

中国淮北平原典型矿区农田表层土壤重金属污染特征与源解析

王运好¹, 桂和荣², 李致春^{1,3}, 余浩^{1,3*}, 王双杰¹, 张权¹

¹宿州学院环境与测绘工程学院, 安徽 宿州

²宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

³国家煤矿水害防治工程技术研究中心, 安徽 宿州

收稿日期: 2022年9月4日; 录用日期: 2022年10月3日; 发布日期: 2022年10月10日

摘要

为探究采煤活动影响区农田土壤重金属的含量特征与来源, 选取宿县矿区周边农田表层土壤重金属(Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb)作为研究对象。利用数理统计、多元统计分析和地累积指数法, 分析研究区农田表层土壤重金属的含量特征、污染水平和潜在污染来源。结果表明: 1) 在研究区采集的土壤样品中Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、As的含量高于安徽省土壤背景值; 2) 相关性分析研究表明: As与Cr之间存在较为明显的正相关性关系, 推测两者可能来自同一污染源; Cd和Ni、Cu正相关性明显, Cd的来源特征可能与Ni、Cu相似; Zn与Pb、Mn之间正相关性明显, 表明Zn的来源与Pb、Mn的来源相近。其他4种重金属元素Pb、Mn、Ni、Cu由于其元素之间相关性存在一定差异, 推测这5种重金属元素的来源不同。3) 主成分分析结果表明: 研究区农田表层土壤中的重金属元素受采矿活动、交通因素、农业面源污染及自然因素影响。4) 地累积指数结果表明: Zn、Pb、Ni、Mn、Cr呈无污染状态; As、Cd和Cu呈轻度污染状态。

关键词

重金属, 相关性分析, 主成分分析, 源解析

Characteristics and Source Analysis of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of Farmland in Typical Mining Areas of Huaibei Plain, China

Yunhao Wang¹, Herong Gui², Zhichun Li^{1,3}, Hao Yu^{1,3*}, Shuangjie Wang¹, Quan Zhang¹

*通讯作者。

文章引用: 王运好, 桂和荣, 李致春, 余浩, 王双杰, 张权. 中国淮北平原典型矿区农田表层土壤重金属污染特征与源解析[J]. 土壤科学, 2022, 10(4): 148-157. DOI: 10.12677/hjss.2022.104020

¹College of Environmental and Surveying Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

²School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

³National Coal Mine Water Damage Prevention and Control Engineering Technology Research Center, Suzhou Anhui

Received: Sep. 4th, 2022; accepted: Oct. 3rd, 2022; published: Oct. 10th, 2022

Abstract

In order to explore the content characteristics and sources of heavy metals in farmland soil in the area affected by coal mining activities, heavy metals (Cr, Mn, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb) in the surface soil of farmland around The Mining Area of Suxian County were selected as the research objects. Mathematical statistics, multivariate statistical analysis and land accumulation index method were used to analyze the content characteristics, pollution levels and potential pollution sources of heavy metals in the surface soil of farmland in the study area. The results showed that: 1) The contents of Mn, Zn, Pb, Cu, Cd and As in the soil samples collected in the study area were higher than the soil background values in Anhui Province. 2) Correlation analysis studies have shown that there is a relatively obvious positive correlation between As and Cr, and it is speculated that the two may come from the same pollution source; Cd is positively correlated with Ni and Cu, and the source characteristics of Cd may be similar to Ni and Cu; The positive correlation between Zn, Pb and Mn is obvious, indicating that the source of Zn is similar to the source of Pb and Mn. The other four heavy metal elements Pb, Mn, Ni, Cu have certain differences in the correlation between their elements, and it is speculated that the sources of these five heavy metal elements are different. 3) Principal component analysis results show that the heavy metal elements in the surface soil of the farmland in the study area are affected by mining activities, traffic factors, agricultural non-point source pollution and natural factors. 4) The results of the ground accumulation index show that Zn, Pb, Ni, Mn and Cr are in a state of no pollution; As, Cd, and Cu are mildly contaminated.

