,相应评价标准见表1。

内梅罗污染指数与土壤单项污染指数相结合可以全面、综合地评价土壤总体污染程度,这种方法突出了高浓度污染对土壤环境质量的影响,其计算公式为^[21]:

$$P_N = \sqrt{\frac{(\bar{P}_i)^2 + (P_{i\max})^2}{2}} \quad (2)$$

式中: P_N 为内梅罗综合污染指数, $\bar{P}_i$ 为土壤单项污染指数 P_i 的平均值; $P_{i\max}$ 为土壤单项污染指数的最大值。参照标准将 P_N 划分为5个等级,相应评价标准见表1。

1.4 数据处理

实验数据使用SPSS Statistics 19.0和Origin 2018进行统计分析。主成分分析(PCA)采用最大方差法进行旋转,以确定潜在因素。聚类分析(CA)使用组间连接法划分出不同的组。PCA提取出的因子使用Mapgis 6.7软件进行等值线图绘制,使用泛克里格法对数据进行网格化处理。

表1 评价方法及相应评价标准

Table 1 Evaluation methods and corresponding evaluation standards

单项污染指数法 Single factor index			内梅罗指数法 Nemerow index		
等级 Grade	范围 Range	污染等级 Pollution degree	等级 Grade	范围 Range	污染等级 Pollution degree
I	$P_i \leq 1$	无	I	$P_N \leq 0.7$	清洁
II	$1 < P_i \leq 2$	轻微	II	$0.7 < P_N \leq 1.0$	尚清洁
III	$2 < P_i \leq 3$	轻度	III	$1.0 < P_N \leq 2.0$	轻度污染
IV	$3 < P_i \leq 5$	中度	IV	$2.0 < P_N \leq 3.0$	中度污染
V	$P_i > 5$	重度	V	$P_N > 3.0$	重度污染

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量特征

研究区水稻土壤中8种重金属元素和Se、P的统计特征值见表2。土壤中Ni、Cr、Cu的含量平均值与参考值相近,差值与参考值的比值小于0.1,表明3种元素的含量符合四川省元素背景值的统计特征。偏态和峰度是衡量土壤元素是否符合正态分布的参数。研究区Ni、Cr、Cu的偏态和峰度都小于1,表明3种元素在研究区内的分布具有正态分布性,是自然因素控制其分布特征的表现。标准差和变异系数(CV)反映了元素的离散程度,Yang等^[22]认为受自然来源影响大的元素,其变异系数值较低,而受人类活动影响大的元素,其变异系数值一般较高。变异系数分级标准为:CV<0.1为弱变异,0.1≤CV≤0.3为中等变异,CV>0.3为强变异^[23]。Ni、Cr、Cu变异系数小于0.3,属中等变异,结合最小值与最大值变化区间、偏态和峰度都较小的特征,推断3种元素具有自然来源贡献的特征。Zhang等^[24]的研究也认为Ni、Ti等元素在土壤中性质较稳定,难以迁移,极少受到人类活动影响。

Pb、Zn、As的平均含量略高于参考值(二者差值与参考值的比值为0.1~0.6),反映了这3种元素可能受到轻微非自然因素的影响。研究区Pb、Zn、As的偏态和峰度都较高,表明这3种元素在研究区内趋于富集。同时,其变异系数值较高(0.3~0.5),属强变异,结合最小值与最大值变化区间、偏态和峰度都较大的特征,推断非自然因素导致了整个研究区Pb、Zn、As含量被小幅度抬升。

Cd、Hg、P含量平均值高于参考值(二者差值与参考值的比值>1),反映了3种元素受到了非自然因素的直接影响。研究区Cd、Hg、P的偏态(3.00~8.00)和峰度(19.00~75.00)较高;变异系数高(>0.50),属强变异,其中Cd的变异系数达到1.09,表明3种元素在研究区内有明显的富集,这种富集作用受到人为因素控制,且可能点状污染源的影响更为显著。

Se含量平均值显著高于参考值,变异系数属中等变异,但偏态和峰度都较低,最小值与最大值变化区间小,这可能暗示Se含量分布同时受自然因素和人为因素的控制,且两种因素都有重要贡献。

2.2 土壤重金属来源解析

2.2.1 聚类分析

聚类分析可以将数据按照相似程度进行归类,从而达到数据降维的目的^[26]。本研究对水稻土壤样品进行系统聚类,聚类分析结果如图2所示。研究区水稻土壤样品聚为两类:一类主要分布于I河-J河一带和L河沿岸地区,这些地区是工业企业和居民区的主要聚集地带,水稻土壤通常受到人为活动影响;另一类主要分布于K河-L河一带、J河-K河之间以及研究区南西角,这些点位距离工厂、聚居地、道路等相对较远,受人类活动影响较小。

2.2.2 主成分分析

为进一步探讨研究区水稻土壤风险元素的来源和影响因素,对上述10种元素进行主成分分析。10种元素的Bartlett球形检验伴随概率值Sig=0<0.05,检验结果达到显著水平;Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)值为0.60,高于建议的临界值0.5^[27],验证结果表明土壤

表2 研究区土壤风险元素的统计特征值

Table 2 Statistical characteristic values of potential pollution elements in the study area

元素 Element	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	平均值 Mean/(mg·kg ⁻¹)	中位数 Median/(mg·kg ⁻¹)	标准差 SD/(mg·kg ⁻¹)	变异系数 CV	偏态 Skewness	峰度 Kurtosis	参考值 Reference value/(mg·kg ⁻¹)
Ni	13.5~50.2	30.44	29.80	7.22	0.24	0.37	-0.15	32.6
Cr	62.7~125.0	86.04	84.15	11.64	0.14	0.90	0.82	79.0
Cu	21.0~61.2	33.70	33.15	7.44	0.22	0.60	0.26	31.1
Pb	14.3~139.0	34.26	32.40	11.86	0.35	5.38	44.00	30.9
Zn	67.4~391.0	131.16	117.50	52.38	0.40	2.77	9.94	86.5
As	3.55~40.80	8.06	7.29	3.77	0.47	4.92	40.37	10.4
Cd	0.21~7.38	0.85	0.63	0.92	1.09	5.50	35.28	0.08
Hg	0.05~1.86	0.27	0.20	0.22	0.84	3.72	19.62	0.06
P	662~12 600	1 509.58	1 300.00	1 104.83	0.73	7.63	74.08	713.5
Se	0.15~1.39	0.54	0.50	0.22	0.41	0.87	0.84	0.1

注:变异系数=标准差/平均值;参考值为四川省土壤背景值^[25]。

Note: Coefficient of variation= standard deviation/mean; the reference value is the soil background value of Sichuan Province^[25].

