

刘丽, 魏晓, 文雪峰, 等. 铅、镉同位素在重金属污染源解析中的应用——基于 CiteSpace 计量分析[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 557-566.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2023.02.030

铅、镉同位素在重金属污染源解析中的应用——基于 CiteSpace 计量分析

刘丽, 魏晓, 文雪峰, 宋理洪, 杨昌隆, 周发

(贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了解铅(Pb)、镉(Cd)同位素在重金属污染源解析应用方面的研究进展及未来发展态势,以 Web of Science 核心数据库中2008–2021年的相关文献为研究对象,运用 CiteSpace 软件对文献进行可视化分析。结果表明:2008–2021年国际上本研究领域的英文发文数量呈波动增长趋势,2015年后文献量增长幅度较大。在此期间,国际上本领域的研究大致划分为2个时期:2008–2014年,研究焦点侧重于工业、采矿、冶炼等行业的重金属污染状况研究,主要涉及大气、水体和沉积物(湖泊、水库和河流)等介质的重金属污染源解析;2015–2021年,研究焦点逐渐转向重金属与人体健康领域,重点关注土壤及农作物重金属的污染源解析、食品安全和人体健康风险评估等问题。总体上,Pb、Cd同位素在重金属污染源解析应用方面的研究由单一同位素解析、单一环境介质应用向多同位素联合解析、多介质应用方向发展。

关键词: 重金属污染; 源解析; Cd同位素; Pb同位素; CiteSpace

中图分类号: X592 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)02-0557-10

Application of lead-cadmium isotopes in the analysis of heavy metal pollution sources——based on CiteSpace quantitative analysis

LIU Li, WEI Xiao, WEN Xue-feng, SONG Li-hong, YANG Chang-long, ZHOU Fa

(College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Lead (Pb) and cadmium (Cd) isotopes have been widely used in the source analysis of heavy metal pollution in the atmosphere, sediment and soil. In order to understand the research progress and future research trends of the application of Pb and Cd isotopes in the field of heavy metal pollution source analysis, this study took the related literatures in the core database of Web of Science from 2008 to 2021 as the research object, and CiteSpace software was used to draw a knowledge map of this research and make a visual analysis of the literatures. Results showed that the number of international English publications on the topic experienced a fluctuating, increasing trend between 2008 to 2021, and the number of papers increased significantly after 2015. During this period, the international research in this field was roughly divided into two periods: from 2008 to 2014, the research focus focused on the study of heavy metal pollution in industries such as industry, mining, smelting, etc., mainly involving the atmosphere, water and sediments (lakes, reservoirs and rivers). From 2015 to 2021, the research focus gradually turned to the field of heavy metals and human health, focusing on the pollution source analysis of heavy metals in soil and crops,

收稿日期: 2022-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(42167032、41473027); 贵州省科技计划项目[黔科合支撑(2022)一般198]

作者简介: 刘丽(1996-), 女, 贵州铜仁人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染防治研究。(E-mail) 1433351417@qq.com

通讯作者: 魏晓, (E-mail) xweil@gzu.edu.cn

and multi-media extended application. In general, the research on the application of Pb and Cd isotopes in the field of heavy metal pollution source analysis has developed from single isotope analysis and single environmental media application to multi-isotope joint analysis and multi-media extended application.

Key words: heavy metal pollution; source analysis; cadmium isotope; lead isotope; CiteSpace

随着城市化和工业化的快速发展,由人类活动引发的环境污染问题愈发严重^[1]。重金属污染物通过大气沉降、施肥、灌溉等方式危害生态安全、农业生产^[2]。排入环境的重金属铅(Pb)、镉(Cd)污染物导致地表和地下水体的严重污染^[3-4],从而威胁整个生态系统服务功能的正常运转^[5]。Pb和Cd污染兼有持久性和隐蔽性的特点^[6],仅仅运用重金属的总浓度不能准确地判断环境污染物的来源^[7]。因此,针对重金属污染防治,解析重金属污染来源及贡献率是重金属污染防治的前提和基础。