Keywords

Heavy Metals, Correlation Analysis, Principal Component Analysis, Source Resolution

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

农田土壤质量与农产品质量和人类健康之间存在紧密联系。农业生产是人类获取谷物的重要途径，土壤中重金属会经由农作物吸收，然后通过食物链转移到人体，从而对人体健康产生影响[1] [2]。

重金属在土壤中的积累主要与人类活动和自然因素有关(如：矿产资源的开采与加工、农药和肥料的施用及成土母质)，加之重金属在进入土壤后难以通过自然方式降解，进而使得重金属元素在土壤中不断累积[3] [4]。而且重金属具有致癌、致畸和致突变的危害(如：Cd 会损害人类的肾脏、肝脏同时还具有致畸性和易造成骨质疏松；Pb 会对肾脏功能造成极大损伤以及引起神经系统紊乱和贫血等症状；Cr 会对皮肤产生严重刺激导致皮肤溃烂) [5] [6] [7]。同时重金属元素会干扰土壤理化性质，破坏土壤微生态，进

而对土壤质量及农作物生长产生不利影响[8] [9]。

近年来,尤其是采煤活动影响区土壤重金属的含量特征、污染水平及来源,受到研究人员的广泛关注。如,苏海民等于2018年对宿州矿区周边表层土壤中重金属的地球化学基线和污染富集状况评价研究中,发现Cd、Cu属中度富集,Pb、As、Zn和Cr为轻度富集[10]。徐永新等研究禹州典型煤矿区周边土壤中的重金属含量特征,发现了该煤矿区土壤受煤炭的影响呈弱碱性,重金属容易沉积在土壤中且重金属Co和Cu的水平迁移能力比较强[11]。吴先亮等研究了黔西煤矿区周边土壤重金属污染情况及其潜在生态环境危害,发现该煤矿区及周围地区Hg、Cd、As的污染较严重,对环境潜在危害较大的重金属元素为Pb、Cd [12]。基于此,本文选取开发时间较长、最具代表性的煤炭开采区(宿县矿区)农田表层土壤为研究对象,研究其重金属的含量特征、污染水平及来源。以为采煤活动影响区土壤质量保护方案制定提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

宿州市地处安徽省东北部,介于东经116°09'~118°10'和北纬33°18'~34°38'之间。占地面积为9939 km²,地貌特征以平原为主,占全市土地总面积的91%。该区属于暖温带半湿润季风气候区,多年平均气温为14℃~14.5℃,年平均降水量在774~896 mm之间。矿产资源种类丰富多样,存储量大,其中以煤炭储量最为丰富,其储煤面积约2000 km²,预测储量6×10⁹ t,是我国重点规划的13个大型煤炭基地之一。

2.2. 样品采集与测试

2019年3月于宿县矿区农田采集41个表层土壤(0~10 cm)样品(图1)。同时现场记录所采土壤样品的坐标及周边环境状况。将土壤样品运回实验室后,去除样品中秸秆、植物根系和其他杂物后,将土壤样品置于预处理实验室进行风干。风干后样品进行研磨,并通过200目尼龙筛。取约0.2500 g过筛后样品放入聚四氟乙烯消解管中,加入1 mL盐酸、1 mL硝酸、2 mL氢氟酸,摇匀放入120℃恒温石墨消解炉上,消解约1~2 h,取下稍冷。用去离子水定容至50 mL,摇匀,5 min 6000 r·min⁻¹离心,再轻轻摇匀待测。使用HR-ICP-MS (Thermo Scientific ICA PQ, 美国)测试Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd和Pb的含量[13]。为了保障测试结果的准确性,每10个样品设置1个空白样品及所测土壤重金属元素标准物质,同时设置平行样品。标准样品的回收率在96%~102%之间,平行样之间相对偏差均小于5% [14]。

2.3. 地累积指数法

重金属的污染程度可通过地累积指数法进行评价,该法综合考虑人类活动因素和自然活动因素,进而多被用于评价土壤中重金属的污染状态[15]。地累积指数(I_{geo})通常称为Muller指数,是20世纪60年代晚期在欧洲发展起来的广泛用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标,尤其用于研究现代沉积物中重金属污染的评价。该指数不仅考虑了自然地质过程造成的背景值的影响和人为活动对重金属污染的影响,还反映出重金属分布的自然变化特征,所以地累积指数是区分人为活动影响的重要参数[16]。其计算公式如式(1)所示:

$$I_{geo} = \log_2 C/C_0k \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为重金属的地累积指数; C 为土壤样品中重金属的实际测量,单位为mg·kg⁻¹; C_0 为土壤中重金属的背景值,单位为mg·kg⁻¹。 k 为修正系数,目的是为了消除环境背景值的扰动,通常取1.5 [17] [18] [19]。本文选用安徽省江淮流域土壤背景值作为计算标准[20]。

