

缪成波,于萌,卢刚,等.干旱区露天煤矿降尘重金属分布特征及来源分析[J].江苏农业科学,2020,48(22):295-300.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.22.053

干旱区露天煤矿降尘重金属分布特征及来源分析

缪成波^{1,2},于萌³,卢刚³,刘君洋^{1,2},杨建军^{1,2}

(1.新疆大学资源与环境科学学院,新疆乌鲁木齐 830046; 2.教育部绿洲生态重点实验室,新疆乌鲁木齐 830046;

3.新疆维吾尔自治区水土保持生态环境监测总站,新疆乌鲁木齐 830099)

摘要:为研究干旱区露天煤矿——新疆准东北山煤矿降尘中 6 种重金属元素[铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)]的分布特征及其来源,在北山煤矿下风向布设 49 个降尘缸,分 3 个时间段收集 113 个降尘样品,采用原子吸收仪测定降尘中的 6 种重金属元素含量,分析其分布特征,并结合聚类分析和因子分析对研究区降尘重金属来源进行探讨。结果表明,(1)北山煤矿降尘中重金属元素平均含量表现为 $Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Pb$,其中 Fe、Mn、Ni 元素属于中度变异,Pb、Cu、Zn 元素属于高度变异。(2)Pb 元素在四号堆煤厂及停车场周边含量较高,Cu 元素的高值区主要分布于采煤区的下风向,而 Zn、Fe、Mn、Ni 元素的高值区比较分散,主要位于研究区中部及东部。(3)Fe、Mn、Ni 元素主要来源于成土母质,Cu 元素主要受矿山开采活动影响,Pb 元素主要来自交通车辆尾气及轮胎磨损,而 Zn 元素的来源不确定。(4)北山煤矿大气降尘中重金属元素主要来源及其贡献率依次为成土母质贡献率为 48.40%,矿山开采活动的影响贡献率为 23.55%,交通车辆尾气及轮胎磨损贡献率为 17.16%,其他源贡献率约为 10.89%。研究结果显示,重金属元素空间分布有所差异,主要来源为土壤成土母质、矿山开采活动、交通车辆尾气及轮胎磨损。

关键词:露天煤矿;降尘;重金属;新疆准东;来源分析

中图分类号: X53;X752 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)22-0295-06

干旱荒漠区易遭受风蚀扬尘的危害,而露天煤矿的开采、存储、运输以及煤电化工企业等人为因素造成的工业废气、汽车尾气和煤粉颗粒则加剧了区域扬尘污染。扬尘作为环境中除土壤外重金属的主要赋存介质,吸附着大量的重金属污染物^[1-2],重金属通过大气沉降等途径持续输入到地表环境中,对生态系统产生了负面影响^[3-4],也可以通过人体皮肤及呼吸系统造成人体功能性障碍和不可逆的损伤^[5-6]。因此,研究大气降尘中重金属的分布特征及其来源具有重要意义。

近年来,国内外学者对环境中的重金属进行了大量研究,包括重金属的污染水平^[7]、分布特征^[8-9]、风险评价^[10-11]以及源解析^[12-13]等。研究区主要包括城市^[14]、道路^[15]、水体^[16]及工农业^[17-18]集中区域等,而针对干旱区露天煤矿扬尘中

重金属的研究较少。为此,本研究以新疆准东北山露天煤矿为研究区,在下风向区域布设降尘缸采集降尘,测定其中的铅(Pb)、铜(Cu)、锌(Zn)、铁(Fe)、锰(Mn)、镍(Ni)等 6 种重金属的含量,通过多元统计分析结合研究区工业布局、交通等因素综合分析降尘中的重金属来源,以期为研究区扬尘重金属污染治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