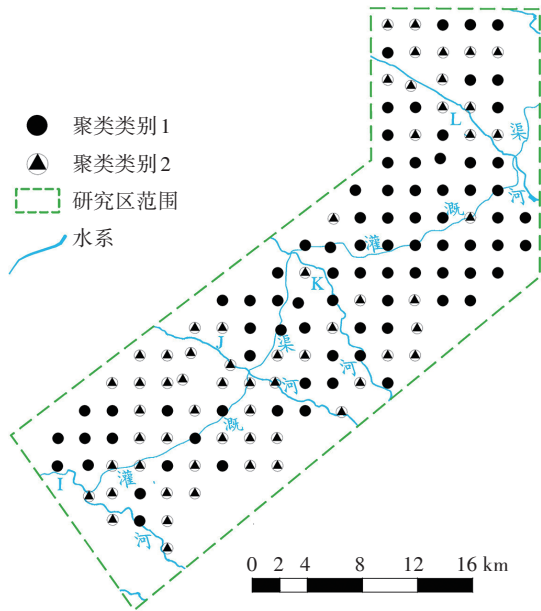


图2 土壤样品聚类分布图

Figure 2 Cluster analysis(CA) of potential pollution elements in farmland soil

样品之间存在明显的结构性与相关性,可以进行主成分分析^[18]。

10种元素的载荷矩阵和总方差见表3。以特征值大于1为筛选标准,共提取出4个主成分,累积方差贡献率大于80%。每个主成分都代表了一组元素地球化学关联,反映了不同类型的化学组分构成特征^[28]。正交因子载荷矩阵结果如表4所示。

为进一步探讨研究区水稻土壤中10种元素的主要来源,本研究计算了不同土壤样品的4个主成分的

标准化值,并结合GIS方法进行分析。不同主成分的空间分布采用泛克里格网格化法处理;使用箱图处理主成分异常值,并分别计算背景值和异常下限,用于划分主成分的等值线图色阶。

第一主成分(PCA1)捕获Cu、Cr、Ni、Se 4种元素。PCA1的空间分布特征见图3。结果显示,PCA1在研究区的分布表现出明显分区。以K河为界,K河北东侧属高值区,南西侧为低值区。这种特征与研究区的岩性分布特征吻合。研究区岩性分布如图4所示,K河向北东方向地层依次出露更新统冰水沉积层(Q_2^{fgl})、全新统洪积层(Q_4^{al}),其土壤母质主要来自于研究区北西侧龙门山系的沉积岩地层,包括震旦系、寒武系、泥盆系、二叠系和三叠系地层,主要以砂岩、

表4 水稻土壤正交因子旋转载荷矩阵

Table 4 Rotated component matrix for the data of the farmland soil

元素 Element	成分 Component			
	PCA1	PCA2	PCA3	PCA4
Ni	0.868	0.110	-0.072	-0.014
Cr	0.799	-0.111	-0.038	0.065
Cu	0.812	0.331	0.195	0.053
Se	0.608	0.444	0.359	-0.038
Pb	0.004	0.840	0.180	0.371
As	0.223	0.868	-0.014	0.021
Zn	0.050	0.454	0.119	0.812
Cd	0.030	-0.004	0.149	0.928
Hg	-0.036	-0.035	0.884	0.258
P	0.114	0.184	0.900	0.029

表3 10种元素变量解值表

Table 3 Total variance explained and component matrices illustrated

成分 Component	初始特征值 Initial eigenvalue			提取平方和载入 Extract the sum of squares and load			旋转平方和载入 Rotate the sum of squares loading		
	特征值 Eigenvalue	总方差 Percentage of variance/%	累积方差 Cumulative percentage of variance/%	特征值 Eigenvalue	总方差 Percentage of variance/%	累积方差 Cumulative percentage of variance/%	特征值 Eigenvalue	总方差 Percentage of variance/%	累积方差 Cumulative percentage of variance/%
1	3.63	36.26	36.26	3.63	36.26	36.26	2.49	24.89	24.89
2	2.08	20.84	57.10	2.08	20.84	57.10	2.03	20.31	45.19
3	1.35	13.50	70.60	1.35	13.50	70.60	1.84	18.35	63.55
4	1.03	10.29	80.89	1.03	10.29	80.89	1.73	17.34	80.89
5	0.55	5.46	86.35						
6	0.46	4.61	90.96						
7	0.34	3.42	94.38						
8	0.28	2.80	97.19						
9	0.19	1.88	99.07						
10	0.09	0.93	100						

泥页岩、碳酸盐岩为主。K河向南西方向地层依次露出全新统洪积层(Q_4^{al})、更新统冰水沉积层(Q_2^{fgl}),土壤母质主要来自于研究区北西侧龙门山系的沉积岩地层和岩浆岩区,包括震旦系、二叠系和三叠系的沉积岩地层,以及晋宁期构造运动侵入的花岗闪长岩。