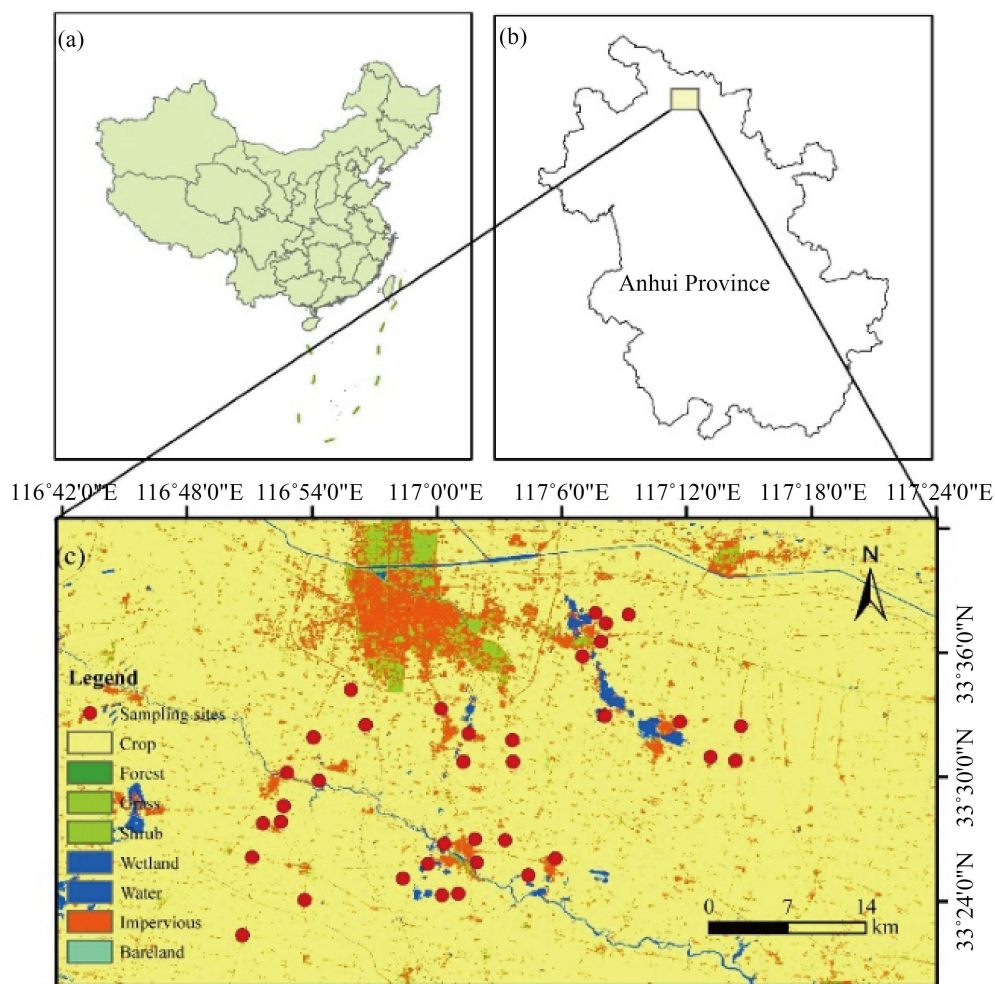


Figure 1. Schematic diagram of study area location and sampling point distribution
图 1. 研究区位置及采样点分布示意图

地累积指数的污染强度分级表如表 1 所示:

Table 1. Pollution intensity classification standard of I_{geo}
表 1. I_{geo} 污染强度分级标准

级别	I_{geo}	污染程度
0	小于 0	无污染
1	0~1	无污染到轻度污染
2	1~2	轻度污染
3	2~3	轻度污染到中度污染
4	3~4	中度污染
5	4~5	中度污染到强度污染
6	大于 5	强度污染