北山露天煤矿以煤炭、煤电、煤化工为主要建设开发项目,地处准噶尔盆地东部、卡拉麦里西南山前戈壁荒漠带。该区域整体呈北高南低,海拔为 560~620 m,属于典型的极端干旱暖温带大陆性气候,全年主导风向为西北风,多年平均风速为 2.0~3.7 m/s,夏季炎热干燥,冬季寒冷少雪,昼夜温差大,蒸发作用强烈,年均气温为 7.0℃,多年平均降水量为 183.5 mm、平均蒸发量为 2 042.3 mm。土壤以荒漠风沙土、灰漠土及盐碱土为主,植被稀少、类型单一,主要以蒙古类型的灌木和半灌木为主。

1.2 样品采集与处理

样品采集时间为 2018 年 7—8 月,以北山露天

收稿日期:2020-02-28

基金项目:国家自然科学基金(编号:41661057、41601572);新疆维吾尔自治区财政专项(编号:2517HXKT1)。

作者简介:缪成波(1992—),男,甘肃景泰人,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化治理研究。E-mail:miaochb729@163.com。

通信作者:杨建军,博士,副教授,主要从事干旱区水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:yjjdfly@sina.com。

煤矿为中心(图 1),综合考虑地形地貌、工厂布局及运输道路污染源分布等因素,按照均匀布设和重点布设的原则,在主导风向的下风向布设了 49 个降尘收集器,分 3 个时段采集了 113 个降尘样品。

在实验室将收集器内的样品刷下后风干,去除昆虫、叶子等杂物,用玛瑙研钵将样品研磨粉碎,过 100 目尼龙筛备用。使用 Perkin Elmer AA900 系列

原子吸收仪测定重金属元素含量。采用 $\text{HNO}_3 - \text{H}_2\text{SO}_4 - \text{HClO}_4$ 法消煮制备待测样品,所有使用药品均采用优级纯,同时制备 3 份无土样的全程序试剂空白溶液。测定样品前对各元素做校准曲线,相关系数 $r \geq 0.999$,采用土壤标准样品(GSS-1)进行质量控制,误差在 5% 以内。

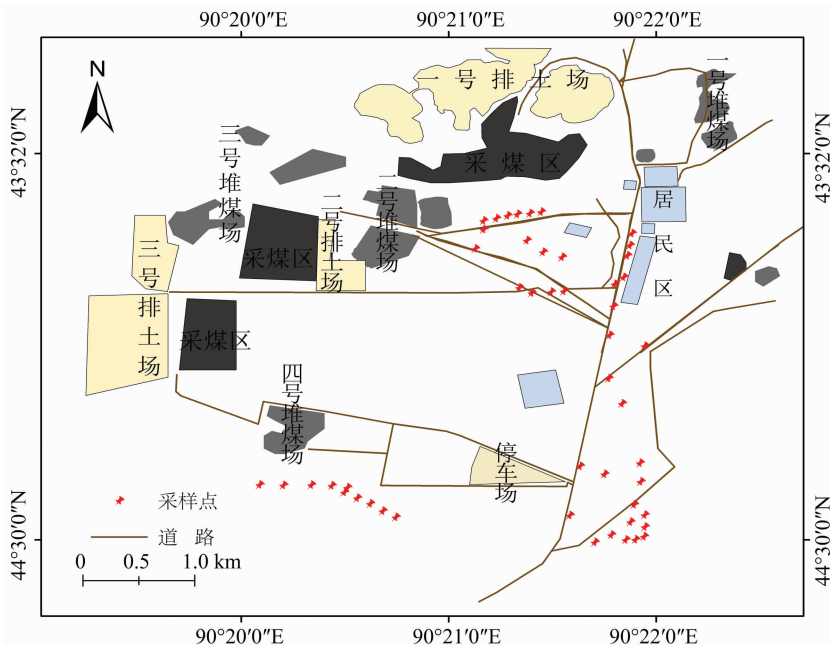


图1 研究区采样点分布示意

1.3 数据处理

在 ArcMap 10.4 软件中利用反距离权重法进行空间分析,研究重金属含量空间分布特征。运用层序聚类分析(HCA)进行定性源解析,通过对具有相似性的变量进行重复聚类,以降低各个类组间的相似性^[19],并利用 R 语言使用 heatmap 软件包进行二维层序聚类分析,采用离差平方和法(Ward's method)及欧氏距离进行聚类分析。参考杨丽萍等的方法^[20-21]进行因子分析,对实测元素含量进行运算,求出公因子数的因子载荷矩阵来反映因子与变量间的亲疏关系,并结合研究区的具体情况,获得主要污染来源及其贡献率^[22]。采用 SPSS 19.0 对数据进行因子分析。