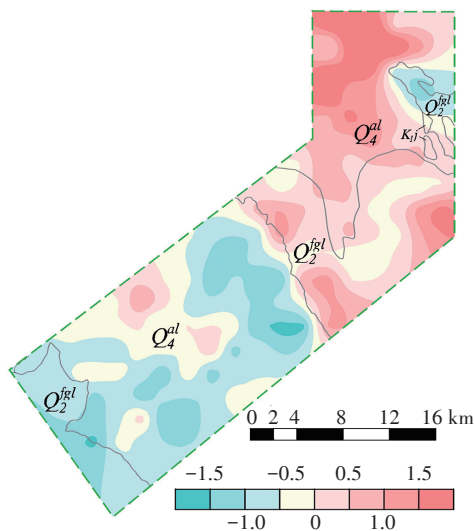
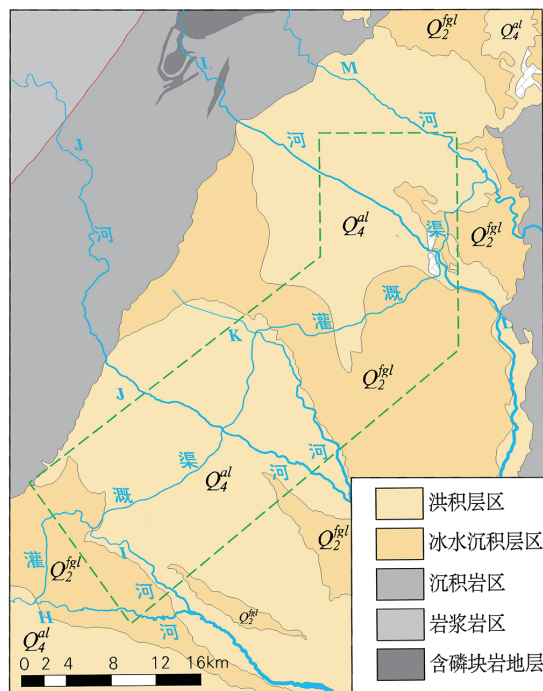


图3 PCA1的空间分布图

Figure 3 The first principal component distribution



岩性分布图信息参考《1:20万区域地质测量报告》

The lithology distribution information refer to 1:200 000 Regional Geological Survey Report

图4 研究区岩性分布图

Figure 4 The lithology distribution in the study area

研究显示,土壤中Cr、Ni、Se、Cu等元素含量可能与当地的土壤母岩有关,因为它们主要来自母质风化和随后的成土作用^[29]。我国分布的中酸性岩浆岩中Cu、Cr、Ni、Se等元素含量低于砂岩和泥页岩,Ni、Cr、Se含量普遍低于碳酸盐岩^[30]。因此,Cu、Cr、Ni、Se等元素通常被认为受控于自然因素,其中Ni和Cr表现尤为显著^[31-32]。此外,表4结果也显示PCA1对As也有一定的贡献。

此外,PCA1的标准化值表现出正态分布的规律,这是元素受自然因素主控时表现出的一项显著特征。图5是土壤PCA1的P-P概率图和去势P-P概率图。P-P概率图中数据点基本分布于理论直线(对角线)上或附近,去势P-P概率图中PCA1的数据残差正态评分分布于-0.050~0.075之间,二者都显示数据正态性较显著。

第二主成分(PCA2)捕获Pb和As。PCA2的空间分布特征见图6。结果显示,PCA2的高值区主要分布于研究区北部的L河流域和北西西侧的J河以西区域。众多的研究显示,Pb主要通过采矿和冶炼、含铅产品的使用和处理、化石燃料燃烧(煤、含铅汽油)、矿石肥料施用等途径进入土壤^[33];As主要通过农药的使

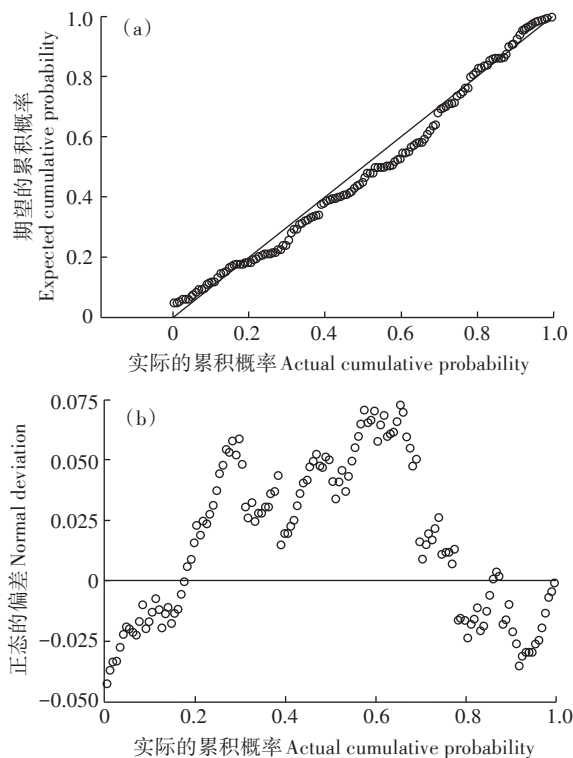


图5 第一主成分P-P概率图(a)和去势P-P概率图(b)

Figure 5 The P-P probability plot(a) and castrated P-P probability plot(b) of first principal component

用、污水灌溉以及工业活动等途径进入土壤^[34-36]。PCA2的高值区在空间上与研究区内的道路、燃煤区、排污管道等可能的污染源联系不显著,而与区内的磷石膏堆积区及其影响辐射区表现出高度吻合。研究区内3处磷石膏的Pb、As含量分析(图7)表明,3处磷石膏堆Pb含量为25.5~42.5 mg·kg⁻¹,As含量为5.3~8.1 mg·kg⁻¹,部分点位的磷石膏Pb、As含量高出当地平均值。工矿企业的生产过程破坏了原始磷矿石的空间结构,产出的磷石膏对Pb、As的约束能力减弱,加之磷石膏堆放时间较长,酸性雨水中的H⁺和一些其他阳离子(Na⁺、Mg²⁺等)形成优势元素,通过解吸作用使磷石膏中的Pb、As释放出来,并迁移至土壤中^[37]。此外,表4的结果也显示PCA2对Cu、Se、Zn也有一定的贡献。

