

· 研究报告 ·

## 基于PMF模型的矿区土壤重金属来源解析

李雨晨<sup>1,2</sup>, 郑刘根<sup>1,2\*</sup>, 陈星<sup>1,2,3</sup>, 陈永春<sup>4</sup>, 安士凯<sup>4</sup>, 安燕飞<sup>4</sup>, 李兵<sup>4</sup>

(1. 安徽大学资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230601; 2. 安徽省矿山生态修复工程实验室, 安徽 合肥 230601; 3. 安徽大学化学化工学院, 安徽 合肥 230601; 4. 煤炭生态环境保护国家工程实验室, 安徽 淮南 232001)

**摘要:** 通过在某矿区采集农田土壤和菠菜样品, 分析其中重金属含量, 基于相关性分析和PMF模型对该矿区农田土壤重金属来源进行解析。结果表明, 研究区土壤中Cd、As、Zn、Cr和Cu元素明显富集, 分别是当地土壤背景值的5.7倍、4.4倍、2.4倍、1.5倍和1.3倍; 相关性分析结果显示, 研究区内Cu、Zn、As、Cd元素存在一定的相关性, 可能具有同一污染源; PMF模型结果说明, 研究区土壤中重金属主要来源分别为工业污染源、自然母质源、交通污染源和农业污染源, 其对当地土壤重金属污染贡献率分别为39.8%、22.8%、21.6%和15.8%。

**关键词:** 重金属; 土壤; PMF模型; 源解析; 煤矿

中图分类号: X825; X752

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2024)01-0017-06

## Source Analysis of Heavy Metals in Mining Soil Based on PMF Model

LI Yuchen<sup>1,2</sup>, ZHENG Liugen<sup>1,2\*</sup>, CHEN Xing<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yongchun<sup>4</sup>, AN Shikai<sup>4</sup>, AN Yanfei<sup>4</sup>, LI Bing<sup>4</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;  
2. Anhui Province Engineering Laboratory for Mine Ecological Remediation, Hefei, Anhui 230601, China;  
3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Anhui University, Hefei, Anhui 230601, China;  
4. National Engineering Laboratory for Protection of Coal Mine Eco-environment, Huainan, Anhui 232001, China)

**Abstract:** In this study, the content of heavy metals in soil and spinach samples collected from farmland in a mining area was determined, and the sources of heavy metals were analyzed based on correlation analysis and PMF model. The results showed that the contents of Cd, As, Zn, Cr and Cu in the soil were significantly enriched, which were 5.7, 4.4, 2.4, 1.5 and 1.3 times of the local soil background value, respectively. The correlation analysis results showed that Cu, Zn, As and Cd in the study area were correlated to some extent, and might have the same pollution source. The results by PMF model showed that heavy metals in the soil of the study area mainly came from the source of industrial pollution, soil parent material, traffic pollution and agricultural pollution, the contribution rates of heavy metal pollution to local soil were 39.8%, 22.8%, 21.6% and 15.8%, respectively.

**Key words:** Heavy metals; Soils; PMF model; Source analysis; Coal mine

土壤环境质量是粮食安全的保障, 煤炭开采导致的煤矸石堆积和填充是矿区土壤受重金属污染的主要原因。重金属在土壤中具有持久性、不可逆性和累积性<sup>[1]</sup>, 在多种因素的影响下会被固定进入土壤耕作层, 经食物链转移至人体, 影响环境质量, 危害人体健康<sup>[2]</sup>。据统计, 我国每年约有1.2×

收稿日期: 2023-01-04; 修订日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072201); 安徽省高校协同创新基金资助项目(GXXT-2021-017); 2022年安徽省绿色矿山工程研究中心开放基金资助项目