3. 结果与讨论

3.1. 重金属含量特征

宿县矿区表层土壤中 8 种重金属含量特征值列于表 2。Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 的含量变化范围分别为 47.78~69.43 mg/kg、296.96~784.68 mg/kg、1.48~52.46 mg/kg、26.28~73.19 mg/kg、41.58~77.94 mg/kg、11.02~28.49 mg/kg、0.18~0.32 mg/kg 和 30.14~40.43 mg/kg；其均值含量分别为 59.75 mg·kg⁻¹、537.14 mg·kg⁻¹、20.94 mg·kg⁻¹、46.53 mg·kg⁻¹、56.43 mg·kg⁻¹、20.85 mg·kg⁻¹、0.23 mg·kg⁻¹ 和 35.77 mg·kg⁻¹，均值大小依次为 Mn > Cr > Zn > Cu > Ni > Pb > As > Cd。对比安徽省江淮流域土壤背景值 [20] 发现，土壤样品中重金属 Mn、Zn、Pb、Cu、Cd、As 的均值含量较高，分别是背景值的 1.02、1.06、1.38、1.86、2.21、2.22 倍 [21]。由此可见，Mn、Zn、Pb、Cu、Cd 和 As 可能是研究区土壤中主要的重金属污染物。与苏海民等对宿州矿区周边表层土壤中重金属的地球化学基线和污染富集状况评价中研究 [10] 中宿州市煤矿区土壤中重金属元素 Zn、Cr、Cd、Pb、Cu、As 的质量浓度平均值对比发现：重金属 Zn、Cr、Cd 的质量浓度均值明显减小，重金属元素 Pb、Cu、As 质量浓度均值明显增大，由此可以推测重金属元素 Zn、Cr、Cd 的污染治理得到了良好的效果，但重金属元素 Pb、Cu、As 的污染程度较大，相关污染治理应当给予更多的关注。

Table 2. Characteristic values of heavy metal content in soil samples

表 2. 土壤样品重金属含量特征值

mg·kg ⁻¹	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Max (最大值)	69.43	784.68	52.46	73.19	77.94	28.49	0.32	40.43
Min (最小值)	47.78	296.96	1.48	26.28	41.58	11.02	0.18	30.14
AVERAGE (平均值)	59.75	537.14	20.94	46.53	56.43	20.85	0.23	35.77
STDEV (标准差)	4.73	110.79	9.94	11.15	8.06	3.97	0.03	2.42
CV (变异系数)	0.08	0.21	0.48	0.24	0.14	0.19	0.12	0.07
背景值 [20]	69.40	525.20	25.00	24.90	53.20	9.40	0.10	25.90

变异系数(CV)是表征数据离散度的统计指标，通过变异系数(CV)可定量分析重金属受人类活动的干扰强度 [22]。如表 2 所示：重金属元素的变异系数大小排序为 Ni > Cu > Mn > As > Zn > Cd > Cr > Pb。其中 Ni 在土壤中的分布差异较大，表明 Ni 可能受人为活动影响较大。Pb 的变异系数最小，表明可能其受人类活动影响程度较小。

3.2. 重金属源解析

3.2.1. 相关性分析

研究区域采集的土壤样品中含有的重金属元素之间存在一定相互联系，通过图 2 可以直观地推测出各个重金属元素之间的相关性：

根据图 2 相关性分析结果所知：As 与 Cr 之间存在极为明显的正相关性关系；Cd 与 Ni、Cu 之间以及 Zn 与 Pb、Mn 之间存在明显的正相关性关系；Pb 与 Cu 无相关性关系。基于此结果，推测出 As 与 Cr 之间存在较为明显的正相关性关系，说明两者可能出自同一污染源；Cd 和 Ni、Cu 相关性为明显的正相关性，说明 Cd 的来源特征可能与 Ni、Cu 相似；Zn 与 Pb、Mn 之间存在明显的正相关性，表明 Zn 的来源仅仅与 Pb、Mn 的来源相近，而与其他元素的来源不相同；Pb 与 Cu 间由于无明显相关性，两者来源