化学质量平衡法^[8]、多元线性回归法^[9]和数据统计分类法^[10]等技术是重金属污染源解析领域研究的常用手段。化学质量平衡法虽然采样量较少,但解析效果较差,无法得到每一个污染源的贡献率。多元线性回归法和数据统计分类法的分析结果易产生偏差且采样数量多。这些方法在重金属污染源的定量解析方面存在局限,因此,重金属污染源的准确解析必须借助更先进的科学技术手段。稳定同位素指纹分析法因其具有分析精确度高、需要样品数量较少、辨别能力较强等特点,已成为污染源解析领域非常重要的研究方法^[11-13]。目前,Pb同位素已经被用于大气^[14-15]、冰雪^[16]、地衣^[17]、泥炭沼泽^[18]以及土壤^[19-21]等介质的重金属污染源解析。Cloquet等^[22]的研究结果表明,Cd同位素可作为环境污染源识别的一种新示踪技术,而且Cd同位素与Pb同位素的互补能够有效提高污染源解析的精确度。重金属污染源解析研究相关的论文逐年增多,但是这些研究大多数局限于某个方向,比如水体、大气中重金属污染源解析。缺少从宏观角度,系统性地分析重金属源解析领域的研究现状、前沿热点和主题演进等。

文献计量学是运用数学与统计学方法来研究科学文献的各种外部特征,进一步剖析相关领域的研究进展与发展势态的研究方法^[23],已被广泛应用于管理学、教育学和体育学等领域^[24]。但关于Cd、Pb同位素在重金属污染源解析应用方面的文献计量学研究尚未见报道。为梳理该领域的研究前沿及演进历程,笔者利用CiteSpace5.8.R3计量软件,以科学文献数据库Web of ScienceTM核心集合为数据源,从发文数量、国家、机构、高被引文献和关键词多角度

对2008-2021年国际发表的Cd、Pb同位素在重金属污染源解析应用方面的文献进行可视化分析,为推进生态环境重金属污染治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

数据样本选取Web of ScienceTM核心合集数据库中的文献资料,以2008-2021年英文文献(选择article和review类型的文献)为研究对象。于2022年1月14日,采用检索式:TS="Source analysis" AND TS=(cadmium isotope OR lead isotope),检索得到420篇英文文献。剔除与主题不相关的13篇,最终得到407篇英文文献。

1.2 分析方法与工具

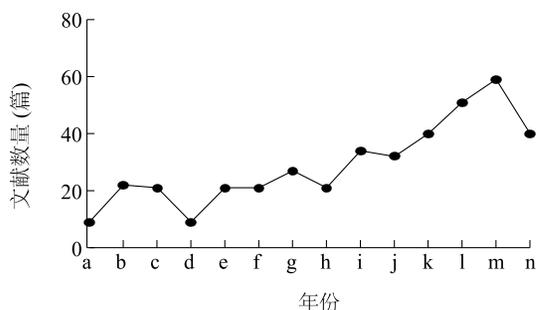
CiteSpace是一种识别科学文献并预测其未来研究方向的软件,也是目前绘制知识图谱最流行的软件之一^[25]。利用CiteSpace软件以及Web of Science数据库自带的分析功能绘制科学知识图谱,展现科学文献的外部特征和知识框架。从Web of ScienceTM核心合集数据库导出数据文本格式为txt全记录,文本统一命名为download_***。将txt文本导入软件CiteSpace5.8.R3,时间跨度设置为2008-2021年,共14年,时间节点(Years per slice)设置为1年,节点类型(Node type)进行相对应勾选,其余参数均为默认,得到国家、机构、高被引文献、关键词共现及突现等可视化图表。