2 结果与分析

2.1 降尘中重金属含量特征

由表 1 可知,6 种重金属含量的极值分布范围较广,平均含量从大到小表现为 $\text{Fe} > \text{Mn} > \text{Zn} > \text{Cu} > \text{Ni} > \text{Pb}$;其中,Fe 含量平均值最大,Pb 含量平

均值最小,分别为 116.396、0.184 mg/kg,各重金属元素含量的差异较大。偏度为 0.31~4.52,均大于 0,算术平均值大于相应的中位数,表明 6 种重金属元素的含量值倾向于平均数的右侧分布。变异系数可以反映重金属含量受人为活动的影响,变异系数越大,人为活动干扰越强烈^[23]。变异程度可分为 3 类^[24],变异系数 $< 15\%$ 为轻度变异,变异系数介于 $15\% \sim 35\%$ 之间为中度变异,变异系数 $> 35\%$ 为高度变异。本研究区重金属含量变异系数大小表现为 $\text{Pb} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Mn} > \text{Fe} > \text{Ni}$,其中 Pb、Cu、Zn 属于高度变异,Fe、Mn、Ni 属于中度变异,表明 Pb、Cu、Zn 等 3 种元素含量差异较大,受人类活动影响明显,存在明显的空间差异。

2.2 降尘重金属空间分布特征

从图 2 可以看出,Pb、Zn、Fe、Mn 元素含量高值区占研究区大部分面积,其余元素含量的高值区分布面积相对较小。Pb 元素在四号堆煤场及停车场周边含量较高,说明其受到运输车辆的影响。Cu 元素含量的高值区主要分布于采煤区的下风向,说明

表 1 研究区重金属含量数理统计

项目	Pb 含量	Cu 含量	Zn 含量	Fe 含量	Mn 含量	Ni 含量
平均值 (mg/kg)	0.184	0.317	0.393	116.396	2.960	0.192
最大值 (mg/kg)	0.859	0.941	0.883	219.610	4.678	0.345
最小值 (mg/kg)	0.098	0.115	0.140	57.432	1.413	0.124
标准偏差	0.115	0.197	0.158	33.889	0.913	0.044
偏度系数	4.52	1.45	0.63	0.68	0.31	0.91
变异系数 (%)	62.47	62.03	40.27	29.12	30.86	22.76

