

中文核公期刊/CSCD

请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

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, Sainbuyan Bayarsaikhan, 安毅, 霍莉莉

引用本文:

霍明珠, 高秉博, 乔冬云, 等. 基于APCS-MLR受体模型的农田土壤重金属源解析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(5): 978-986.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1277

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

铁矿废弃地复垦土壤重金属来源解析研究

刘慧琳, 葛畅, 沈强, 黄元仿, 张世文 农业环境科学学报. 2019, 38(2): 317-324 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0499

细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析

宁翠萍,李国琛,王颜红,李波,田莉,王世成 农业环境科学学报.2017,36(3):487-495 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1222

安徽省典型区农用地土壤重金属污染成因及特征分析

尹国庆, 江宏, 王强, 聂静茹, 马友华, 胡宏祥 农业环境科学学报. 2018, 37(1): 96-104 https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0911

湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价

刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 安毅, 霍莉莉 农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1523-1530 https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1491

广西某采选废矿区重金属生态风险与源汇关系

毛志强,田康,刘本乐,张晓辉,卞子金,黄标,袁旭音,吴龙华,罗栋源 农业环境科学学报. 2021, 40(5): 987-998 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1338



关注微信公众号,获得更多资讯信息



基于 APCS-MLR 受体模型的农田土壤重金属源解析

霍明珠¹, 高秉博², 乔冬云³, Sainbuyan Bayarsaikhan⁴, 安毅¹, 霍莉莉^{1*}

(1.农业农村部环境保护科研监测所,天津 300191;2.中国农业大学土地科学与技术学院,北京 100083;3.吉林省农业环境保护 与农村能源管理总站,长春 130021;4.蒙古科学院地理与地球生态研究所,蒙古 乌兰巴托 15170)

摘 要:定性、定量分析湘潭县农田土壤重金属的污染来源及源贡献率。以湘潭县农田土壤为研究对象,结合地统计学分析,利用数理统计方法[相关性分析、因子分析和绝对因子分析/多元线性回归(APCS-MLR)受体模型],解析了研究区域内镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍(Ni)8种重金属元素的来源及源贡献率。结果表明:研究区域内8种重金属元素中仅有Cd含量平均值超出了农用地土壤污染风险筛选值(0.3 mg·kg⁻¹,pH<5.5),且Cd的空间变异性较强,其次是Hg,两者均受人为活动影响较大。综合数理统计分析和地统计学分析,将土壤中8种重金属元素的主要来源归结为3个:工业源主要分布于湘潭县工矿企业密集的东北部,其对Cd、Pb、Zn、Hg具有较大贡献率,分别为65.36%、49.21%、43.43%和22.12%;农业源对As、Hg、Pb 具有较大贡献率,分别为59.20%、24.97%和17.82%;自然源对Ni、Cu、Cr具有较大贡献率,分别为86.73%、87.87%和89.67%。研究区域内土壤重金属含量主要受工业活动和自然成土母质影响较大,应重点加强Cd的来源控制,并加强管理和修复治理进度,降低其风险水平。受体模型和地统计学的结合使用能有效地定性、定量解析农田土壤重金属的来源与源贡献率。

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)05-0978-09 doi:10.11654/jaes.2020-1277

Source apportionment of heavy metals in farmland soil based on the APCS-MLR model

HUO Ming-zhu¹, GAO Bing-bo², QIAO Dong-yun³, Sainbuyan Bayarsaikhan⁴, AN Yi¹, HUO Li-li^{1*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China; 2. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Agricultural Environmental Protection and Rural Energy Management Station in Jilin Province, Changchun 130021, China; 4. Institute of Geography and Geoecology, Mongolian Academy of Science, Ulaanbaatar 15170, Mongolia)

Abstract: To analyze the source and contribution of heavy metals in the farmland soil of Xiangtan County, eight heavy metal elements consisting of cadmium (Cd), mercury (Hg), arsenic (As), lead (Pb), chromium (Cr), copper (Cu), zinc (Zn), and nickel (Ni) in Xiangtan County's farmland soil, were qualitatively and quantitatively analyzed using geostatistics and mathematical statistics including correlation analysis, factor analysis, and the absolute principal component scores/multiple linear regression (APCS-MLR) receptor model. The results showed that: among the eight heavy metals, only the average value of Cd exceeded the screening value for soil pollution risk control in agricultural land (GB 15618—2018), and the spatial variability of Cd was very strong, followed by Hg, both of which were significantly affected by human activities. Geostatistics and mathematical statistics analyses indicated that the eight heavy metal elements were