作者简介: 李雨晨(1999—), 女, 安徽蚌埠人, 硕士, 研究方向为修复生态学。

\* 通信作者: 郑刘根 E-mail: lgzheng@ustc.edu.cn

10<sup>7</sup> t 粮食受到重金属污染,土壤环境质量不容乐观<sup>[3]</sup>。

矿区内重金属来源复杂,治理困难,故识别其来源至关重要。目前,重金属来源解析方法主要包括主成分分析法(PCA)、相关性分析法、因子分析法(FA)等<sup>[4]</sup>。正定矩阵因子分解法(PMF)综合考虑了数据的不确定性,能够定量识别污染源个数及各污染源对某种重金属的贡献率,在污染源解析方面有较强的实用性,被广泛应用于国内外污染源解析研究<sup>[5-8]</sup>。高越等<sup>[7]</sup>利用PMF模型对西北某工业园区重金属来源进行解析,判断出其污染源为化学燃料燃烧和化工污染源、自然来源和废渣堆填、交通排放、燃煤与有色金属冶炼,以及电镀与矿石冶炼。张恬雨等<sup>[8]</sup>通过PMF模型对垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属来源进行解析,得出重金属主要来源为垃圾焚烧、交通源、自然源和农业源的混合源,以及燃煤源。淮南煤田新庄孜矿是较早开采的煤矿,长期的采煤活动形成了一定面积的地表沉陷,现已通过矸石充填等手段对沉陷区进行了土地复垦。今于2021年11月在该矿矸石充填区采集土壤样品,应用PMF模型解析土壤重金属污染源,为煤矿充填复垦区土壤综合管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

新庄孜矿位于安徽省淮南市,处于八公山东麓与淮南煤田以西的淮河流域,属温带半湿润大陆季风性气候。地貌属于山前斜坡和冲积平原,地形平坦。当地的主要粮食作物为小麦、大麦、高粱、山芋等,主要经济作物有棉花、花生、芝麻等。研究区煤矸石充填深度为20 cm~40 cm<sup>[9]</sup>,煤矸石容重为1.13 g/m<sup>3</sup>~1.48 g/m<sup>3</sup>、含水率为1.47%~4.82%、pH值为8.43~9.36、有机质质量分数为4.54%~20.25%<sup>[10]</sup>。根据前期调研监测,覆土深度为60 cm~80 cm<sup>[11]</sup>,覆土的含水率为11.59%~12.50%、pH值为7.26~7.41、容重为1.14 g/m<sup>3</sup>~1.27 g/m<sup>3</sup>、有机质质量分数为1.14%~1.91%、速效磷质量比为8.49 mg/kg~14.25 mg/kg、速效钾质量比为221.83 mg/kg~225.80 mg/kg。表1为煤矸石、覆土和复垦前土壤中各元素质量比。

矿区经过复垦后转变为农田、经济林地、水产养殖塘等。矸石充填复垦土壤的速效磷、有机质等养分偏少,影响农作物的正常生长,在土地利用过

表1 煤矸石、覆土和复垦前土壤中各元素质量比

类型	Zn	Cr	As	Cu	Pb	Cd
煤矸石	124.12	66.65	97.60	31.88	13.76	3.22
覆土	76.72	65.24	12.61	25.33	10.02	0.14
复垦前土壤	83.86	65.99	18.69	28.36	12.24	0.18

程中需要通过采取施加绿肥、无机肥料等措施来提高土壤养分含量,从而促进植物的生长,更好地改善矿区的生态环境。

### 1.2 样品采集与测试

依据《土壤环境监测技术规范》(HJ/T 166—2004),于2021年11月,结合研究区实际情况和地势条件布点采样。由于研究区3个采样区面积较小,地势平坦,土壤组成和受污染程度相对比较均匀,利用“五点”取样法在矸石充填区附近3块农田内布设15个土壤采样点(S1—S15)和3个菠菜采样点(B1—B3),见图1。在每个采样点周围10 m范围内,去除土壤表面的植被和石头碎屑后采集4个表层(0 cm~20 cm)土壤样品2 kg,将其完全混匀作为一个样品带回实验室。在每个采样点周围10 m范围内采集长势相对均匀的5株菠菜,作为一个样本带回实验室。将土壤样品置于通风处风干,用研钵磨细,过100目尼龙筛后用于测试重金属含量。将菠菜样品洗净、杀青、烘干,用玛瑙研钵磨碎,过100目筛后用于测试重金属含量。