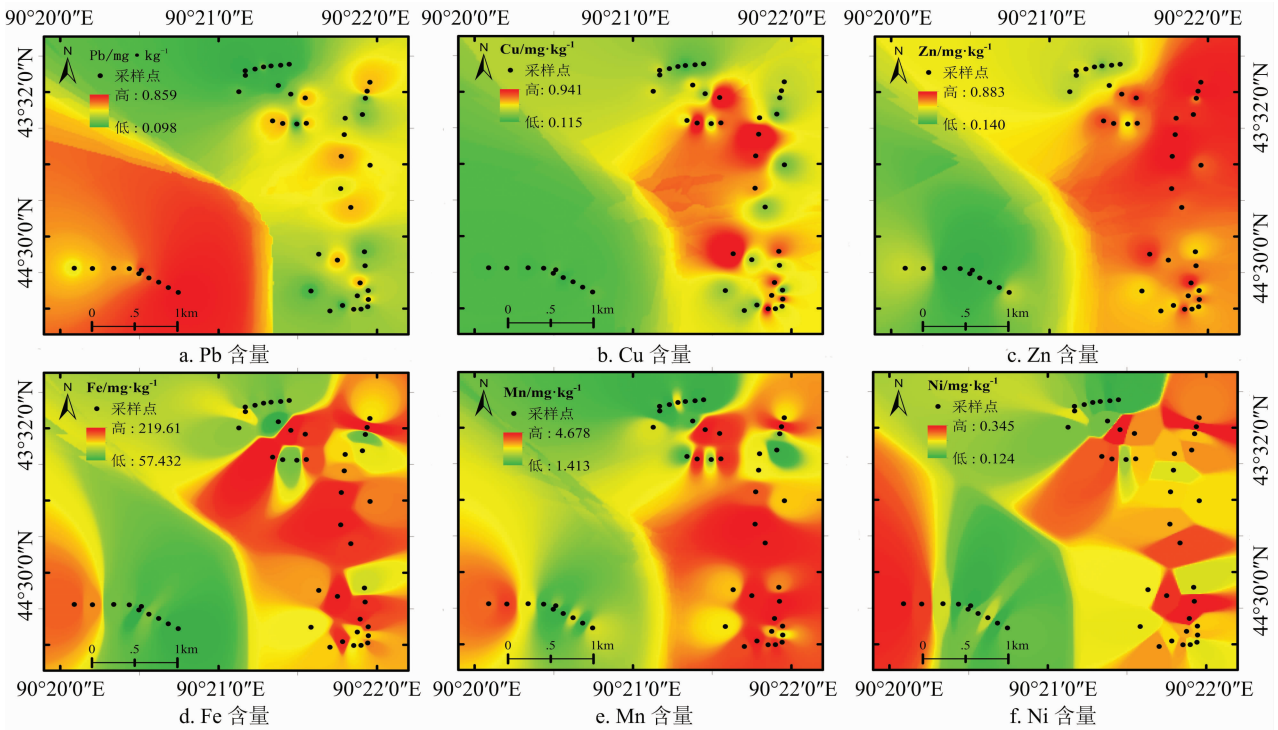


图2 研究区降尘重金属空间分布

其受到采矿活动的影响。而 Zn、Fe、Mn、Ni 元素含量的高值区具有一定的相似性,其分布较分散,占据研究区中偏东的大部分区域。

2.3 矿区降尘中重金属来源分析

2.3.1 降尘重金属的层序聚类分析 本研究利用聚类分析分别以采样点位和重金属元素含量为目标进行聚类,具有相同或相似含量特征和来源的采样点会被聚为一类,而被聚为一类的重金属元素可能具有相同或相似的来源^[25]。由图 3 可知,研究区 4 个区域中的 49 个降尘采样点被聚集在 4 个类组中。在各重金属目标物中,Fe、Mn、Ni 聚为一类,Cu 和 Zn 聚为一类,Pb 单独为一类,被聚集为一类的重金属元素可能来自相同或相似的污染源。

2.3.2 降尘重金属因子分析 因子分析法使用前,需对标准化数据进行 Kaiser - Meyer - Olkin (KMO)

检验和 Bartlett's 球形检验,以确定数据是否适合做因子分析。通过表 2 分析结果可知,KMO 检验值为 0.696 (>50%),Bartlett's 球形检验的近似卡方值为 170.899,其伴随概率为 0.000 < 0.05。而表 3 结果显示,公因子方差提取值均大于 0.7,其中 Pb、Cu 的提取值都大于 0.9,Zn、Fe、Ni 的信息提取值也大于 0.8,由此可知,在对本研究区降尘重金属含量数据处理过程中信息提取率较高,只有极少数的信息丢失,适合采用因子分析法。

提取主因子的特征值在全部特征值之和中所占的比例(即累积方差贡献率)达到 85% 及以上,则提取因子方差贡献率越大,说明该因子相对所有评价因素的重要程度越大^[26]。根据表 4 可知,当因子个数为 3 时,累积方差贡献率为 89.11%,此时的原始数据信息丢失较少,因子分析效果较为理想,因