收稿日期:2020-11-05 录用日期:2021-01-12

作者简介:霍明珠(1995—),女,河北保定人,硕士研究生,从事产地环境监测与预警研究。E-mail:884796615@qq.com

^{*}通信作者:霍莉莉 E-mail:huoliliforgood@163.com

基金项目:中国农业科学院创新工程(2020-cxgc-AY)

Project supported : Innovation Project of Chinese Academy of Agricultural Sciences (2020-cxgc-AY)

primarily from three sources, with industrial sources predominant in the northeast of Xiangtan County, where most industrial and mining enterprises are located. The contribution of industrial sources to Cd, Pb, Zn, and Hg was 65.36%, 49.21%, 43.43% and 22.12%, respectively; agricultural sources' contribution to As, Hg, and Pb was 59.20%, 24.97%, and 17.82%, respectively; and natural sources contributed 86.73%, 87.87%, and 89.67% to Ni, Cu, and Cr, respectively. The heavy metal content in the study area was mainly affected by industrial activities and natural parent materials. Therefore, it is necessary to strengthen the source control of Cd, as well as the management and remediation processes, and reduce the risk level. The combination of the acceptor model and geostatistics can effectively analyze the source and contribution rate of heavy metals in farmland soil gualitatively and guantitatively.

Keywords: heavy metal; cadmium; farmland soil; APCS-MLR receptor model

近年来随着工业化的快速发展,土壤重金属污染 愈发严重,中国生态环境状况公报显示^[1],镉(Cd)、汞 (Hg)、砷(As)、铅(Pb)、铬(Cr)、铜(Cu)、锌(Zn)和镍 (Ni)8种重金属元素均有不同程度的超标,其中Cd是 影响农用地土壤环境质量的首要污染物。土壤中的 重金属主要来源于自然和人为两个方面,其中自然源 包括成土母质以及火山爆发和海浪飞溅引起的土壤 性质的改变等:而人为来源主要包括工业源(如采矿、 冶炼、燃煤、交通等)、农业源(农业投入品、灌溉水等) 和生活源(生活污水、生活垃圾等)四。进入土壤中的 重金属,因其具有隐蔽性、难降解性、富集性等特点, 不仅会对作物的正常生长产生影响,还会通过食物链 进入人体,对人体健康造成危害。因此,明确土壤重 金属的污染来源,从源头上加以控制,是防治土壤重 金属污染的根本措施。

土壤重金属源解析一般指来源的定性判断和不 同来源贡献率的定量分析,统称为源解析。目前土壤 领域应用较多的源解析模型主要有绝对因子分析/多 元线性回归分析(APCS-MLR)模型、正定矩阵因子分 解(PMF)模型、UNMIX模型、同位素比值法等^[3-5]。 APCS-MLR模型是主成分分析/因子分析和多元线性 回归两种统计方法相结合的受体模型,首先由因子分 析(FA)或主成分分析(PCA)进行源识别,将得到的 主要污染因子与土壤污染元素浓度作线性回归,回归 系数用于计算污染因子对污染元素的贡献率。该方 法最早应用于大气颗粒物中重金属的溯源,由于其不 需要事先了解污染物的个数,以受体中污染物为研究 对象,实现条件简便且源解析结果较为客观准确,近 年来在土壤领域也得到广泛应用¹⁶。Huang等¹⁷应用 APCA-MLR(原理与APCS-MLR相似)、改进的受体 模型绝对主成分分析-距离线性拟合(PCA-MLRD) 和PMF 3 种受体模型对中国东南部某城市周边地区 土壤重金属进行源解析比较,表明 APCA-MLR 和 PCA-MLRD 解析结果更加可靠与准确,同时土壤污

染程度较低时 APCA-MLR 的拟合度较好。Mokhtar zadeh 等¹⁸利用 APCS-MLR 模型对伊朗某炼油厂地区 土壤中15种重金属进行解析,得到4种主要来源:天 然来源、化石燃料燃烧、交通、石油衍生物以及石油废 物。Jia等¹⁹结合地统计学方法利用 APCS-MLR 模型 解析出广西岩溶地区土壤中有毒重金属大部分是天 然来源,18.23%和18.95%分别来自工业活动和农业 实践/交通排放,地统计学方法的应用使 APCS-MLR 模型的解析结果更加直观和准确。