第三主成分(PCA3)捕获Hg和P。PCA3的空间分布特征见图8。PCA3影响范围基本覆盖整个研究区,又以A市生活辐射区和B市北东侧一带最为显著。PCA3的高值区与研究区内的城镇(居民聚集区)在空间分布上有极好的吻合,表明研究区土壤Hg和P的分布主要受城市居民生活废物影响。研究发现,Hg和P都与人类活动密切相关^[38-39]。Pecina等^[40]的研究认为Hg是唯一与城市人口规模直接相关的污染物,人口增加和人类聚居地的扩大导致能源消耗增长,煤等能源的消耗引发Hg的迁移转化^[41-42]。尽管研究区上游龙门山系分布3套含磷地层:上震旦统含

磷岩系、下寒武统含磷岩系和上泥盆统含磷岩系(含磷地层位置分布如图4所示)^[43],这些地层中的P干扰了研究区的水系和水系沉积物^[44],具有影响研究区农耕土壤P含量的潜力。但现有的研究显示,农业、工业废水、生活污水控制了I河、J河、K河、L河中的总P含量^[45],而不是水系控制土壤P。此外,PCA3的空间

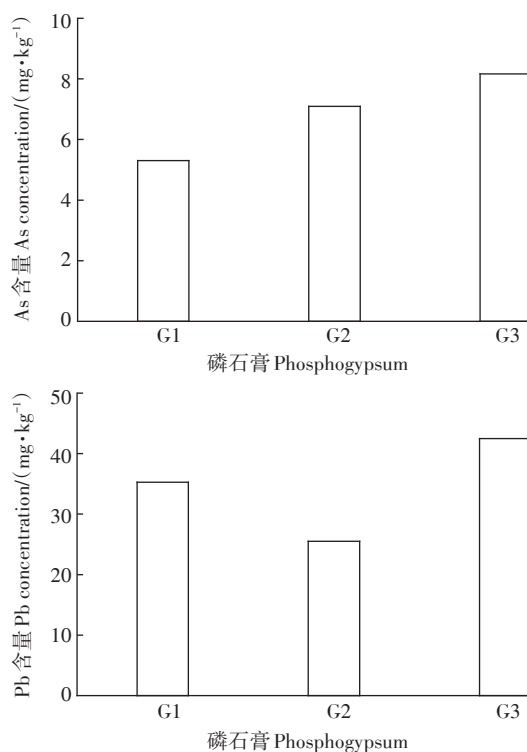


图7 磷石膏中Pb和As含量

Figure 7 Concentration of Pb and As in phosphogypsum

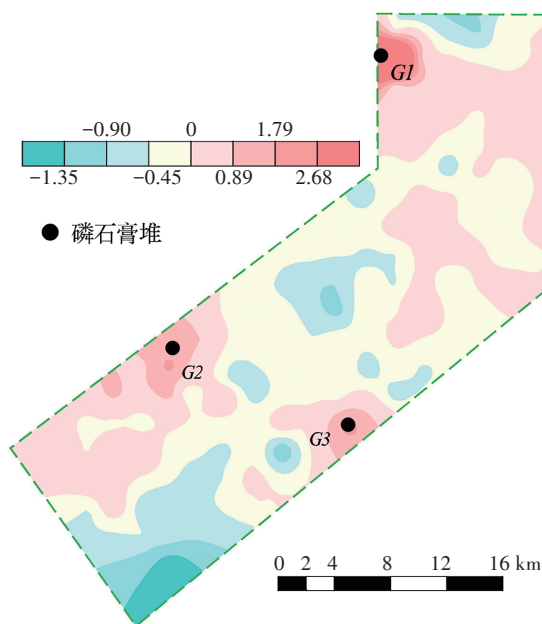


图6 PCA2的空间分布图

Figure 6 The second principal component distribution

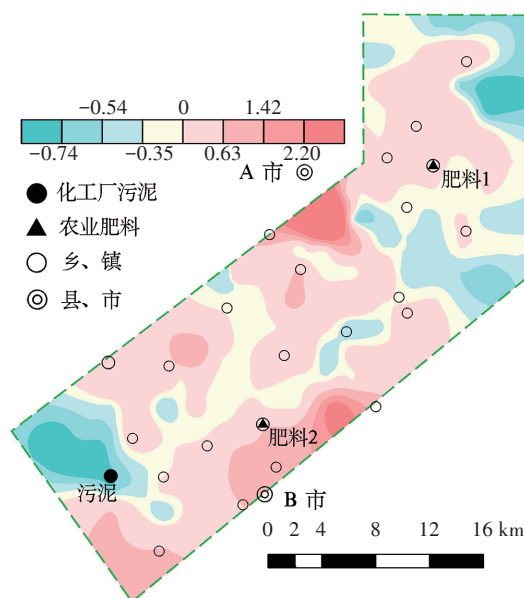


图8 PCA3的空间分布图

Figure 8 The third principal component distribution

分布特征也显示,其高值区与区内水系在空间上没有直接的联系。高德才等^[46]的研究也证实,土壤P的主要来源可能为工业废水、生活污水和农业施肥。Xu等^[47]认为P通过污水管道径流的冲刷和运移发生迁移,降雨期间管道沉积物中总P的量可达到35.7%~47.3%^[48]。研究区化工厂污泥和两种农用肥料中Hg和P的含量也表明城市居民生活废物影响了两种元素的含量(图9)。两种肥料Hg的含量分别为0.03 mg·kg⁻¹和0.04 mg·kg⁻¹,低于土壤样品Hg含量的最低值(0.05 mg·kg⁻¹),不具备影响土壤Hg含量的潜力。而化工厂污泥Hg含量虽然较高,但其P含量较低(1 882.8 mg·kg⁻¹),因此影响土壤P含量的能力有限。另外,化工厂的空间分布与土壤P高值区套合较差,因此确定研究区水稻土壤中的Hg和P可能更多地受控于城市生活废物。结合前人研究结果,推断土壤P主要来自于人体排泄物和使用含P洗涤剂产生的污水^[45]。此外,表4的结果显示PCA3对Se也有一定的贡献。