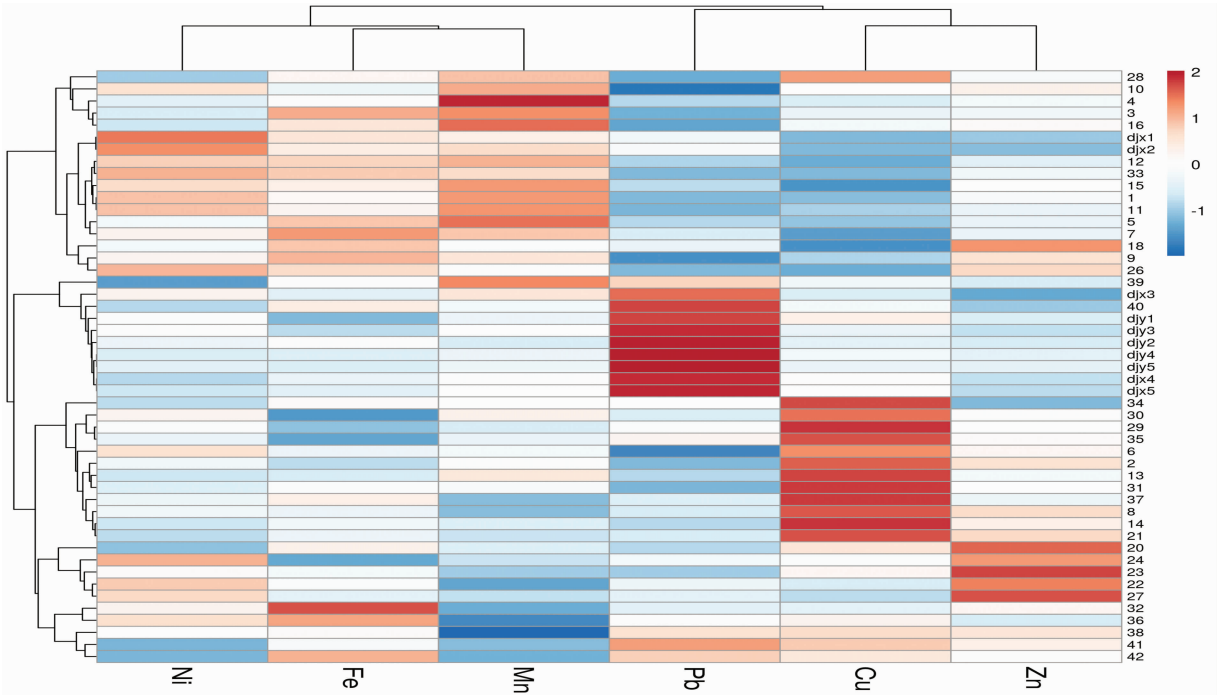


图3 重金属二维层序聚类分析热图

表 2 KMO 检验和 Bartlett's 球形检验

检验方法	项目	数值
KMO 检验	检验值	0.696
	近似卡方值	170.899
Bartlett 球形检验	自由度	15
	P 值	0.000

表 3 公因子方差

元素	初始值	提取值
Pb	1	0.993
Cu	1	0.965
Zn	1	0.869
Fe	1	0.863
Mn	1	0.763
Ni	1	0.894

此主因子设置为 3 个,并分别命名为 a1、a2、a3。
根据相关研究^[15-16]可知,对于未受污染区域—

注:因子提取方法为主成分分析法。

表 4 降尘中重金属因子分析的总方差解释

因子	初始特征值			旋转前			旋转后		
	特征值	方差百分比 (%)	累积方差贡献率 (%)	特征值	方差百分比 (%)	累积方差贡献率 (%)	特征值	方差百分比 (%)	累积方差贡献率 (%)
1	3.433	57.212	57.212	3.433	57.212	57.212	2.904	48.395	48.395
2	0.983	16.385	73.597	0.983	16.385	73.597	1.413	23.549	71.944
3	0.931	15.511	89.108	0.931	15.511	89.108	1.030	17.164	89.108
4	0.365	6.090	95.199						
5	0.175	2.911	98.109						
6	0.113	1.891	100.000						