湖南省稻谷产量常年稳居全国前列10,位于湖南 省中部偏东,湘江下游西岸的湘潭县更是有"楚南粮 仓"的美誉,并且蕴含丰富的矿产资源。但由于经济 的快速发展,部分地区农田受到了不同程度的污 染凹。近年来该区农田土壤重金属方面的相关研究 主要集中于土壤污染程度与质量评价方面,缺乏对造 成该区当前土壤环境质量状况的来源解析。因此,本 文选取湖南省湘潭县农田土壤为研究对象,测定了土 壤中重金属Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni的含量,分 析了这8项重金属的污染水平,并采用混合方法,包 括相关分析、因子分析、绝对因子分析/多元线性回归 分析(APCS-MLR),结合地统计学方法探析了县域土 壤中重金属的来源及其贡献率,以期为当地土壤重金 属污染科学防控和修复治理提供理论依据。

材料与方法 1

1.1 研究区概况

湘潭县位于南岳衡山北部,湘江下游西岸,长衡 丘陵盆地北段,27°20′~28°05′N、112°25′~113°03′E; 地貌轮廓为西北、西南、东南三面高,中部和东北部 低;湘潭县属亚热带季风湿润气候,四季分明,降水充 沛,夏季高温,冬季寒冷,具有明显的季节气候特征。 年平均气温 16.7~18.3 ℃,年平均降水量 1 300 mm。 区域土壤类型主要为红壤、水稻土、紫色土、红黏土和 潮土。粮食作物主要为水稻,一年两熟,2014年被评

农业环境科学学报 第40卷第5期

为"全国粮食生产先进县"^[12]。该区已探明储量的矿 产有煤、锰、铅、磷、石灰石、铁等。

1.2 样品采集和分析

本研究在湘潭县17个乡镇共随机布设了151个 采样点,如图1所示。采样时远离公路、田埂、肥堆等 区域,并用GPS精准定位,每个土壤样品是由多个点 土壤混合而成。采集后的混合土样需要置于室内自 然风干,剔除石块、植物枝叶、草根等杂质,用木锤适 当敲打,粗碎,然后用四分法取适量土样用陶瓷研钵 研磨,再过100目尼龙筛后装密封袋备用。

准确称取 0.10~0.25 g土壤样品至微波消解罐中, 加入 HNO₃、HF 和 HClO₄(比例为 1:2:1)的混合酸溶 液,放入微波消解仪进行消解,待土壤样品完全溶解 后,将消解液过滤,再加去离子水定容后待测。重金 属 Cd、Pb、Cr、Cu、Zn 和 Ni 6种元素采用电感耦合等离 子体质谱法(ICP-MS, Agilent)测定^[13], Hg 和 As 元素 利用原子荧光光谱法(APF, APF-230E)测定;利用空 白样、平行样和国家标准物质(GBW07429)对样品进 行质量控制,所有重金属的加标回收率范围均在 87%~106%。

1.3 绝对因子分析/多元线性回归受体模型

绝对因子分析/多元线性回归受体模型(APCS-MLR)的基本原理是将因子分析的主因子得分转化为绝对主因子得分(APCS),各重金属含量再分别对所

有的 APCS 进行多元线性回归,回归系数用于计算各 个主因子对应的污染源对土壤中每个样本点位某重 金属含量的贡献量。首先对所有重金属含量数据进 行标准化,再按照以下步骤计算:

对所有重金属元素引入1个浓度为0的人为样本,再计算得到0浓度样本的因子分数,公式为:

$$Z_{i0} = \frac{0 - \bar{C}_i}{\sigma_i} = -\frac{\bar{C}_i}{\sigma_i}$$

由因子分析得到的主因子得分减去0浓度样本的主因子分数得到每个样本的APCS; APCS为自变量,重金属元素含量作因变量,作多元线性回归,得到的回归系数可将APCS转化为主因子对应的污染源对每个样本的浓度贡献,公式为:

$$C_i = b_{i0} + \sum_{p=1}^{p} (b_{pi} \times \text{APCS}_p)$$

式中: Z_{i0} 为重金属元素i的0浓度样本,mg·kg⁻¹; \bar{C}_i 为 重金属元素i含量的平均值,mg·kg⁻¹; σ_i 为重金属元 素i含量的标准偏差,mg·kg⁻¹。 b_{i0} 为多元线性回归的 常数项, b_{pi} 为多元线性回归的回归系数,APCS_p为因子 p的绝对主因子得分, b_{pi} ×APCS_p为因子p对于 C_i 的含 量贡献,所有样本的 b_{pi} ×APCS_p平均值即为因子p对应 的污染源平均绝对贡献量。其中因子p对应的污染 源贡献率为其平均绝对贡献量与所有源贡献量的比 值^[14]。