2 结果与分析

2.1 研究论文的年发文量及年变化趋势

发文数量及年际变化趋势可反映研究领域的动态变化和趋势^[26]。2008-2021年,有关Cd、Pb同位素在重金属污染源解析中应用的国际英文文献发文数量整体呈现波动式增长,极个别年份出现小幅度的波动(图1)。发表文献数量从2008年至2021年增长了约4.4倍,2008-2014年和2015-2021年发表的文献数量占文献总量的比例分别为31.9%和68.1%,尤其2015年后文献增长幅度较大。这可能与2014年首届联合国环境大会的召开、检测技术的不断提升以及研究焦点发生转移等因素有关。这表明近年来在国际上该领域的研究受到了

学者们的广泛关注。



a:2008 年;b:2009 年;c:2010 年;d:2011 年;e:2012 年;f:2013 年;g:2014 年;h:2015 年;i:2016 年;j:2017 年;k:2018 年;l:2019 年;m:2020 年;n:2021 年。

图 1 2015-2021 年 Cd、Pb 同位素在重金属污染源解析中应用的国际英文文献年发文量

Fig.1 The number of international English papers on the application of lead and cadmium isotopes in the field of heavy metal pollution source analysis in 2015-2021

2.2 合作网络

2.2.1 国家地区分析 一个国家的发文量一定程度上反映该国对某领域的关注程度^[27]。检索结果显示全球涉及本领域研究的国家或地区共 54 个。利用 CiteSpace 软件中 Institution 分析功能绘制主要发文量国家(表 1)。中国的发文量位居第 1(131 篇),占总量的 29.1%;美国的发文量位居第 2(71 篇),占总量的 15.8%。中国发文量较大可能与中国环境保护部颁布的《国家环境保护“十三五”环境与健康工作规划》有关,该文件明确提出要严密防控重金属(Cd、As、Pb 等)及有毒有害污染物等重点领域环境风险,提高潜在风险的预防能力。仅依靠国家发文的数量并不能说明该国在本领域的文章质量,还需综合其他指标评价。文章的被引频次和国家中介中心性(Intermediary centrality)更能反映文章质量,间接地反映出国家的科研实力。

表 1 发文量前 10 的国家统计

Table 1 Statistics of the top ten countries in terms of the number of publications

排名	国家	发文量(篇)	中介中心性	总被引频次	篇均被引频次
1	中国	131	0.18	3 446	26.31
2	美国	71	0.26	2 246	31.63
3	法国	49	0.29	1 398	28.53
4	英国	33	0.27	1 080	32.73
5	德国	28	0.24	603	21.54
6	西班牙	19	0.11	345	18.16
6	日本	19	0.12	425	22.37
7	韩国	18	0.07	155	8.61
7	加拿大	18	0.05	370	20.56
7	意大利	18	0.04	363	20.17
8	澳大利亚	17	0.06	442	26.00
9	波兰	15	0.05	308	20.53
10	捷克	14	0.01	294	21.00

国家的中介中心性是表示该国在某研究领域的国际影响力^[24]。法国和英国的中心性较强,分别为 0.29 和 0.27,其研究成果影响力较大。其次为美国、德国、中国、西班牙和日本,中心性均大于 0.1。捷克的中心性仅为 0.01,影响力较小(表 1)。此外,将 54 个国家进行合作分析,得到图 2。图 2 中外圈表示中介中心性不小于 0.1,边像的宽度与中心性大小成正比,节点大小代表国家发文量,连线表示国家之间的合作,连线越粗,共现次数越多,联系

越强。合作网络图谱密度为 0.091,各国之间连线较多,结构相对复杂,表明该领域国际间的合作较为紧密。中国与英国、澳大利亚、日本这 3 个国家在本领域的学术交流较多。

通过综合分析我们认为,整体上本研究领域由法、英、美、德 4 个国家主导。中国在该研究领域的发文数量大,发展势态迅猛,然而研究成果的国际影响力不强。这表明中国在该领域的研究虽然作出了重要贡献,但还应进一步加强该领域的创新性研究。