准确称取0.1 g(精确至0.001 g)样品,利用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>(体积比为5:5:3)对样品进行微波消解,完成后用原子吸收分光光度计(Analyst 100, PerkinElmer, USA)测定土壤和菠菜样品中重

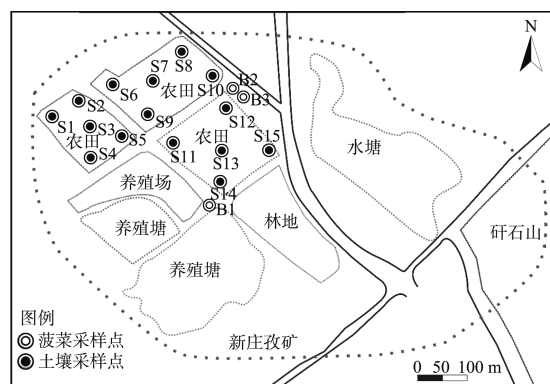


图1 研究区采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling points in the study area

金属含量。所用试剂均为分析纯。为了保证测试过程和数据的准确性,采取质量控制与质量保证措施。在测试过程中采用空白试剂、3 份样品和国家矿质土壤标准物质(GSS-3)来验证消解及分析方法的准确性,标准土壤样品的回收率在 80% ~ 120%之间,符合质量控制要求。

### 1.3 PMF 模型

PMF 是芬兰的 Paatero 在 1994 年提出的以受体模型为基础,并利用样本组成对污染源进行定量化解析的一种数据分析方法<sup>[12]</sup>。该模型将样品的重金属浓度矩阵( $X$ )分解成污染源贡献因子矩阵( $G$ )、污染源成分谱因子矩阵( $F$ )和残差矩阵( $E$ ),通过结果定量识别各污染源的贡献率。上述各矩阵的元素  $X_{ij}$ 、 $G_{ik}$ 、 $F_{kj}$ 、 $E_{ij}$  满足公式(1)<sup>[13]</sup>:

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

式中: $X_{ij}$  为第  $i$  个样品中第  $j$  种重金属元素的含量; $G_{ik}$  为第  $k$  个源对第  $i$  个样品的贡献率; $F_{kj}$  为第  $k$  个源中第  $j$  种重金属元素的含量; $E_{ij}$  为残差。

PMF 模型通过最小二乘法经多次迭代运算得到最小化的目标函数  $Q$ ,以此确定  $G_{ik}$  与  $F_{kj}$ 。 $Q$  值的定义式为:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left( \frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $U_{ij}$  为第  $i$  个样品中第  $j$  种重金属元素的不确定度,计算公式为:

$$U_{ij} = \begin{cases} \frac{5}{6} \times MDL, & C \leq MDL \\ \sqrt{(C \times RSD)^2 + \left(\frac{MDL}{2}\right)^2}, & C > MDL \end{cases} \quad (3)$$

式中:MDL 为测试方法的检出限; $C$  为重金属元素

的测定值;RSD 为测定值的相对标准偏差。

### 1.4 数据分析

数据统计由 Excel 2019 完成,相关性分析由 SPSS 20.0 完成,PMF 分析由 PMF 5.0 软件完成。

## 2 结果与讨论

### 2.1 土壤重金属描述性统计

表 2 为研究区土壤和菠菜中元素质量比统计。由表 2 可知,土壤中元素 Zn、Cr、As、Cu 和 Cd 的质量比平均值分别为 197.75 mg/kg、100.34 mg/kg、60.76 mg/kg、32.58 mg/kg 和 0.34 mg/kg,分别为淮南市土壤背景值的 2.4 倍、1.5 倍、4.4 倍、1.3 倍和 5.7 倍,Pb 的质量比平均值为 15.87 mg/kg,是背景值的 1/2。除 Pb 外,其余 5 种元素平均值均高于土壤背景值,其中 Cd、As、Zn 超标较为严重。As、Cd 的平均值高于《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的风险筛选值,Cr 的平均值虽然低于风险筛选值,但最大值略高,说明在研究区内这几种元素有一定的富集。文中土壤重金属的相对标准偏差均处于 13.2% ~ 34.7%之间,属于中等变异,说明土壤中重金属可能受到人为活动的影响<sup>[14]</sup>。总体上,研究区土壤已受到多种重金属不同程度的污染。