图 1 研究区域和土壤采样点分布图 Figure 1 Map of study area and soil sampling sites

1.4 数据处理

本研究采用 Excel 2019 对土壤中各重金属含量 数据进行描述性统计分析,利用 IBM SPSS Statistics 25 进行 Person 相关分析和因子分析,在 Excel 中进行 PCA/APCS 受体模型分析的相关计算。地统计分析 利用 ArcGIS 10.6 地统计分析模块(Geostatistical analyst),采用克里金法对各重金属含量值进行空间插 值,并绘制成图。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量描述性统计分析

如表1所示,湘潭县土壤Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、 Zn和Ni含量的平均值分别为0.62、0.16、14.21、 43.77、73.59、26.63、78.38 mg·kg⁻¹和27.30 mg·kg⁻¹, 其中Cd、Hg和Pb的平均值分别是湖南省背景值的 7.29、1.67、1.62倍,As、Cr、Cu、Zn和Ni平均值均接近 于背景值。除Cd外,其余重金属含量的平均值均未 超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB 15618—2018)所规定的对应重金属的 农用地土壤污染风险筛选值。151个样本点位中, Cd、Hg、As、Pb、Cr、Cu、Zn和Ni超筛选值的点位占比 分别为75.66%、2.63%、2.63%、1.97%、0.66%、4.61%、 0.66%和3.29%。

湘潭县农田土壤重金属变异系数大小依次为Cd> Hg>Cr>Cu>Ni>As>Zn>Pb,其中,Cd变异系数最大,其 次是Hg,空间异质性较强,这可能是人为活动造成 的,存在点源污染^[15]。

2.2 土壤重金属污染源解析

2.2.1 土壤重金属污染源定性识别

(1)相关性分析

如表2所示,研究区土壤Cd-Pb、Cd-Zn、Hg-As、 Hg-Pb、As-Pb、As-Zn、Pb-Zn、Cr-Cu、Cr-Ni、Cu-Zn、 Cu-Ni之间存在极显著的正相关关系(P<0.01),其中 Pb-Zn和Cr-Ni相关系数为0.500和0.605;相关系数 越大说明这些重金属元素两两之间关系越强,越有可 能具有相似的污染来源^[17]。

(2)因子分析

为了进一步明确各土壤中重金属的来源,采用因 子分析法对研究区内的各重金属含量进行解析。因 子分析是在保留原始数据大部分信息的情况下,把一

表1 湘潭县土壤重金属含量描述性统计(*n*=151)(mg·kg⁻¹) Table 1 Descriptive statistics of soil heavy metals content in Xiangtan County(*n*=151)(mg·kg⁻¹)

		-	-	-		
元素 Elements	平均值 Mean value	最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation/%	背景值 ^[16] Background value
Cd	0.62	7.70	0.13	0.69	111.29	0.085
Hg	0.16	0.77	0.01	0.11	68.75	0.096
As	14.21	37.00	0.25	5.33	37.51	14
Pb	43.77	88.00	21.00	12.95	29.59	27
Cr	73.59	295.00	6.40	36.82	50.03	68
Cu	26.63	96.00	9.10	12.81	48.10	26
Zn	78.38	215.00	29.00	25.91	33.06	94
Ni	27.30	112.00	6.60	11.83	43.33	32

表2 湘潭县土壤重金属相关性分析

Table 2 Correlation analysis of heavy metals in Xiangtan County										
	Cd	Hg	As	Pb	Cr	Cu	Zn	Ni		
Cd	1									
Hg	0.141	1								
As	0.055	0.222**	1							
Pb	0.469**	0.235**	0.223**	1						
Cr	0.025	-0.041	0.122	0.082	1					
Cu	-0.064	-0.113	0.159	-0.058	0.292**	1				
Zn	0.437**	0.097	0.307**	0.500**	0.066	0.412**	1			
Ni	0.082	-0.046	0.120	0.191	0.605**	0.228**	0.121	1		

注:**在0.01水平(双尾)下,相关性显著。

Note: ** indicates the correlation is significant at the level of 0.01(double tail).