较为复杂,可以判断两者无同源性[23]。此外,Pb、Mn、Ni、Cu这4种重金属元素相互之间的相关性存在一定差异,难以推测其是否来自同一污染源[24]。

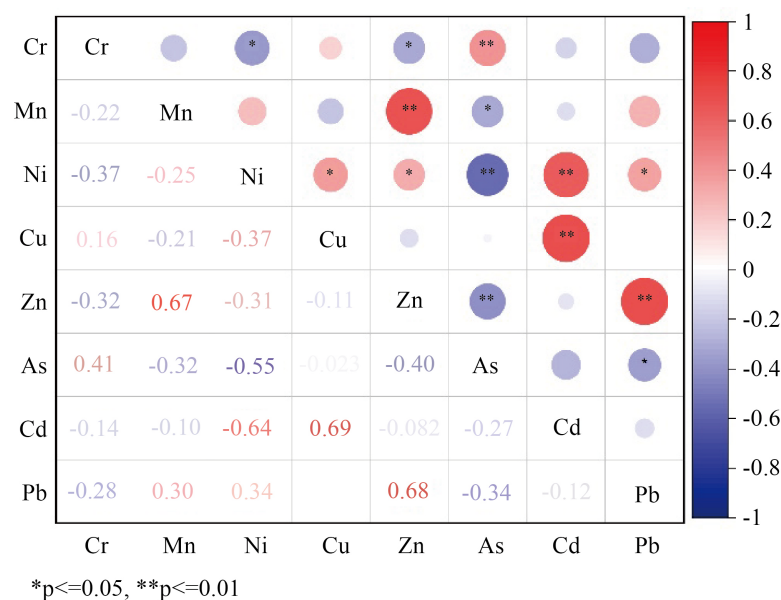


Figure 2. Correlation analysis of heavy metal elements
图2. 重金属元素相关性分析

3.2.2. 主成分分析

主成分分析是利用具有代表性的变量来解释众多单独变量的主要信息,并可对重金属元素的来源进行分析[25]。研究区土壤中重金属的主成分分析结果如图3所示:

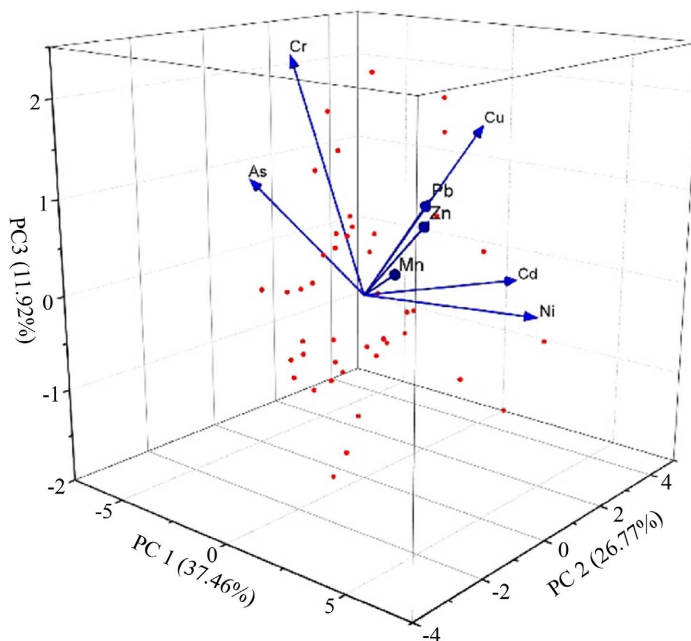


Figure 3. Principal component analysis diagram of soil heavy metals
图3. 土壤重金属主成分分析图

根据图 3 可知：第一主成分(PC1)对整体变量的贡献率为 37.46%，第二主成分(PC2)对整体变量的贡献率为 26.77%，第三主成分(PC3)对整体变量的贡献率为 11.92%，三个主成分对整体变量的贡献率累积达到 76.15%。基于此，通过三个主成分归纳整体变量反映出的信息并推测 8 种重金属污染源如下[26]。

第一主成分(PC1)的最大载荷为重金属元素 Ni 和 Cd，其对总体变量的解释率为 37.46%，结合表 2 重金属含量的污染特征值所示 Cd 的均值高于背景值，且 Cd 多源于人为活动，推测 PC1 可能是当地煤矿开采活动的影响[27]。第二主成分(PC2)主要载荷为重金属元素 Cu、Pb、Mn 和 Zn，对整体变量的贡献率为 26.77%。根据图 2 重金属元素相关性分析中 Zn 与 Pb 之间存在明显的正相关性，Pb 和 Zn 为汽车尾气和燃煤废弃中常见重金属元素，则可以认为 PC2 是燃烧源(汽车尾气和燃煤) [28]。第三主成分(PC3)中占比最大的载荷为重金属元素 Cr、As，对整体变量的贡献率为 11.92%。结合图 2 分析得出 As 仅仅与 Cr 表现出较为明显的正相关关系，因此判断 PC3 主要是农药和化肥使用产生的面源污染[29]。