对研究区内农产品菠菜中重金属含量进行测定,结果见表 2。由表 2 可知,根据《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)对叶菜类蔬菜重金属含量安全限值,研究区内菠菜重金属富集量均超过国家安全标准,通过食物链进入人体会危害人体健康。因此,对该区域内重金属来源进行解析,降低土壤重金属含量非常必要。

### 2.2 土壤重金属相关性分析

相关性是指两个变量元素之间相关联的程

表 2 研究区土壤和菠菜中元素质量比统计

Table 2 Statistics on mass ratio of element in soil and spinach from the study area

元素	土壤样品					菠菜样品					
	范围	平均值	中值	标准偏差	背景值	风险筛选值	样点 1	样点 2	样点 3	平均值	安全限值
Zn	153.20 ~ 223.10	197.75	210.20	26.12	80.81	250	79.15	83.56	86.97	83.23	
Cr	71.26 ~ 222.50	100.34	89.68	34.78	64.93	200	4.78	2.19	3.16	3.38	0.5
As	31.19 ~ 83.77	60.76	59.85	14.23	13.81	30	5.11	4.83	4.97	4.97	0.5
Cu	24.65 ~ 41.52	32.58	31.55	5.14	24.16	100	13.98	17.88	11.35	14.40	
Pb	9.71 ~ 22.30	15.87	15.61	3.84	30.47	120	2.92	2.58	4.73	3.41	0.3
Cd	0.25 ~ 0.44	0.34	0.35	0.05	0.06	0.3	0.54	0.32	0.52	0.46	0.2

度<sup>[15]</sup>。一般情况下,来源相同或者相似的重金属之间往往具有较强的相关性。若各元素之间存在显著负相关性,则说明各元素的来源存在差异,甚至具有一定的拮抗作用<sup>[16]</sup>。因此,可以将相关性分析用于土壤重金属的来源解析<sup>[17]</sup>。

为了判断研究区内 Cr、Cu、Zn、As、Cd、Pb 6 种元素的来源,将其含量进行相关性分析,计算结果见图 2。由图 2 可知,Cu 与 Zn、Cu 与 As、Zn 与 Cd 的相关系数分别为 0.561、0.710、0.550,具有较强的相关性,Pb 与 Cr、Zn 具有中等程度的相关性,说明其可能具有同源性,可能来源于同一污染源。Cr 与 As、Cd 存在一定的负相关性,说明其来源不同。由此可见,研究区土壤中的 Cu、Zn、As、Cd 可能具有相同的迁移路线,或者存在同一污染源,或是具有复合污染的可能<sup>[18-19]</sup>。