农业环境科学学报 第40卷第5期

些信息重叠、具有错综复杂关系的可观测变量归结为 少数具有代表性且不具相关性的潜在因子,环境学领 域中经常利用这些潜在因子来研究土壤重金属的来 源^[18]。研究区土壤重金属含量数据经KMO检验和 Bartlett's球体检验,KMO检验系数0.568>0.5, Bartlett's球体检验P<0.05,表明各重金属元素相关 性强,适合进行因子分析。结果(表3)显示,前4个因 子的累积解释总方差为77.04%,说明这4个因子能够 反映全部数据的大部分信息。

因子1的贡献率是23.11%,其中Cd、Pb和Zn具 有较大载荷。由相关分析可知,Cd、Pb和Zn两两之 间具有显著性相关关系:由图2可知,3种重金属空间 分布相似,高值区域主要分布于东北部,Cd含量由西 南向东北逐渐增大,并且Cd的点位超筛选值占比达 到了75%以上。经调查,东北部的乡镇工矿企业发 达,分布了众多化工厂、采矿场等。大部分化工厂以 生产含Zn化合物为主,比如立德粉、一水硫酸锌和次 氧化锌等,部分工厂以生产电解铅、一氧化铅等初级 产品为主;该区域还分布有 Pb采矿场和有色金属冶 炼和压延加工厂。Cd广泛应用于各种化工业,是炼 Zn业的副产品,Pb矿开采以及有色金属冶炼等也是 其重要来源之一。这些重金属通过废气、废水和废渣 的排放,经过大气沉降、地表径流、固废堆弃等会造成 土壤中Cd、Pb和Zn的富集[19-22]。周亚龙等[23]对雄安 新区农田土壤的研究表明,Cd、Pb和Zn主要来源于 有色金属熔炼厂等工业源和交通源等的共同影响, Yang等[24]在浙江温岭的研究发现,Cd主要来自工业 排放。综上分析,因子1代表的是"工业源"。

因子2的贡献率是20.54%,载荷较大的重金属有 Ni和Cr;因子3的贡献率是17.56%,载荷较大的重金 属只有Cu。由表1可知,Ni的平均含量略低于湖南 省背景值,并且Cr和Cu平均含量也都极接近于背景 值,分别为背景值的1.08倍和1.02倍。相关性分析中 Ni和Cr为显著性正相关(P<0.01),相关系数为 0.605,Cu与Ni、Cr之间也分别呈显著性正相关(P< 0.01),大量研究表明Ni、Cr和Cu在土壤中的含量与 其在成土母质中含量相近,与成岩成分有关,受人为 影响较小^[25-27]。从空间分布来看,3种重金属也具有 相似的分布特征和规律,Cr、Ni、Cu的高值均出现在 南部,Cu的一小部分高值出现在西北部。总体来看, 因子2和因子3的来源主要是"自然源"。

因子4的贡献率是15.84%,载荷较大的重金属有 Hg和As,并且两者具有显著相关性,从空间分布看, 既有相似之处,也存在差异。由图2可以看出,Hg高 值区分布集中,与低值区有明显界限,Hg的平均含量 值是当地背景值的1.67倍,说明该县土壤Hg含量存 在富集。调研发现高值区有河流以及灌溉渠经过,河 流周边存在排放Hg废水的企业,故推测高值区土壤 Hg的累积可能是长期河流污灌造成的。As的高值区 在整个县域内分布分散,与工矿企业分布区及污灌区 无明显空间关联。韩志轩等^[28]和Giersz等^[29]研究表明 Hg和As是农药的重要组成元素,多次施用含As农药 的土壤As含量值可达2000 mg·kg⁻¹,是未施过农药 土壤的200余倍^[30]。含Hg或无机As类农药在禁用之 前广泛应用于农业,但由于重金属的难降解性,至今 还在土壤中有所累积留存。故因子4归为"农业源"。 2.2.2 土壤重金属污染源定量解析

(1)APCS-MLR分析计算污染源贡献率的可靠性 评估

根据 APCS-MLR 受体模型将因子分析的4个主 因子得分转换为绝对主因子得分,再将绝对主因子得 分与8种重金属元素含量分别进行多元线性回归分 析,得到关于8种重金属元素的多元线性回归方程, 由方程可得各元素的含量拟合值,与实测值作比较, 该值越接近于1说明多元线性回归拟合度越好^[31-32]。 图3结果显示,拟合值/实测值均接近于1。另外,Cr、 Cu、Zn、Ni的复相关系数均大于0.8,Cd、Hg、As、Pb的 复相关系数均大于0.7。综上两方面,APCS-MLR 方 法的准确度较高。