注:因子提取方法为主成分分析法。

般采用初始成份矩阵就能较好地解释实际情况,而对于污染地区选用经过旋转的载荷矩阵解释能更好地说明环境问题,并且通过方差最大化正交旋转法旋转初始因子负荷矩阵,因子变量更具有可解释性,命名清晰性更高^[27]。由于本研究区周边大气污

染较为严重^[28],因此选用旋转后的载荷矩阵(表 5)探讨该区域的污染来源。通过对研究区降尘重金属含量数据进行因子分析,主要提取 3 个不同的主因子,其累计贡献率达 89.11%,可以很好地解释污染来源信息。

表 5 降尘中重金属因子分析的因子载荷矩阵

元素	初始成分			旋转成分		
	a1	a2	a3	a1	a2	a3
Pb	-0.264	0.795	0.540	-0.086	-0.063	0.991
Cu	0.545	-0.444	0.686	0.129	0.972	-0.054
Zn	0.891	-0.100	0.255	0.682	0.630	-0.079
Fe	0.894	0.121	-0.222	0.899	0.160	-0.173
Mn	0.825	0.276	-0.079	0.856	0.170	0.044
Ni	0.891	0.230	-0.219	0.935	0.111	-0.084
贡献率(%)	57.21	16.39	15.51	48.40	23.55	17.16
累计贡献率(%)	57.21	73.60	89.11	48.40	71.95	89.11

注:a1、a2、a3 分别为第一、第二、第三因子。

a1 因子中,Fe、Mn 和 Ni 元素具有较大的因子载荷,其载荷量分别为 0.899、0.856、0.935,因此这 3 种元素可以较好地反映该因子的污染来源信息,a1 的贡献率达 48.40%。a2 因子中 Cu 元素的载荷量最高,其载荷量为 0.972,因此认为该元素的污染来源信息可以很好地被第二因子反映,a2 的贡献率为 23.55%。a3 因子中 Pb 元素的载荷量最高,其载荷量为 0.991,可以说明其可以很好地反映该因子的来源,而整个矿区内降尘中重金属元素 Pb 属于高度变异,表明 Pb 元素受人为因素影响较大,a3 对大气降尘重金属的贡献率为 17.16%。

3 讨论

本研究区重金属元素中 Pb、Cu、Zn 属于高度变异,Fe、Mn、Ni 属于中度变异,表明不同区域 Pb、Cu、Zn 等 3 种元素含量差异较大,受人类活动影响明显,存在明显的空间差异。聚类分析与因子分析结果具有相似性,结果表明 Fe、Mn 和 Ni 元素的来源具有相似性,Cu 元素与 Zn 元素具有同源性,Pb 元素来源独特。Facchinelli 等通过研究发现,Fe、Mn 及 Ni 元素的来源多受岩石风化、自然土壤的影响^[29-30];也有研究者发现,成土母质极大地影响了 Fe、Mn 和 Ni 元素的形成与聚集^[31-32]。研究区内有大量的排土场及未铺装的运煤土路,在风力及运输车辆的作用下产生大量的无组织尘排放^[28],同时因其地处干旱荒漠区,风蚀剧烈,大量岩石被风化侵蚀,成为 Fe、Mn 和 Ni 元素的主要来源。因此本研究认为 Fe、Mn 和 Ni 元素主要来源于成土母质,对研究区降尘中重金属来源的贡献率达 48.40%。大量研究表明^[33-34],Cu、Zn 元素受到矿山开采活动的影响较为强烈,本研究中 Cu 元素的高值区主要分

布于采煤区的下风向,露天煤矿在开采和运输过程中会产生大量的煤粉灰尘,加之矿物风化侵蚀,其中吸附的 Cu 元素扬起之后沉降于地表,由此认为 Cu、Zn 元素主要来源于煤矿开采活动,这与姚峰等之前在该研究区中研究的结果^[35]相似。Pb 元素作为典型的汽车排放元素^[36],矿区内存在大量的大型运输车辆,其机械排放的废气及轮胎磨损等较常见,因此认为 Pb 元素必然极大地受到交通运输的影响。