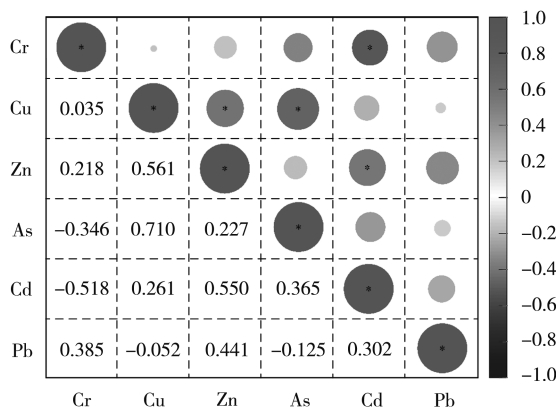


图 2 土壤元素相关性分析结果

Fig. 2 Correlation analysis of elements in soil

### 2.3 土壤重金属来源解析

为了能够更准确地识别土壤中重金属的来源,采用 PMF 模型进行解析。研究表明,当  $Q_{Robust}$  (PMF 模型运行时得到最优解的目标函数) 与  $Q_{True}$  (目标函数的真解) 最为接近时,实测值与模型预测值之间的拟合效果最好<sup>[20]</sup>。在研究过程中分别设置了 3 ~ 5 个因子数进行运算,当因子数为 4 时,  $Q_{Robust}$  与  $Q_{True}$  最为接近,故可以确定本研究过程中的最佳因子数为 4,模型运行 20 次后完成因子分配,各元素拟合度 ( $r^2$ ) 均  $> 0.8$  (见表 3),拟合程度较好。

利用 PMF 模型解析出 4 个污染源因子,并且量化其对各土壤元素的贡献率。4 个因子对土壤中各元素的贡献率见图 3。由图 3 可见,因子 1 主要特征元素为 As、Cd、Cu,并且因子 1 对这 3 种元

表 3 PMF 模型土壤元素实测值与模拟预测值的拟合结果

Table 3 Fitting results between measured values and simulated predicted values of elements in soil by PMF model

元素	$r^2$	斜率	截距
Cr	0.998 8	1.013 2	-1.249 5
Cu	0.899 6	0.804 1	6.136 4
Zn	0.926 3	0.797 7	39.000 6
As	0.991 8	1.020 9	-1.263 1
Cd	0.877 6	1.026 9	-0.010 0
Pb	0.994 2	0.999 4	-0.004 8

素的贡献率分别为 35.7%、23.1%、18.9%。据调查,研究区内长期种植小麦、黄豆、玉米等农作物,由于煤矸石中有机质等养分含量较低,故种植期间需要施加肥料、农药等。研究表明,在磷肥中 Cd 的质量比达 0.6 mg/kg,容易造成土壤中 Cd 积累,Cd 通常被视为农业活动的标志<sup>[21]</sup>。As 是杀虫剂、除草剂的主要成分<sup>[22]</sup>,并且有研究表明化肥、农药中常含有 Cu 元素<sup>[23]</sup>。因子 1 对 Cr 的贡献率为 10.0%。研究表明,Cr 的积累也与农业生产中的化肥、农药、有机肥等的施用有关<sup>[24]</sup>。研究指出,在一般氮肥和过磷酸钙中 Cr 质量比分别为 5 mg/kg ~ 3 000 mg/kg 和 50 mg/kg ~ 250 mg/kg。据统计,通过肥料输入土壤的 Cr 为 0.03 t/a ~ 0.38 t/a<sup>[25]</sup>。因此,推测因子 1 为农业污染源。

因子 2 对 As、Cu、Cd、Zn 4 种元素的贡献率较高,分别为 44.6%、44.5%、42.1%、39.9%。煤炭开采造成煤矸石的大量堆积,会导致煤矸石中的重金属元素进入土壤,且此结果与相关性分析结果一致,这 4 种元素间存在一定的相关性,来自同一污染源。煤矸石中 As、Cu、Cd、Zn 在土壤中的含量均超过当地土壤背景值,会向土壤中迁移,增加土壤中重金属浓度。因子 2 对 Cr 的贡献率为 21.7%,

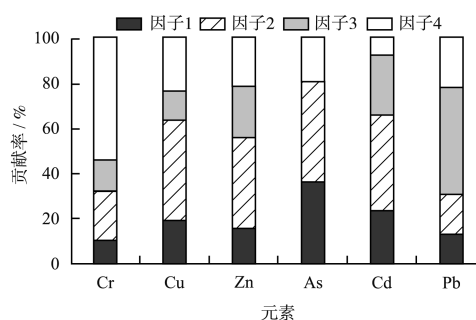


图 3 4 个因子对土壤中各元素的贡献率

Fig. 3 Contribution rates of four factors to various elements in soil

煤矿开采等工业生产活动中使用含有 Cr 等重金属元素为原料的物品,生产过程中产生的“三废”排入土壤造成 Cr 累积<sup>[26]</sup>。因此,推测因子 2 为工业污染源。该结果与 Zhang 等<sup>[27]</sup>研究结果一致。