(2)基于 APCS-MLR 的污染源贡献率计算

依据上述的相关分析、因子分析、地统计分析和 APCS-MLR分析等,得到污染源识别和定量源解析结

表3 土壤重金属因子分析的旋转成分矩阵

Table 3	Rotation	matrix	of	factor	analysis	for	heavy	metals	in	soil	

元素	因子Factors							
Elements	1	2	3	4				
Cd	0.859	0.010	-0.047	-0.048				
Pb	0.798	0.130	-0.016	0.256				
Zn	0.651	-0.032	0.636	0.151				
Ni	0.123	0.887	0.073	0.003				
Cr	-0.015	0.886	0.131	0.025				
Cu	-0.086	0.211	0.878	-0.039				
Hg	0.157	-0.050	-0.259	0.786				
As	0.040	0.085	0.371	0.746				
特征值	1.848	1.643	1.405	1.267				
解释总方差/%	23.11	20.54	17.56	15.84				
累积解释总方差/%	23.11	43.64	61.20	77.04				





Figure 2 Spatial distribution of soil heavy metals content in Xiangtan County

www.aer.org.cn

果如图4所示。

湘潭县农田土壤重金属 Cd、Pb、Zn 的来源以工业 源为主,工业源对这3种重金属的贡献率分别为 65.36%、49.21%、43.43%,受人为活动影响较大;同时 自然源对Zn 也有较大的贡献率,农业源对这3种元 素的贡献较低。Cr、Cu、Ni 的平均含量均接近湖南省 背景值,来源以自然源为主,对这3种元素的贡献率 分别为89.67%、87.87%、86.73%,工业源和农业源的 贡献率较低。农业源对 Hg 和 As 的贡献率分别为 24.97%和59.20%,由定量解析结果看,自然源和工业 源对这两种元素也有较大的贡献,其中工业源和自然 源对 Hg 的贡献率分别为 22.12%和43.87%。图4中 白色柱代表其他污染源,占比较大的有 Cd 和 Pb,其 代表的来源有待进一步研究,农田土壤中各重金属的 含量是多种来源的集合,受人为影响越大,其来源越 广泛,这与诸多研究结果相符^[33-35]。



图3 APCS-MLR的准确性表征

Figure 3 Characterization of accuracy of the APCS/MLR



图4 湘潭县土壤重金属污染源贡献率



农业环境科学学报 第40卷第5期

上文中该模型的可靠性评估表明该模型解析结 果是准确且可靠的,利用该方法得到的贡献率数值可 能会受到具体土壤重金属含量数据的影响^[2],但不会 影响解析得到的主要污染源及其贡献率相对大小。 综上,本研究解析结果能够为接下来的土壤防治与修 复工作提供一定的理论依据。

3 结论

(1)湘潭县农田土壤中Cd、Hg、Pb含量的平均值 分别超出湖南省各重金属背景值的7.29、1.67、1.62 倍,其余均接近于背景值。除Cd外,其他7种重金属Cr、 As、Hg、Pb、Ni、Cu、Zn含量的平均值均低于《土壤环 境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》 (GB 15618—2018)所规定的对应重金属的土壤污染 风险筛选值。农田土壤Cd空间变异性较强,受人为 活动影响大,在所研究的点位中超筛选值的点位占比 为75.66%,因此,应严格控制Cd的来源,加强治理, 分区管理。

(2)通过相关性分析、因子分析和地统计学分析, 湘潭县农田土壤中这8种重金属的污染源大致分为 工业源、自然源和农业源这3种主要来源。由APCS-MLR受体模型的定量源解析可知,工业源对Cd、Pb、 Zn、Hg具有较大贡献率,分别为65.36%、49.21%、 43.43%和22.12%。农业源对As、Hg、Pb具有较大贡 献率,分别为59.20%、24.97%、17.82%。自然源对Ni、 Cu、Cr具有较大贡献率,分别为86.73%、87.87%、 89.67%。

(3)本研究表明,传统统计学方法因子分析和 APCS-MLR的混合方法结合地统计分析,能较为快速 和准确地定性、定量解析出湘潭县农田土壤重金属的 来源与贡献率,为当地农田土壤重金属修复治理和科 学管理提供理论依据。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 2019 中国生态环境状况公报[R]. 北京:中华人民共和国生态环境部, 2019:37. Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. 2019 bulletin on China's ecological environment[R]. Beijing: Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China, 2019:37.
- [2] 陈雅丽, 翁莉萍, 马杰, 等. 近十年中国土壤重金属污染源解析研究 进展[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(10):2219-2238. CHEN Yali, WENG Li-ping, MA Jie, et al. Review on the last ten years of research on source identification of heavy metal pollution in soils[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2019, 38(10):2219-2238.
- [3] Liu Y, Liu G, Yousaf B, et al. Carbon fractionation and stable carbon

2021年5月

isotopic fingerprint of road dusts near coal power plant with emphases on coal-related source apportionment[J]. *Ecotoxicology and Environment Safety*, 2020, 202:110888.