3.3. 地累积指数污染评价

研究区表层土壤中各重金属 I_{geo} 特征值和箱形图分别如表 3、图 4 所示。

Table 3. I_{geo} characteristic values of heavy metals in soil samples

表 3. 土壤样品中重金属的 I_{geo} 特征值

	Cr	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
MAX	-0.58	-0.01	0.48	0.97	-0.03	1.01	1.04	0.06
MIN	-1.12	-1.41	-4.66	-0.51	-0.94	-0.36	0.21	-0.37
AVERAGE	-0.81	-0.58	-1.02	0.28	-0.51	0.54	0.53	-0.12

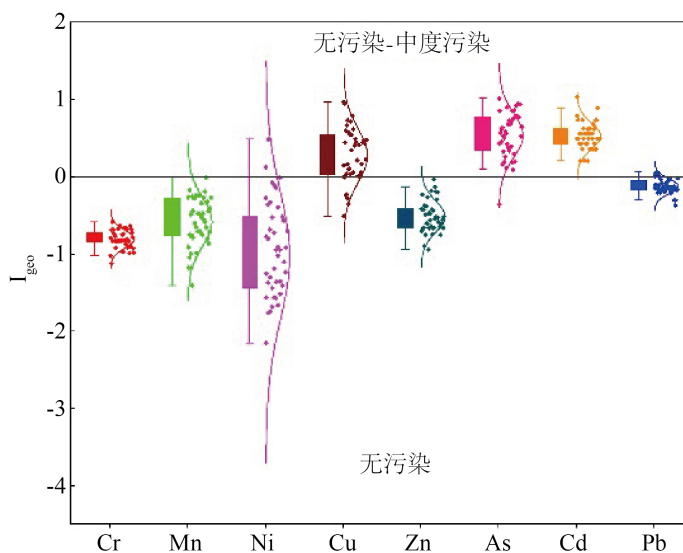


Figure 4. Box plot of the I_{geo} values of heavy metals in the soil of the study area

图 4. 研究区土壤中重金属的 I_{geo} 值箱形图

根据表 3 可得，Zn、Mn、Cr、Pb、Ni 的 I_{geo} 均值均小于 0，基本处于无污染的状态；由于 Pb、Ni 的最大值介于 0~1 之间，表明少部分采样点的土壤重金属污染程度属于无污染到轻度污染的水平。As、

Cd 和 Cu 三者的 I_{geo} 均值介于 0~1 之间, 其中 As、Cd 的最大值大于 1, 推测采样点总体处于无污染到轻度污染的水平, 少部分达到轻度污染的程度。结合图 4 研究区土壤中重金属的 I_{geo} 值箱型图所示, 重金属元素 Zn、Mn、Cr、Pb、Ni 整体处于无污染的类别。Cu、As、Cd 对应的无污染到中度污染类别范围最广, 包括煤矿塌陷区、农田区、交通道路旁以及人类居住密集地区等。从平均水平来看, 整个研究区的土壤已经受到这 3 种重金属的显著污染[30]。

4. 结论

1) 宿县矿区农田表层土壤中重金属元素 Cr、Mn、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 均值含量分别为 $59.75 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $537.14 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $46.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $56.43 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $20.85 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $35.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其与前人所做的相关研究对比发现, 重金属 Zn、Cr、Cd 的质量浓度均值明显减小, 重金属元素 Pb、Cu、As 质量浓度均值明显增大。这表明当地受到重金属元素 Pb、Cu、As 较强的污染, 应当加强相关污染治理力度。

2) 相关性分析得出 Pb 与 Cu 两者无同源性; As 与 Cr 之间存在较为明显的正相关性关系, 两者可能来自同一污染源; Cd 和 Ni、Cu 正相关性明显, Cd 的来源特征可能与 Ni、Cu 相似; Zn 与 Pb、Mn 之间正相关性明显, 表明 Zn 的来源与 Pb、Mn 的来源相近; 重金属元素 Pb、Mn、Ni、Cu 相互之间的相关性存在差异难以推测其污染源的同一性。

3) 通过主成分分析可以将土壤 8 个重金属元素产生来源归纳为 3 个主要成分: PC1 可归为由矿产开采的人为活动, PC2 代表道路交通产生的尾气造成的影响, 及受大气迁移、沉降以及雨雪淋溶形成的自然因素协同作用的结果。PC3 可归为耕作时施用过量的化肥与农药形成的面源污染造成的影响。