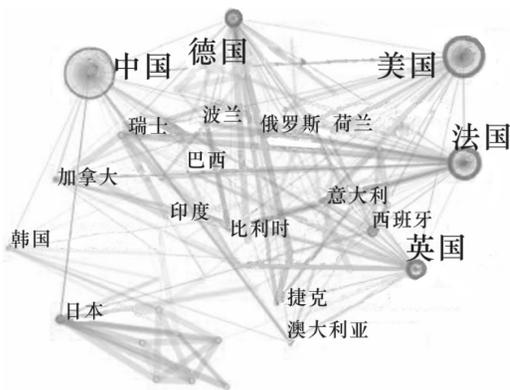


图2 国家合作网络图谱

Fig.2 National collaboration networks

2.2.2 主要研究机构分析 机构代表了某个研究领域的核心科研力量,中心性高的机构通常对该研究领域的理论和方法有创新,并对该研究领域的发展作出了重大贡献^[28]。运用 CiteSpace 软件中 Institution 分析功能绘制研究机构合作网络图谱(图3)。图谱的节点 343 个,连线 442 条,密度 0.007 5。从图 3 可知,形成了以中国科学院、法国国家科学研究院和布拉格大学等为代表的学术群。中国科学院 Wang 等^[29]利用 Cd、Pb 同位素指纹法对农田土壤重金属进行污染源解析研究。以南京大学 Chen 等^[30]为代表的团队主要研究内容是运用定量方法(排放清单和同位素比值分析)解析中国东部太湖地区农用地土壤的重金属来源。以布拉格大学 Francova 等^[31]为代表的团队研究方向主要侧重于 Pb 同位素在不同环境样本中追踪的适用性和大气重金属(Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 等)污染源解析领域的研究^[32]。

以发表论文的第一作者和通信作者隶属机构为准,统计 Web of Science™ 核心合集数据库中本领域的主要发文机构(表2)。从表 2 可知,中国机构共 7 个,分别是中国科学院、中国地质大学、中国地质科学院、南京大学、南京信息工程大学、中国环境科学研究院和华侨大学。综合表 1 分析可知,这 7 个研究机构是中国在本领域的主要科研力量。此外,中国科学院的发文量(58)和中心性(0.24)均排在首位,而且以中国科学院为中心构成最大核心群集(图3)。这表明中国科学院在本领域有很高的权威性,是该领域的核心科研力量之一。法国国家科学研究院的发文量和中心性分别为 10、0.17。该机构提出了一种处理泥炭岩心的综合方案,这为研究大气金属(Pb 和 Pb 同



图3 研究机构合作网络图谱

Fig.3 Institutional cooperation network

位素、Hg、As 等)沉积提供了处理样品的方法指南^[33];该机构还尝试运用 Pb、Cu 和 Zn 同位素指纹法对英国伦敦大气颗粒物中重金属进行源解析^[34],拓展了 Pb 同位素的应用范围。这可能是法国在本研究领域国际影响力较高的主要原因之一。

2.2.3 高被引文献分析 Pb、Cd 同位素在重金属污染源解析应用方面的研究前 10 名高被引文献见表 3。从文献内容来看,其中 6 篇研究主要内容为运用 Pb、Cd 同位素指纹法识别环境中的重金属污染源,主要针对工业、汽车尾气、废物焚烧和燃煤等人为重金属污染进行源解析^[35-36]。Komarek 等^[37]通过测定土壤和蘑菇子实体的 Pb 同位素,探索了蘑菇对重金属的吸收机制,对食用蘑菇中高含量重金属的毒理学风险进行评估。其余几篇主要集中于农田、湖泊沉积物和大气颗粒物中重金属的污染源解析以及健康风险评估。从作者所属机构来看,有 7 篇来自中国机构。其中 Cheng 等^[35]介绍了 Pb 同位素指纹追踪环境中 Pb 来源和 Pb 转运途径的机制,并认为将来同位素指纹法会成为识别 Pb 污染源的关键工具之一。Liu 等^[38]运用 Cd、Pb 同位素组成来解析道路尘埃中的重金属来源,研究结果表明煤燃烧和冶炼为主要来源。综合分析可知,中国学者在重金属污染源解析领域的研究较多,在国际上的活跃度较高。