- [4] Wu J, Li J, Teng Y, et al. A partition computing-based positive matrix factorization (PC-PMF) approach for the source apportionment of agricultural soil heavy metal contents and associated health risks[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 388:121766.
- [5] 曹佳艺. 基于 UNMIX 模型的农田土壤重金属源解析及污染损失评价[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2019. CAO Jia-yi. Source analysis and pollution loss assessment of heavy metals in farmland soil based on UNMIX model: A case study of a town in south China[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019.
- [6] 李娇, 吴劲, 蒋进元, 等. 近十年土壤污染物源解析研究综述[J]. 土 壤通报, 2018, 49(1):232-242. LI Jiao, WU Jin, JIANG Jin-yuan, et al. Review on source apportionment of soil pollutants in recent ten years[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(1):232-242.
- [7] Huang Y, Deng M, Wu S, et al. A modified receptor model for source apportionment of heavy metal pollution in soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 354:161–169.
- [8] Mokhtarzadeh Z, Keshavarzi B, Moore F, et al. Potentially toxic elements in the middle east oldest oil refinery zone soils: Source apportionment, speciation, bioaccessibility and human health risk assessment[J]. *Environmental Science Pollution*, 2020, 27(32):40573-40591.
- [9] Jia Z, Wang J, Zhou X, et al. Identification of the sources and influencing factors of potentially toxic elements accumulation in the soil from a typical karst region in Guangxi, Southwest China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256:113505.
- [10] 谢利奥. 湖南省水稻产量指数与收入指数保险产品可行性研究
 [D]. 长沙:湖南大学, 2019. XIE Li-ao. Study on suitability of rice yield index and income index insurance products in Hunan Province
 [D]. Changsha; Hunan University, 2019.
- [11] 刘瑞雪, 乔冬云, 王萍, 等. 湘潭县农田土壤重金属污染及生态风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1523-1530. LIU Rui-xue, QIAO Dong-yun, WANG Ping, et al. Heavy metal pollution and potential ecological risk assessment in farmland soils located in Xiangtan County in Hunan Province, China[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2019, 38(7):1523-1530.
- [12] 何其辉. 长株潭典型中轻度污染农田土壤重金属来源及有效性分析[D]. 长沙:湖南师范大学, 2018. HE Qi-hui. Analysis on the source of mild pollution soil and the availability of heavy metals in the typical farmland in Chang-Zhu-Tan Area[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2018.
- [13] 吴永盛, 徐金龙, 庄姜云, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱 (ICP-MS)法同时测定土壤中8种重金属元素[J]. 中国无机分析化 学, 2017, 7(4):16-20. WU Yong-sheng, XU Jin-long, ZHUANG Jiang-yun, et al. Simultaneous determination of eight heavy metals in soil by microwave digestion-ICP-MS[J]. Chinese Journal of Inorganic Analytical Chemistry, 2017, 7(4):16-20.
- [14] Cheng G, Wang M, Chen Y, et al. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2020, 42(11):3795-3810.