4) 地累积指数法计算结果表明在研究区的土壤环境之中, Zn、Pb、Ni、Mn 和 Cr 主体呈无污染的状态。As、Cd 和 Cu 介于无污染状态和轻度污染状态之间, 部分采样点处于轻度污染状态, 表明 As、Cd 和 Cu 的污染程度较高。

基金项目

本研究得到宿州学院第十六届大学生科研项目立项(编号: KYLXYBXM22-022)、宿州学院第十六届大学生科研项目立项(编号: KYLXYBXM22-033)、安徽省煤矿勘察工程技术中心科研平台开放课题(编号: 2022ykf11)、国家自然科学基金项目(编号: 42107280)、宿州学院博士科研启动基金(编号: 2019jb26)的支持。

参考文献

- [1] Wang, J.H., Wu, H.H., Wei, W.X., Xu, C.B., Tan, X., Wen, Y. and Lin, A.J. (2022) Health Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in the Farmland of Megalopolis in China by Using APCS-MLR and PMF Receptor Models: Taking Huairou District of Beijing as an Example. *The Science of the Total Environment*, **835**, Article ID: 155313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155313>
- [2] Huang, J.L., Wu, Y.Y., Sun, J.X., Li, X., Geng, X.L., Zhao, M.L., Sun, T. and Fan, Z.Q. (2021) Health Risk Assessment of Heavy Metal(oid)s in Park Soils of the Largest Megacity in China by Using Monte Carlo Simulation Coupled with Positive Matrix Factorization Model. *Journal of Hazardous Materials*, **415**, Article ID: 125629. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125629>
- [3] 檀丽娟, 冯松宝, 程琛, 郭朋朋. 淋滤作用下朱仙庄煤矸石中重金属的迁移研究[J]. 广州化工, 2019, 47(15): 131-133.
- [4] 檀丽娟, 冯松宝, 程琛, 李亚, 何帅. 朱仙庄煤矿周边土壤有机质和重金属的含量研究[J]. 延边大学学报(自然科学版), 2020, 46(3): 256-259+269. <https://doi.org/10.16379/j.cnki.issn.1004-4353.2020.03.012>
- [5] 尚婷婷, 张亚群, 周静, 丁杰萍, 张志杰. 多元统计分析在农田土壤重金属污染源解析中的应用[J]. 环境生态学,