2.3 研究热点

2.3.1 关键词共现分析 关键词表示一篇论文的核心观点,也是论文主题的精髓。因此,分析某领域文献的关键词有助于了解该领域的研究主题演变过

程及核心内容。运用 CiteSpace 软件对检索到的文献进行关键词共现分析,得到时序图谱(图 4)。时序图谱可以反映出不同时期本研究领域的新兴主题,每个节点所处的位置代表关键词首次出现的年份,如果以后该关键词继续出现,出现频次都会累积至首次出现的年份上,使该关键词的节点变大,但不

会出现新的节点;连线表示该关键词与其他关键词的共现关系,连线越粗,联系越强。结合英文发文量变化曲线,2015 年之后英文发文量显著增加,因此 2015 年可视为一个重要的转折点。将 2008–2021 年划分为 2008–2014、2015–2021 年 2 个时间段进行国际文献关键词共现分析。

表 2 发文数量前 10 的机构

Table 2 Top ten institutions in terms of the number of publications

排名	机构	发文量(篇)	所属国家	中介中心性
1	中国科学院(Chinese Acad Sci)	58	中国	0.24
2	中国地质大学(China Univ Geo)	15	中国	0
3	中国地质科学院(Chinese Acad Geol Sci)	11	中国	0
4	法国国家科学研究院(CNRS)	10	法国	0.17
5	南京大学(Nanjing Univ)	9	中国	0.02
5	布拉格大学(Charles Univ Prague)	9	捷克	0.07
6	英国地质调查局(British Geol Survey)	8	英国	0
7	南京信息工程大学(Nanjing Univ Informat Sci & Technol)	6	中国	0.05
7	帝国理工学院(Imperial Coll London)	6	英国	0.06
8	中国环境科学研究院(Chinese Res Inst Environm Sci)	5	中国	0.02
8	列日大学(Univ Liege)	5	比利时	0.03
8	华侨大学(Huaqiao Univ)	5	中国	0.01
8	图卢兹大学(Univ Toulouse)	5	法国	0.03
8	捷克地理调查局(Czech Geol Survey)	5	捷克	0.01
9	西里西亚工业大学(Silesian Tech Univ)	4	波兰	0.03
9	美国地质调查局(US Geol Survey)	4	美国	0
9	乌特勒支大学(Univ Utrecht)	4	荷兰	0.00
9	内华达大学(Univ Nevada)	4	美国	0.01
9	奥尔胡斯大学(Aarhus Univ)	4	丹麦	0.01
10	海德堡大学(Heidelberg Univ)	3	德国	0.01

2008–2014 年为研究前期,这个时期主要关键词为 Pb 同位素、重金属、污染等。该时期侧重于工业、采矿、冶炼等行业的重金属污染状况研究,主要涉及大气、水体和沉积物(湖泊、水库和河流)等介质的重金属污染源解析。例如,有研究以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值对 $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 值作图,对比分析同位素指纹图比率来确定西安市大气颗粒 Pb 污染源,结果表明大气颗粒物 Pb 来自燃煤(39.0%)、汽车尾气(30.4%)、工业排放(17.8%)、废物燃烧(11.6%)和其他(1.2%)^[39]。前人运用 Pb 同位素对北半球大气中 Pb 进行源解析,研究结果表明早期北半球大气的大

规模污染主要是由于欧洲和中国粗糙的制铜、高污染冶炼的排放引起^[40-43]。此外,中国中部某湖泊沉积物岩心的放射性探测和重金属 Pb、Cd 同位素组成分析结果表明其重金属浓度从公元前 3000 年左右开始逐渐增加^[44]。该阶段 Pb、Cd 同位素指纹法成为解析重金属污染源的重要手段,利用其对大气和沉积物中重金属污染源的精准识别,在一定程度上提升了污染的防治效率。