- [15] Ma L, Wang L, Jia Y, et al. Arsenic speciation in locally grown rice grains from Hunan Province, China: Spatial distribution and potential health risk[J]. Science of the Total Environment, 2016, 557/558:438– 444.
- [16] 潘佑民. 湖南土壤背景值及研究方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1988. PAN You-min. Soil background values and research methods in Hunan Province[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1988.
- [17] 袁宏, 钟红梅, 赵利, 等. 基于 PCA/APCS 受体模型的崇州市典型 农田土壤重金属污染源解析[J]. 四川环境, 2019, 38(6): 35-43. YUAN Hong, ZHONG Hong-mei, ZHAO Li, et al. Analysis of heavy metal pollution sources of typical farmland soils in Chongzhou city based on PCA/APCS receptor model[J]. Sichuan Environment, 2019, 38(6): 35-43.
- [18] Zhou F, Huang G H, Guo H, et al. Spatio-temporal patterns and source apportionment of coastal water pollution in eastern Hong Kong [J]. Water Research, 2007, 41(15):3429-3439.
- [19] 王娟. 铜陵新桥矿区大气-植物-土壤系统重金属污染特征及铅同 位素源解析[D]. 合肥:安徽大学, 2019. WANG Juan. Pollution characteristics and lead isotope source apportionment for heavy metals in atmosphere-plant-soil system around Xinqiao mining area in Tongling[D]. Hefei: Anhui University, 2019.
- [20] 魏迎辉,李国琛,王颜红,等.PMF模型的影响因素考察——以某 铅锌矿周边农田土壤重金属源解析为例[J].农业环境科学学报, 2018,37(11):2549-2559. WEI Ying-hui, LI Guo-chen, WANG Yan-hong, et al. Investigating factors influencing the PMF model: A case study of source apportionment of heavy metals in farmland soils near a lead-zinc ore[J]. Journal of Agro-Environmental Science, 2018, 37(11):2549-2559.
- [21] Kumar M, Furumai H, Kurisu F, et al. Tracing source and distribution of heavy metals in road dust, soil and soakaway sediment through speciation and isotopic fingerprinting[J]. *Geoderma*, 2013, 211–212: 8– 17.
- [22] Huang Y, Zhang S, Chen Y, et al. Tracing Pb and possible correlated Cd contamination in soils by using lead isotopic compositions[J]. *Jour*nal of Hazardous Materials, 2020, 385:121528.
- [23] 周亚龙,杨志斌,王乔林,等.雄安新区农田土壤-农作物系统重金 属潜在生态风险评估及其源解析[J].环境科学,2021,42(4): 2003-2015. ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, et al. Potential ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in soil-crop system in Xiong' an New District[J]. Environmental Science, 2021, 42(4): 2003-2015.
- [24] Yang S, He M, Zhi Y, et al. An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities[J]. *Environment International*, 2019, 133: 105239.
- [25] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太滆运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. 环境科学, 2019, 40(11):5073-5081. LI Wei-di, CUI Yun-xia, ZENG Cheng-cheng, et al. Pollution characteristics and source analysis of heavy metals in farmland soils in the Taige canal valley[J]. Environmental Science, 2019, 40(11):5073-

www.ger.org.cn

986

农业环境科学学报 第40卷第5期

- 5081.
 [26] Zhou F, Liu Y, Guo H. Application of multivariate statistical methods to water quality assessment of the watercourses in northwestern new territories, Hong Kong[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2007, 132(1/2/3):1-13.
- [27] Cheng G, Wang M, Chen Y, et al. Source apportionment of water pollutants in the upstream of Yangtze River using APCS-MLR[J]. Environmental Geochemistry Health, 2020, 42(11):3795-3810.
- [28] 韩志轩, 王学求, 迟清华, 等. 珠江三角洲冲积平原土壤重金属元 素含量和来源解析[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3455-3463. HAN Zhi-xuan, WANG Xue-qiu, CHI Qing-hua, et al. Occurrence and source identification of heavy metals in the alluvial soils of Pearl River Delta region, south China[J]. China Environmental Science, 2018, 38(9): 3455-3463.
- [29] Giersz J, Bartosiak M, Jankowski K. Sensitive determination of Hg together with Mn, Fe, Cu by combined photochemical vapor generation and pneumatic nebulization in the programmable temperature spray chamber and inductively coupled plasma optical emission spectrometry[J]. *Talanta*, 2017, 167:279–285.
- [30] 冯云刚,朱琨,张伟. 砷对土壤的污染及生物修复技术[J]. 河南农 业, 2008, 1:24-25. FENG Yun-gang, ZHU Kun, ZHANG Wei. Arsenic pollution to soil and bioremediation technology[J]. Journal of Henan Agricultural, 2008, 1:24-25.

- [31] 于少将. 滦河下游地区地下水重金属污染来源分析研究[D]. 石家 庄:河北地质大学, 2019. YU Shao-jiang. Analysis of heavy metal pollution in groundwater on the lower reaches of the Luanhe Rivertaking iron ions as an example[D]. Shijiazhuang: Hebei University of Geosciences, 2019.
- [32] Hingorani R, Jimenez-Relinque E, Grande M, et al. From analysis to decision: Revision of a multifactorial model for the in situ assessment of NOx abatement effectiveness of photocatalytic pavements[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 402:126250.
- [33] Hu Y, Cheng H. Application of stochastic models in identification and apportionment of heavy metal pollution sources in the surface soils of a large-scale region[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(8):3752-3760.
- [34] 瞿明凯,李卫东,张传荣,等.基于受体模型和地统计学相结合的 土壤镉污染源解析[J].中国环境科学,2013,33(5):854-860. QU Ming-kai, LI Wei-dong, ZHANG Chuan-rong, et al. Source apportionment of soil heavy metal Cd based on the combination of receptor model and geostatistics[J]. China Environmental Science, 2013, 33 (5):854-860.
- [35] Duan Y, Zhang Y, Li S, et al. An integrated method of health risk assessment based on spatial interpolation and source apportionment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 276:123218.