因子 3 对 Pb 元素的贡献率最高,为 47.0%;其次是对 Cd、Zn、Cr 元素,贡献率分别为 26.9%、22.9%、13.9%。刘玲<sup>[28]</sup>研究表明,淮南矿区交通车辆排放的尾气中主要包括 Pb、Cd 等重金属,占淮南矿区总污染的 17.7%。经过现场勘察发现,研究区虽远离市区但存在多条道路且靠近铁路,是运输煤炭的必经之路,车辆出入频次高,车流量大。因此,尾气等排放使研究区内存在 Pb、Cd 的残留,交通活动如汽车尾气的排放、车轮与地面的摩擦也造成 Zn、Cr 的累积<sup>[29]</sup>。曾庆庆等<sup>[30]</sup>对贵州省某县辣椒种植区土壤重金属来源解析时发现,Pb 污染交通源贡献率为 73.5%。因此,推测因子 3 为交通污染源。

因子 4 对 Cr 元素的贡献率最高,为 54.4%,Cr 在研究区内的平均值与当地土壤背景值相差不大,说明其较大程度上受土壤本底值的控制。Keleper-tzis<sup>[31]</sup>研究证实,Cr 在成土过程和土壤母质中广泛存在,Cr 的出现被归因于土壤母质和自然过程。因此,文中认为 Cr 主要来自土壤母质,这与陈明等<sup>[4]</sup>研究结果一致。因此,推测因子 4 为自然母质源。

根据 PMF 模型计算可得,工业污染源对研究区土壤重金属污染贡献率为 39.8%,自然母质源贡献率为 22.8%,交通污染源贡献率为 21.6%,农业污染源贡献率为 15.8%。其中,工业污染源、交通污染源和农业污染源均来自人为活动,三者占比为 77.2%。因此,人为活动对土壤中重金属污染贡献率最高。不同的样品数可能会对模型结果造成扰动,故后续研究须对其进行重点验证与讨论。

### 3 结论

(1) 研究区土壤中 Zn、Cr、As、Cu 和 Cd 的质量比平均值分别为 197.75 mg/kg、100.34 mg/kg、60.76 mg/kg、32.58 mg/kg 和 0.34 mg/kg,是淮南市土壤背景值的 2.4 倍、1.5 倍、4.4 倍、1.3 倍和 5.7 倍,Pb 的质量比平均值为 15.87 mg/kg,是背景值的 1/2。各元素的相对标准偏差均处于 13.2%~34.7%之间,属于中等变异,说明其在一定程度上受到人为干扰的影响。

(2) 相关性分析结果表明,Cr 与 As、Cd 存在负

相关性,说明其来源不同;Cu、Zn、As、Cd 间存在正相关性,说明其可能存在同一污染来源。

(3) PMF 源解析结果表明,研究区内土壤重金属的主要污染来源分别为工业污染源、自然母质源、交通污染源和农业污染源,其对研究区土壤重金属污染贡献率分别为 39.8%、22.8%、21.6% 和 15.8%。