第四主成分(PCA4)捕获Zn和Cd。PCA4的空间分布特征如图10所示。工业、农业、交通和自然地质过程均可导致农田土壤Cd、Zn的富集^[16]。Bing等^[49]的研究证实,成都平原的农业活动、矿山开采、工业排放、道路扬尘、垃圾处理等人为因素导致了区域内土壤Cd和Zn等重金属元素的积累。本次调查发现,

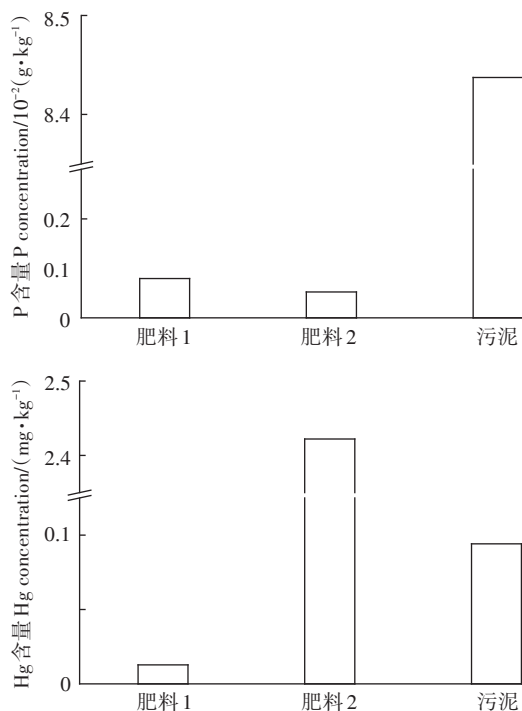


图9 肥料和污泥中Hg、P含量

Figure 9 Concentration of Hg and P in fertilizer and sludge

PCA4的高值区分布于研究区北部L河两岸、研究区南东部及南部地区,这些区域是化工产业分布地区,是重要的磷化工基地和化肥生产基地^[43]。化工企业产生的“三废”可能会引发周边土壤重金属富集^[50-52]。研究区化工厂污泥中Cd(123.01 mg·kg⁻¹)、Zn(2 683.02 mg·kg⁻¹)的含量分别是土壤样品平均值的144.7倍和20.5倍(图11),具有极大地影响土壤Cd、Zn含量的潜力。因此,推断研究区Zn、Cd的空间分布受控于当地化工企业。此外,研究区化工厂污泥中Pb(421.11 mg·kg⁻¹)、Hg(2.44 mg·kg⁻¹)含量达到土壤样品平均值的10倍左右,表明化工厂污泥同时具有影响土壤Pb、Hg含量的潜力。结合表4的分析结果,PCA4对Pb、Hg也有一定的贡献。

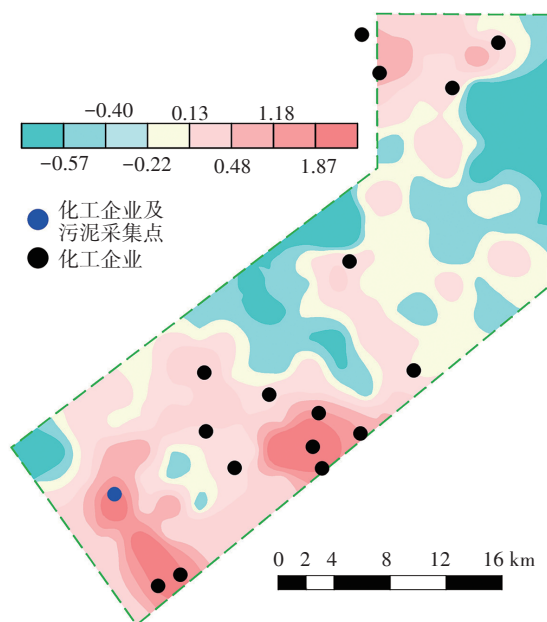


图10 PCA4的空间分布图

Figure 10 The fourth principal component distribution

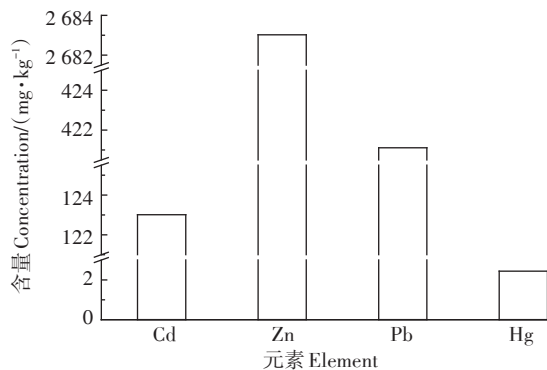


图11 污泥中Cd、Zn、Pb、Hg含量

Figure 11 Concentration of Cd、Zn、Pb、Hg in sludge

2.3 土壤重金属风险评价

研究区8种重金属(Se、P不做风险评价)的土壤单项污染指数统计结果如表5所示。8种重金属的单项污染指数平均值大小为Cd>Zn>Cu>Hg>Ni>Cr>As>Pb。Cd重度污染点位占总点位数的3.57%,中度污染点位占1.43%,轻度污染点位占7.14%,轻微污染点位占52.86%,35.00%为无污染,总体为轻度污染;Hg中度污染点位占1.14%,轻微污染点位占7.14%;As轻度污染点位占1.14%;Zn轻微污染点位占5.00%;Cu轻微污染点位占1.14%;其余元素无污染点位。