4 结论

本研究通过分析探讨干旱区露天煤矿降尘中 6 种重金属元素的含量、分布特征及其来源,得出以下结论:(1)降尘中重金属平均含量表现为 Fe > Mn > Zn > Cu > Ni > Pb,其中 Fe、Mn、Ni 属于中度变异,Pb、Cu、Zn 属于高度变异,其中 Pb 元素受人为活动影响最为明显。(2)Pb 元素在四号堆煤厂及停车场周边含量较高,Cu 元素的高值区主要分布于采煤区的下风向,而 Zn、Fe、Mn、Ni 元素的高值区较为分散,主要位于研究区中部及东部。(3)北山煤矿大气降尘中重金属元素主要来源及其贡献率:成土母质贡献率为 48.40%,矿山开采活动贡献率为 23.55%,交通车辆尾气及轮胎磨损贡献率为 17.16%,其他源贡献率为 10.89%。

参考文献:

- [1] Zheng N, Liu J S, Wang Q C, et al. Health risk assessment of heavy metal exposure to street dust in the zinc smelting district, Northeast of China [J]. Science of the Total Environment, 2010, 408 (4): 726 - 733.
- [2] 于瑞莲, 胡恭任, 袁 星, 等. 大气降尘中重金属污染源解析研究进展[J]. 地球与环境, 2009, 37(1): 73 - 79.