### [参考文献]

- [1] WANG S, CAI L M, WEN H H, et al. Spatial distribution and source apportionment of heavy metals in soil from a typical county-level city of Guangdong Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 655 (10): 92-101.
- [2] 方晴, 洗萍, 蒙政成. 基于蒙特卡罗模拟的农用地土壤健康风险评估 [J]. *环境工程*, 2021, 39 (2): 147-152.
- [3] 张淑珂, 孙国新, 姜杰. 白城市黑土区农田土壤重金属来源解析及积累评价 [J]. *环境科学学报*, 2023, 43 (5): 409-420.
- [4] 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*, 2023, 44 (6): 3450-3462.
- [5] YAN Y, CHI H F, LIU J R, et al. Provenance and bioaccessibility of rare earth elements in atmospheric particles in areas impacted by the optoelectronic industry [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114349.
- [6] 董娴, 邹海风, 梁隆超, 等. 贵阳市大气 PM<sub>2.5</sub> 中无机元素的组成及来源解析 [J]. *环境监测管理与技术*, 2019, 31 (1): 14-18.
- [7] 高越, 吕童, 张蕴凯, 等. PMF 和 RF 模型联用的土壤重金属污染来源解析与污染评价: 以西北某典型工业园区为例 [J]. *环境科学*, 2023, 44 (6): 3488-3499.
- [8] 张恬雨, 胡恭任, 于瑞莲, 等. 基于 PMF 模型的垃圾焚烧厂周边农田土壤重金属源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43 (12): 5718-5727.
- [9] CHEN Y C, YUAN L, XU C. Accumulation behavior of toxic elements in the soil and plant from Xinzhuanzi reclaimed mining areas, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76 (5): 226. 1-226. 8.
- [10] 高晓云. 淮南矿区煤矸石充填对土地复垦的影响研究 [D]. 淮南: 安徽理工大学, 2013.
- [11] 徐良骥, 严家平, 高永梅, 等. 煤矿塌陷区覆土造地综合研究——以新庄孜矿为例 [J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35 (1): 56-58.
- [12] 庾雄, 杨凌霄, 张婉, 等. 海-陆大气交汇作用下青岛冬季大气 PM<sub>2.5</sub> 污染特征与来源解析 [J]. *环境科学*, 2022, 43 (5): 2284-2293.
- [13] 李伟, 布多, 孙晶, 等. 拉萨巴嘎雪湿地土壤重金属分布及生态风险评估 [J]. *环境化学*, 2021, 40 (1): 195-203.
- [14] 洪涛, 孔祥胜, 岳祥飞. 滇东南峰丛洼地土壤重金属含量、来源及潜在生态风险评估 [J]. *环境科学*, 2019, 40 (10): 4620-

- 4627.
- [15] 王锐, 邓海, 贾中民, 等. 汞矿区周边土壤重金属空间分布特征、污染与生态风险评价[J]. 环境科学, 2021, 42(6): 3018-3027.
- [16] 柴磊, 王新, 马良, 等. 基于 PMF 模型的兰州耕地土壤重金属来源解析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(9): 3919-3929.
- [17] 吕占禄, 张金良, 张晗, 等. 生物质能电厂周边土壤中重金属元素污染特征及评价[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3480-3494.
- [18] 吕占禄, 张金良, 邹天森, 等. 燃煤电厂周边土壤重金属污染特征及评价[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(6): 720-731.
- [19] HUANG X F, HU J W, QIN F X, et al. Heavy metal pollution and ecological assessment around the Jinsha Coal-Fired Power Plant (China) [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(12): 1589-1601.
- [20] 李娇, 滕彦国, 吴劲, 等. PMF 模型解析土壤重金属来源的不确定性[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 716-725.
- [21] 张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 等. 基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析[J]. 环境科学, 2022, 43(11): 5192-5204.
- [22] 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.
- [23] 韩琳, 徐夕博. 基于 PMF 模型及地统计的土壤重金属健康风险定量评价[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5114-5124.
- [24] XIAO H, SHAHAB A, XI B D, et al. Heavy metal pollution, ecological risk, spatial distribution, and source identification in sediments of the Lijiang River, China [J]. Environmental Pollution, 2021, 269: 116189. 1-116189. 10.
- [25] 艾建超, 王宁, 杨净. 基于 UNMIX 模型的夹皮沟金矿区土壤重金属源解析[J]. 环境科学, 2014, 35(9): 3530-3536.
- [26] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2865-2874.
- [27] ZHANG H W, ZHANG F, SONG J, et al. Pollutant source, ecological and human health risks assessment of heavy metals in soils from coal mining areas in Xinjiang, China [J]. Environmental Research, 2021, 202: 111702.
- [28] 刘玲. 淮南市空气悬浮颗粒特征及污染物的树木监测[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [29] 阿地拉·艾来提, 麦提吐尔逊·艾则夜, 怕提古力, 等. 基于 BM 和 PMF 模型的库尔勒市地表灰尘重金属来源解析[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(5): 31-35.
- [30] 曾庆庆, 付天岭, 邹洪琴, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 102-113.
- [31] KELEPERTZIS E. Accumulation of heavy metals in agricultural soils of Mediterranean: Insights from Argolida basin, Peloponnese, Greece [J]. Geoderma, 2014, 221/222: 82-90.