如前所述,研究区土壤Cd主要受化工企业生产所控,同时叠加了城市生活废物、磷矿开采^[18]、农业施肥^[17]等的来源,导致研究区内水稻土壤Cd污染总体偏高。Hg受城市生活废物的影响,但化工企业生产活动也有一定的贡献(表4)。前人研究结果显示,Cu在沉积岩母岩中含量总体较高,而Zn普遍偏低^[30],但研究区Zn的平均含量远高于参考值,而Cu的平均含量接近参考值(表2);结合研究区Zn的轻微污染点位多于Cu,且单项污染指数高于Cu的特征,进一步表明Zn受到非自然源影响,而Cu更多的受自然源影响。Ni、Cr、Pb、As的单项污染指数相近,但Ni、Cr无污染点位,显示其受自然源控制;Pb虽然也无污染点位,As仅有一处轻度污染点位,但二者的峰值、偏态(表2)和主成分分析结果(表4)都表明它们受非自然源(主要为磷石膏堆)的控制,这种非自然源没有造成Pb、As的污染。

研究区水稻土壤重金属内梅罗综合污染指数评价空间分布见图12。研究区水稻土壤受Cd污染胁迫,内梅罗综合污染指数为1.20,属轻度污染。重度

污染区及中度污染区主要分布于南部I河流域化工企业及J河南西侧化工企业区;轻度污染区主要位于I河、J河、L河附近,这也是化工企业的主要分布区,化工企业活动对水稻土壤污染状况存在较大的影响。

3 结论

(1)描述性分析结果表明,水稻土壤中Ni、Cr、Cu含量受自然因素控制;Pb、Zn、As可能受到轻微非自然因素的影响;Cd、Hg、P直接受到非自然因素的影响,且点状污染源的影响更为显著;Se含量分布同时受自然因素和人为因素的控制。

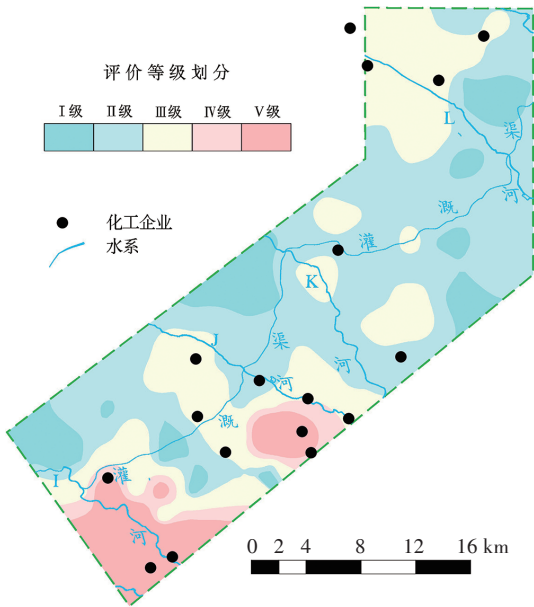


图12 水稻土壤重金属内梅罗综合污染指数空间分布图
Figure 12 Spatial distribution of Nemero comprehensive pollution index of farmland soil heavy metals

表5 土壤重金属单项污染指数评价结果

Table 5 Evaluation results of soil heavy metal single pollution index

重金属 Heavy metal	点位数 Number of points/个					单项污染指数平均值 Average of single factor pollution index
	无污染 Non-polluting ($P_i \leq 1$)	轻微污染 Light pollution ($1 < P_i \leq 2$)	轻度污染 Mild pollution ($2 < P_i \leq 3$)	中度污染 Medium pollution ($3 < P_i \leq 5$)	重度污染 Heavy pollution ($P_i > 5$)	
Ni	140	—	—	—	—	0.35
Cr	140	—	—	—	—	0.31
Cu	140	1	—	—	—	0.51
Pb	140	—	—	—	—	0.29
Zn	133	7	—	—	—	0.60
As	139	—	1	—	—	0.31
Hg	129	10	—	1	—	0.47
Cd	49	74	10	2	5	1.59

(2)聚类分析结果显示,I河-J河一带和L河沿岸地区的水稻土壤通常受到人为活动影响;K河-L河一带、J河与K河之间、研究区南西角受人类活动影响较小。

(3)研究区水稻土壤Cu、Cr、Ni、Se受控于母质风化和随后的成土作用;Pb和As主要来源于研究区内的磷石膏堆的释放;Hg和P主要来源于居民生活废物排放;Zn和Cd受控于当地化工企业活动。

(4)研究区水稻土壤中的Cd总体为轻度污染,其他元素总体无污染。研究区水稻土壤受Cd污染胁迫,内梅罗综合污染指数达到轻度污染程度。

参考文献:

- [1] BALTAS H, SIRIN M, GOKBAYRAK E, et al. A case study on pollution and a human health risk assessment of heavy metals in agricultural soils around Sinop Province, Turkey[J]. *Chemosphere*, 2020, 241: 1-41.
- [2] SHAHID M, AUSTRUY A, ECHEVARRIA G, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals: A review[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2014, 23(4): 389-416.
- [3] XI J, YU X, LI X, et al. Comparison of soil heavy metal pollution in suburban fields in different regions[J]. *Soils*, 2011, 43: 769-775.
- [4] WEI L, WANG K, NOGUERA D R, et al. Transformation and speciation of typical heavy metals in soil aquifer treatment system during long-term recharging with secondary effluent: Depth distribution and combination[J]. *Chemosphere*, 2016, 165: 100-109.
- [5] SARRET G, BLOMMAERT H, WIGGENHAUSER M. Comment on "Speciation and fate of toxic cadmium in contaminated paddy soils and rice using XANES/EXAFS spectroscopy"[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 401: 123240.
- [6] DING Q, CHENG G, WANG Y, et al. Effects of natural factors on the spatial distribution of heavy metals in soils surrounding mining regions[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 577-585.
- [7] 陈航, 王颖, 王澍. 铜山矿区周边农田土壤重金属来源解析及污染评价[J]. *环境科学*, 2022, 43(5): 2719-2731. CHEN H, WANG Y, WANG S. Source analysis and pollution assessment of heavy metals in farmland soil around Tongshan mining area[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(5): 2719-2731.
- [8] 陈雪, 刘鸿雁, 吴攀, 等. 基于GIS和PMF的铜仁植烟土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4): 794-801. CHEN X, LIU H Y, WU P, et al. Contamination characteristics and source apportionment of heavy metals in tobacco-planting soils in Tongren County based on GIS and PMF methods[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 794-801.
- [9] HUANG J, PENG S, MAO X, et al. Source apportionment and spatial and quantitative ecological risk assessment of heavy metals in soils from a typical Chinese agricultural county[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 126: 339-347.
- [10] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. *环境科学*, 2020, 41(9): 4197-4209.
- ZHANG F G, PENG M, WANG H Y et al. Ecological risk assessment of heavy metals at township scale in the high background of heavy metals, southwestern China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4197-4209.
- [11] JIN Y, O'CONNOR D, OK Y S, et al. Assessment of sources of heavy metals in soil and dust at children's playgrounds in Beijing using GIS and multivariate statistical analysis[J]. *Environment International*, 2019, 124: 320-328.
- [12] HOU D, O'CONNOR D, NATHANAIL P et al. Integrated GIS and multivariate statistical analysis for regional scale assessment of heavy metal soil contamination: A critical review[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231(1): 1188-1200.
- [13] HA H, OLSON J R, BIAN L, et al. Analysis of heavy metal sources in soil using kriging interpolation of principal components[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9): 4999-5007.
- [14] 马婵华. 不同钝化剂对轻度镉污染农田水稻吸附的钝化修复作用[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(2): 46-47. MA C H. Passivation and remediation effects of different passivation agents on the adsorption of lightly cadmium-contaminated farmland rice[J]. *Journal of Anhui Agriculture Science*, 2021, 49(2): 46-47.
- [15] 杨放, 施泽明, 孙璐, 等. 羟基磷灰石对成都平原水稻土中重金属的钝化效果研究[J]. *地球与环境*, 2020, 48(5): 567-573. YANG F, SHI Z M, SUN L, et al. Remediation effect of hydroxyapatite on paddy soil heavy metals in the Chengdu Plain[J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(5): 567-573.
- [16] LI B, XIAO R, WANG C, et al. Spatial distribution of soil cadmium and its influencing factors in peri-urban farmland: A case study in the Jingyang District, Sichuan, China[J]. *Environment Monitoring Assessment*, 2017, 189(1): 1-16.
- [17] 任加国, 王彬, 师华定, 等. 沱江上游支流土壤重金属污染空间相关性及其解析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(3): 530-541. REN J G, WANG B, SHI H D, et al. Spatial correlation and variation analysis of soil heavy metal contamination in the upper source tributary of Tuojiang River, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(3): 530-541.
- [18] ZHANG J, SHI Z, NI S, et al. Source identification of Cd and Pb in typical farmland topsoil in southwest China: A case study[J]. *Sustainability*, 2021, 13(7): 1-11.
- [19] 刘洋, 刘明庆, 王磊, 等. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(4): 785-793. LIU Y, LIU M Q, WANG L, et al. Evaluation of heavy metal pollution in farmland soil around an abandoned silicon plant in Yunnan[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(4): 785-793.
- [20] 周长松, 邹胜章, 李录娟, 等. 几种土壤重金属污染评价方法的对比[J]. *地球与环境*, 2015, 43(6): 709-713. ZHOU C S, ZOU S Z, LI L J, et al. Comparison of evaluation methods for heavy metal contamination[J]. *Earth and Environment*, 2015, 43(6): 709-713.
- [21] 杨玉敏, 师学义, 张琛. 基于内梅罗指数法的复垦村庄土壤重金属污染评价及空间分布[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 338-343. YANG Y M, SHI X Y, ZHANG C. Spatial distribution and evaluation of heavy metal pollution of reclaiming village based on Nemerow inte-