- [3] Kelly J, Thornton I, Simpson P R. Urban geochemistry: a study of the influence of anthropogenic activity on the heavy metal content of soils in traditionally industrial and non - industrial areas of Britain [J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11 (1/2): 363 - 370.
- [4] Cheng H X, Li M, Zhao C D, et al. Overview of trace metals in the urban soil of 31 metropolises in China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 31 - 52.
- [5] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害 [J]. *地球与环境*, 2015, 43 (1): 92 - 97.
- [6] Velea T, Gherghe L, Predica V, et al. Heavy metal contamination in the vicinity of an industrial area near Bucharest [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2009, 16 (Suppl 1): 27 - 32.
- [7] 田春晖, 杨若杼, 古丽扎尔·依力哈木, 等. 南京市大气降尘重金属污染水平及风险评价 [J]. *环境科学*, 2018, 39 (7): 3118 - 3125.
- [8] 杨慧妮, 李金娟, 郭兴强, 等. “两控区”城市降水、降尘中重金属元素分布特征及其相关性——以都匀市为例 [J]. *生态环境学报*, 2016, 25 (8): 1487 - 1492.
- [9] Liu S, Wu Q Y, Cao X J, et al. Pollution assessment and spatial distribution characteristics of heavy metals in soils of coal mining area in Longkou City [J]. *Environmental Science*, 2016, 37 (1): 270 - 279.
- [10] Liang X M, Song J M, Duan L Q, et al. Source identification and risk assessment based on fractionation of heavy metals in surface sediments of Jiaozhou Bay, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 128: 548 - 556.
- [11] 赵晓亮, 孙杰, 李俊华, 等. 阜新城区降尘重金属污染及其健康风险评价 [J]. *环境科学研究*, 2017, 30 (9): 1346 - 1354.
- [12] 王明仕, 曹景丽, 李晗, 等. 焦作市采暖期降尘中重金属生态风险评价与源解析 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26 (5): 824 - 830.
- [13] Liu Y, Ma Z W, Lv J S, et al. Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26 (6): 735 - 749.
- [14] 柴立立, 崔邢涛. 保定城市土壤重金属污染及潜在生态危害评价 [J]. *安全与环境学报*, 2019, 19 (2): 607 - 614.
- [15] Men C, Liu R M, Xu F, et al. Pollution characteristics, risk assessment, and source apportionment of heavy metals in road dust in Beijing, China [J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 612: 138 - 147.
- [16] Islam M S, Hossain M B, Matin A, et al. Assessment of heavy metal pollution, distribution and source apportionment in the sediment from Feni River estuary, Bangladesh [J]. *Chemosphere*, 2018, 202: 25 - 32.
- [17] Qu C S, Wang S, Ding L, et al. Spatial distribution, risk and potential sources of lead in soils in the vicinity of a historic industrial site [J]. *Chemosphere*, 2018, 205 (1): 244 - 252.
- [18] 曹冉, 孜比布拉·司马义, 斯琴. 乌鲁木齐市北郊农田土壤重金属污染及生态风险评价 [J]. *河北农业大学学报*, 2019, 42 (3): 57 - 63.
- [19] 齐彦杰. 中国湖泊沉积物中全氟化合物的空间分布、历史沉积行为及源解析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016: 46 - 48.
- [20] 杨丽萍, 陈发虎. 兰州市大气降尘污染物来源研究 [J]. *环境科学学报*, 2002, 22 (4): 499 - 502.
- [21] Hopke P K, Gladney E S, Gordon G E, et al. The use of multivariate analysis to identify sources of selected elements in the Boston urban aerosol [J]. *Atmospheric Environment* 1976, 10 (11): 1015 - 1025.
- [22] 沈海, 汪安璞. 重庆大气颗粒物污染来源的鉴别 [J]. *重庆环境科学*, 1988, 10 (6): 1 - 4.
- [23] 张连科, 李海鹏, 黄学敏, 等. 包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析 [J]. *环境科学*, 2016, 37 (3): 1139 - 1146.
- [24] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys [C]//Nielsen D R, Bouma J. *Soil spatial variability*. Wageningen: Proceedings of a Workshop of the ISSS and the SSSA. 1985: 166 - 194.
- [25] McGregor L A, Gauchotte - Lindsay C, Nic Daéid N, et al. Multivariate statistical methods for the environmental forensic classification of coal tars from former manufactured gas plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46 (7): 3744 - 3752.
- [26] 陈曦, 杜鹏, 关清, 等. ICP - MS 和 ICP - AES 用于北京雾霾天气 $PM_{2.5}$ 来源解析研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2015, 35 (6): 1724 - 1729.
- [27] 解素雯. 基于主成分分析与因子分析数学模型的应用研究 [D]. 淄博: 山东理工大学, 2016: 12 - 20.
- [28] 李玉洁, 赵娜, 曹月娥, 等. 露天煤矿煤粉沉降对矿区周边主要植物的生理影响 [J]. *生态学报*, 2018, 38 (22): 8129 - 8138.
- [29] Facchinelli A, Sacchi E, Mallen L. Multivariate statistical and GIS - based approach to identify heavy metal sources in soils [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 114 (3): 313 - 324.
- [30] Bilos C, Colombo J C, Skorupka C N, et al. Sources, distribution and variability of airborne trace metals in La Plata City area, Argentina [J]. *Environmental Pollution*, 2001, 111 (1): 149 - 158.
- [31] 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.
- [32] Nanos N, Martín J A R. Multiscale analysis of heavy metal contents in soils: spatial variability in the Duero river basin (Spain) [J]. *Geoderma*, 2012, 189/190: 554 - 562.
- [33] 刘慧琳, 葛畅, 沈强, 等. 铁矿废弃地复垦土壤重金属来源解析研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 (2): 317 - 324.
- [34] 张俊, 李余生, 孟雷, 等. 芦岭煤矿区土壤重金属元素地球化学特征及来源分析 [J]. *环境化学*, 2014, 33 (11): 2001 - 2002.
- [35] 姚峰, 包安明, 古丽·加帕尔, 等. 新疆准东煤田土壤重金属来源与污染评价 [J]. *中国环境科学*, 2013, 33 (10): 1821 - 1828.
- [36] 杨磊, 熊黑钢. 准东矿区土壤重金属污染分析及其来源解析 [J]. *中国矿业*, 2018, 27 (9): 121 - 126.