(上接第 10 页)

与金融机构碳排放核查核算等基础通用标准, 以及绿色金融产品服务、绿色债券与碳中和债券评级评估、信息披露、绿色金融统计等标准。

(6) 推进国际交流与合作。积极参与碳排放、节能、新能源、碳汇、CCUS 等领域国际标准的制定, 为国际气候谈判提供技术支撑; 积极转化适合我国国情的国际标准, 补齐碳排放监测、计量、核算、认证等关键领域短板, 建立与国际接轨的碳中和标准体系; 深化新能源、电工装备、节能环保等领域国际标准的研究与制定。

#### [参考文献]

- [1] 王宏涛, 张隽, 李璐. “碳达峰、碳中和”标准解读与认证实践[J]. 质量与认证, 2021, 15(5): 38-40.
- [2] 舒印彪. 提升碳排放国际标准化话语权[J]. 中国质量监管, 2022, 44(3): 10.
- [3] 丁爽, 姜玲玲, 林翎, 等. 我国碳达峰碳中和标准化发展现状及对策研究[J]. 中国标准化, 2022(1): 63-70.
- [4] 张亮. 全球各地区和国家碳达峰、碳中和实现路径及其对标准的需求分析[J]. 电器工业, 2021, 22(8): 64-67.
- [5] 孙亮, 林翎, 李鹏程. “双碳”目标要求下的标准体系建设[J]. 中国能源, 2022, 45(5): 56-62.
- [6] ISO. ISO contributes to all of the sustainable development goals [EB/OL]. (2015-09-20) [2023-02-01]. <https://www.iso.org/standards.html>.
- [7] IEC. The IEC and the sustainable development goals [EB/OL]. (2020-09-03) [2023-02-01]. <https://www.iec.ch/sdgs>.
- [8] 中国标准化研究院资源环境研究分院. 碳达峰碳中和标准体系建设进展报告[R]. 北京: 中国标准化研究院资源环境研究分院, 2021.
- [9] 石明娟, 曹雨婷, 张吉兴, 等. 碳达峰、碳中和标准建设现状[J]. 标准科学, 2022(4): 49-54.
- [10] 陈健华, 孙亮, 陈亮, 等. 国内外企业温室气体排放核算标准的比较分析[J]. 气候变化研究进展, 2016, 12(6): 545-553.
- [11] 林翎, 郭慧婷, 孙亮, 等. 我国应对气候变化标准化发展和政策建议[J]. 上海节能, 2019(2): 85-89.
- [12] 郭春梅, 卜晨航, 孟冲, 等. 天津生态城低碳体验中心碳排放及减碳潜力研究[J]. 环境监测管理与技术, 2022, 34(2): 7-11.
- [13] 梅林德, 熊文朋, 冯小琼, 等. 四川省水泥工业大气污染物排放水平分析[J]. 环境监测管理与技术, 2021, 33(2): 60-63.
- [14] 谭显春, 郭雯, 樊杰, 等. 碳达峰、碳中和政策框架与技术创新政策研究[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4): 435-443.
- [15] 董迪. 绿色发展标准化研究[J]. 绿色包装, 2022, 7(3): 48-50.
- [16] 余丽, 周旭磊. 碳达峰目标实现的国际经验及中国路径[J]. 大连理工大学学报(社会科学版), 2022, 43(3): 12-21.

本栏目编辑 姚朝英 刘罗