- grated pollution index method[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4):338-343.
- [22] YANG P Y, LU W X, LONG Y Q, et al. Assessment of heavy metal contamination in urban topsoil from Changchun City, China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011, 108(1):27-38.
- [23] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [24] ZHANG L, QIN X, TANG J, et al. Review of arsenic geochemical characteristics and their significance in arsenic pollution studies in karst groundwater in southwest China[J]. *Applied Geochemistry*, 2017, 77:80-88.
- [25] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1990:330-381. China National Environmental Monitoring Center. Chinese soil environmental background values[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1990:330-381.
- [26] 苏可, 孙如华, 刘元杰, 等. 苏北黄泛区土体指标多元统计分析:以宿迁市为例[J]. 焦作大学学报, 2021, 35(4):88-92. SU K, SUN R H, LIU Y J, et al. Multivariate statistical analysis of soil index in the north Jiangsu Yellow Plain area: A case study of Suqian City[J]. *Journal of Jiaozuo University*, 2021, 35(4):88-92.
- [27] FIELD A. Discovering Statistics using SPSS[M]. British:Sage Publications, Ltd., 2005:816.
- [28] 宋昊, 施泽明, 倪师军, 等. 四川省绵远河水系重金属物源探讨及环境质量评价[J]. 地球与环境, 2011, 39(4):543-550. SONG H, SHI Z M, NI S J, et al. Discussion on the origin of heavy metals and evaluation of water environment quality in the Mianyuan River, Sichuan Province[J]. *Earth and Environment*, 2011, 39(4):543-550.
- [29] LIU P, ZHAO H J, WANG L, et al. Analysis of heavy metal sources in vegetable soils in Shandong Province, China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(1):109-119.
- [30] 刘英俊. 元素地球化学[M]. 北京:科学出版社, 1984. LIU Y J. Geochemistry of element[M]. Beijing:Science Press, 1984.
- [31] ZUPAN M, EINAX J W, KRAFT J, et al. Chemometric characterization of soil and plant pollution: Part 1: Multivariate data analysis and geostatistical determination of the relationship and spatial structure of inorganic contaminants in soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2000, 7(2):89-96.
- [32] 师荣光, 张又文, 许萌萌, 等. 天津市郊区土壤重金属的污染评价与来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5):1069-1078. SHI R G, ZHANG Y W, XU M M, et al. Pollution evaluation and source apportionment of heavy metals in soils from Tianjin suburbs, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5):1069-1078.
- [33] KOMAREK M, ETTLER V, CHRASTNY V et al. Lead isotopes in environmental sciences: A review[J]. *Environmental International*, 2008, 34(4):562-577.
- [34] LEVER J H. Paget's disease of bone in Lancashire and arsenic pesticide in cotton mill wastewater: A speculative hypothesis[J]. *Bone*, 2002, 31(3):434-436.
- [35] LIU L, FAN S. Removal of cadmium in aqueous solution using wheat straw biochar: Effect of minerals and mechanism[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(9):8688-8700.
- [36] MEHARG A A, RAHMAN M M. Arsenic contamination of Bangladesh paddy field soils: Implications for rice contribution to arsenic consumption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(2):229-234.
- [37] 李佳宣, 施泽明, 唐瑞玲, 等. 磷石膏堆场对周围农田土壤重金属含量的影响[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2010(5):52-55. LI J X, SHI Z M, TANG R L, et al. Influence of phosphogypsum piles on the concentration of heavy metals in farming soil[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2010(5):52-55.
- [38] 张巧, 杨晟, 张建, 等. 南方某主要供水水库氮磷来源分析及控制对策[J]. 中国农村水利水电, 2020(11):234-237. ZHANG Q, YANG S, ZHANG J, et al. Source analysis and control strategy of nitrogen and phosphorus in a primary water supply reservoir in south China[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(11):234-237.
- [39] 李锋, 刘思源, 李艳, 等. 工业发达城市土壤重金属时空变异与源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(2):934-944. LI F, LIU S Y, LI Y, et al. Spatiotemporal variability and source apportionment of soil heavy metals in an industrially developed city[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2):934-944.
- [40] PECINA V, BRTNICKY M, BALTAZAR T, et al. Human health and ecological risk assessment of trace elements in urban soils of 101 cities in China: A meta-analysis[J]. *Chemosphere*, 2021, 267:1-38.
- [41] HU Y, LIU X, BAI J, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that has undergone three decades of intense industrialization and urbanization[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2013, 20(9):6150-6159.
- [42] HUANG Y, DENG M, LI T, et al. Anthropogenic mercury emissions in China from 1980 to 2012 in China[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 226:230-239.
- [43] 施泽明, 倪师军, 张成江, 等. 龙门山地区磷矿开采和加工过程中放射性环境问题探讨[J]. 矿物学报, 2011, 31(增刊1):726-727. SHI Z M, NI S J, ZHANG C J, et al. Discussion of radioactive environment during phosphate mining and processing in the Longmenshan area[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(Suppl 1):726-727.
- [44] 王磊, 唐文春, 秦兵, 等. 四川龙门山地区磷矿、煤矿开采对水系沉积物 Cd 等元素影响调查[J]. 地质科技情报, 2007, 26(6):36-41. WANG L, TANG W C, QIN B, et al. The survey of Cd and other elements in river sediments was affected by phosphorite deposits and coal mines in Longmenshan Mountain, Sichuan Province[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2007, 26(6):36-41.
- [45] 王玉林, 王春艳. 2006年—2013年德阳市绵远河和石亭江流域水体中总磷污染状况及其来源初探[J]. 资源节约与环保, 2015(9):180-182. WANG Y L, WANG C Y. Total phosphorus pollution and its sources in Mianyuan River and Shiting River basins of Deyang City from 2006 to 2013[J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2015(9):180-182.
- [46] 高德才, 张蕾, 刘强, 等. 菜地土壤氮磷污染现状及其防控措施[J]. 湖南农业科学, 2013, 2(4):302-312. GAO D C, ZHANG L, LIU

- Q, et al. Present status of nitrogen and phosphorus pollution in vegetable fields and its control measures[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013, 2(4):302-312.
- [47] XU Z, XIONG L, LI H, et al. Pollution characterization and source analysis of wet weather discharges in storm drainage[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2017, 72:169-181.
- [48] 徐强强, 李阳, 马黎, 等. 城市雨水管道沉积物氮磷污染溶出特性试验研究[J]. 环境科学研究, 2021, 34(3):646-654. XU Q Q, LI Y, MA L, et al. Experimental study of leaching characteristics of nitrogen and phosphorus in urban rainwater pipeline sediment[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(3):646-654.
- [49] BING H, XIANG Z X, ZHU H, et al. Spatiotemporal variation and exposure risk to human health of potential toxic elements in suburban vegetable soils of a megacity, SW China, 2012—2016[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2018, 25(5):4223-4237.
- [50] 郑海龙, 陈杰, 邓文靖, 等. 南京城市边缘带化工园区土壤重金属污染评价[J]. 环境科学学报, 2005, 25(9):1182-1188. ZHENG H L, CHEN J, DENG W J, et al. Assessment of soil heavy metals pollution in the chemical industrial areas of Nanjing peri-urban zone[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2005, 25(9):1182-1188.
- [51] 时瑶, 秦延文, 马迎群, 等. 长江流域上游地区“三磷”污染现状及对策研究[J]. 环境科学研究, 2020, 33(10):2283-2289. SHI Y, QIN Y W, MA Y Q, et al. Pollution status and control strategy of ‘three phosphorus’ pollution in the upper reaches of Yangtze River basin, China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(10):2283-2289.
- [52] 秦延文, 马迎群, 温泉, 等. 沱江流域总磷污染负荷、成因及控制对策研究[J]. 环境科学与管理, 2020, 45(2):20-25. QIN Y W, MA Y Q, WEN Q, et al. Pollution load, causes and control strategy of total phosphorus pollution in Tuojiang River basin[J]. *Environmental Science and Management*, 2020, 45(2):20-25.

(责任编辑:朱晓昱)