- 2022, 4(4): 93-97.
- [6] 雷康平, 黄铖, 朱荣莉, 王仕会, 马嘿沐呷, 秦鱼生. 凉山州土壤重金属与粳稻中重金属相关性评价[J]. 农业研究与应用, 2022, 35(2): 62-69.
- [7] 薛鲁燕, 张海峰, 蔡葵, 赵爱鸿, 赵征宇, 孙永红, 王文娇. 论农田土壤重金属污染的危害及修复技术[J]. 农业与技术, 2020, 40(13): 41-42. <https://doi.org/10.19754/j.nyyjs.20200715016>
- [8] 冷学军, 叶靓, 米瑞冬, 龚兴涛, 杨刚. 攀枝花钒钛矿区土壤重金属健康风险研究[J]. 四川环境, 2022, 41(2): 151-156. <https://doi.org/10.14034/j.cnki.schj.2022.02.024>
- [9] 幸福萌, 吕笑非, 徐琳雅, 李昊泽, 杨瑜周, 张玉楠, 江梦颖, 戚可欣. 杭州湾不同围垦年限农田土壤重金属污染风险分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(3): 59-64.
- [10] 苏海民, 孙朋, 张勇. 宿州市煤矿区土壤重金属地球化学基线及污染评价研究[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(12): 1568-1572+1601. <https://doi.org/10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.12.014>
- [11] 徐永新, 李莉莎, 于志刚. 禹州典型煤矿区周边土壤中的重金属含量特征研究[J]. 许昌学院学报, 2021, 40(5): 40-44.
- [12] 吴先亮, 黄先飞, 李朝婵, 胡继伟, 唐风华, 张泽东. 黔西煤矿区土壤重金属污染水平及其形态[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 335-341. <https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2018.06.048>
- [13] 聂泽宇, 邬剑宇, 吴小东, 黄皓旻, 施积炎. 荧光溶解性有机质 EEMs 的新旧自组织映射图解析方法比较研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(1): 357-369. <https://doi.org/10.13671/j.hjxxb.2016.0149>
- [14] 罗满华, 张丽聪, 李海龙, 郭跃华, 肖凯. 深圳湾和茅洲河湿地浅层沉积物孔隙水中营养盐和金属元素赋存特征及其界面扩散通量研究[J]. 海洋学报, 2022, 44(8): 11-22.
- [15] 徐蕾, 贺心然, 肖昕, 栾慧君. 煤粮复合区土壤重金属含量特征及其污染评价[J]. 环境科技, 2021, 34(2): 53-57. <https://doi.org/10.19824/j.cnki.cn32-1786/x.2021.0026>
- [16] 滕彦国, 庾先国, 倪师军, 张成江. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. 环境科学与技术, 2002(2): 7-9+48. <https://doi.org/10.19672/j.cnki.1003-6504.2002.02.003>
- [17] 范新瑞, 谢莹. 铜陵新桥矿区周边表层土壤重金属含量及污染评价[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(9): 17-19.
- [18] 崔雅红, 崔炜, 孟庆俊, 李文博, 冯启言, 周末. 陕西高坪石煤矿区重金属污染及生态风险评价[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 157-162. <https://doi.org/10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.02.022>
- [19] 杨涛. 赣南钨矿区农田土壤重金属污染特征及风险评价[D]: [硕士学位论文]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [20] 陈兴仁, 陈富荣, 贾十军, 陈永宁. 安徽省江淮流域土壤地球化学基准值与背景值研究[J]. 中国地质, 2012, 39(2): 302-310.
- [21] 江雅琪, 桂和荣, 陈晨, 王春雷, 余浩, 陈家玉, 李晨. 宿州市城市景区水域底泥重金属含量特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2021, 40(8): 2410-2418.
- [22] Chen, K., Liu, Q.M., Peng, W.H. and Liu, X.H. (2022) Source Apportionment and Natural Background Levels of Major Ions in Shallow Groundwater Using Multivariate Statistical Method: A Case Study in Huaibei Plain, China. *Journal of Environmental Management*, **301**, Article ID: 113806. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113806>
- [23] 韩存亮, 罗炳圣, 常春英, 邓一荣, 熊键, 王俊, 李朝晖. 基于多种方法的区域农业土壤重金属污染成因分析研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(2): 176-183. <https://doi.org/10.19741/j.issn.1673-4831.2021.0178>
- [24] 王越, 莫莉, 余新晓, 师华定, 费杨. 粤北典型工矿区土壤重金属富集特征、来源解析及风险评价[J/OL]. 环境科学, 1-15. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202204271>, 2022-08-18.
- [25] 赵霏, 李红芳, 彭英湘, 邢宏霖, 刘新亮, 刘锋, 黄敏, 胡莲, 彭金花. 典型涉污企业周边土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测, 2022, 38(3): 126-136. <https://doi.org/10.19316/j.issn.1002-6002.2022.03.14>
- [26] 乔雯, 王议, 张德强, 殷秀兰, 白光宇, 何培雍. 某矿区土壤重金属分布特征及来源解析[J]. 现代地质, 2022, 36(2): 543-551. <https://doi.org/10.19657/j.geo.science.1000-8527.2022.005>
- [27] 李宇, 杨胜科, 胡瑞新, 解亚丽, 李英, 黄小琴. 银川平原不同地貌单元土壤重金属的分布特征及其风险评价[J/OL]. 环境化学, 1-15. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1844.X.20220811.1029.008.html>, 2022-08-18.
- [28] 马杰, 沈智杰, 张萍萍, 刘萍, 刘今朝, 孙静, 王玲灵. 基于 APCS-MLR 和 PMF 模型的煤研山周边耕地土壤重金属污染特征及源解析[J/OL]. 环境科学, 1-18. <https://doi.org/10.13227/j.hjxx.202206045>, 2022-08-18.
- [29] 赵东杰, 王学求. 滇黔桂岩溶区河漫滩土壤重金属含量、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2020, 40(4):

1609-1619. <https://doi.org/10.19674/j.cnki.issn1000-6923.2020.0181>

- [30] 黄剑波, 姜登登, 温冰, 王磊, 石佳奇, 周艳. 基于蒙特卡罗模拟的铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属健康风险评估[J/OL]. 环境科学, 1-18. <https://doi.org/10.13227/j.hjx.202205055>, 2022-08-18.