2015–2021 年为研究后期,该时期的研究主题主要集中在健康风险评价和同位素分馏机制,包括耕地土壤、道路灰尘、农作物以及 Pb 和 Cd 同位素

分馏等关键词。对检索文献深入梳理发现,该时期中国学者发表有关 Pb、Cd 同位素在耕地土壤重金属源解析领域中应用的研究成果较多^[45-47]。这可能与中国 2016 年颁布《土壤污染防治行动计划》有关,该文件明确规定加大农用地污染防治力度,重点监管土壤中 Cd、Hg、As、Pb、Cr 等重金属。同时国外也有众多学者运用 Pb、Cd 同位素解析土壤及植物的重金属污染源。例如 Durdic 等^[48]运用 Pb、Cd 同位素联合解析雨伞菇中的重金属来源,发现其 Pb 主要来自表层土壤。Wiggenhauser 等^[49]尝试运用天然 Cd 同位素对土壤-植物系统重金属进行源解

析。Salmanzadeh 等^[50]调查了某施用化肥的农田土壤和化肥 Cd 同位素的组成。此外,在蒸发、冷凝、吸附、沉淀、生命活动以及风化过程中 Pb、Cd 同位素分馏行为已得到初步研究^[51-54],尤其 Cd 同位素易发生分馏行为^[55-56]。因此探明相关条件下 Pb、Cd 同位素分馏因子及分馏机制,是有效解释天然 Pb、Cd 同位素信号的关键。对 Pb、Cd 同位素分馏机制的进一步研究,以及运用 Pb、Cd 等多同位素对重金属污染源进行联合解析,均有利于提高污染源解析的准确性。

表 3 2008–2021 年高被引频次论文

Table 3 Papers with high citation frequency from 2008 to 2021

作者	期刊	发表年份	文献	总被引频次
KOMAREK M	Environment International	2008	Lead isotopes in environmental sciences; a review	530
CHENG H F	Environmental Pollution	2010	Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China; a review	490
LIU E F	Science of the Total Environment	2014	Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China	168
HUANG Y	Journal of Hazardous Materials	2015	An integrated approach to assess heavy metal source apportionment in peri-urban agricultural soils	149
HU W Y	Environmental Pollution	2018	Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China; an integrated approach	137
CHEN J M	Journal of Hazardous Materials	2008	Characteristics of trace elements and lead isotope ratios in PM _{2.5} from four sites in Shanghai	129
BI C J	Science of the Total Environment	2018	Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China	125
XU H M	Atmospheric Environment	2012	Lead concentrations in fine particulate matter after the phasing out of leaded gasoline in Xi'an, China	119
KOMAREK M	Environment International	2007	Metal/metalloid contamination and isotopic composition of lead in edible mushrooms and forest soils originating from a smelting area	73
DONG S	Atmospheric Environment	2017	Isotopic signatures in atmospheric particulate matter suggest important contributions from recycled gasoline for lead and non-exhaust traffic sources for copper and zinc in aerosols in London	58

2.3.2 关键词突现分析 关键词突现是指在短时间内关键词频次显著增加,了解该时期关注度较高的研究,可据此判断领域的研究前沿^[57]。Pb、Cd 同位素在重金属污染源解析方面的应用研究文献关键词的突现见图 5。前 11 位突现关键词的突现强度都达到了 3 以上,说明这些关键词都是世界本领域中研究热点的良好反映。其中“大气污染”、“湖泊沉积”和“沉淀物”以最长突现时间 6 年并列首位,表明运用 Pb、Cd 同位素对大气污染和沉积物中重金属污染进行源解析的研究在 6 年前是该领域的风向标。“健康风

险”一词从 2018 年开始突现持续至 2021 年,这说明近几年重金属健康风险评价的研究倍受关注,主要包括耕地土壤、道路灰尘和农作物等介质重金属的污染源解析及其人体健康风险评估。

综合分析可知,研究前期侧重于大气、水体和沉积物中重金属污染源解析研究,后期逐渐转向耕地土壤、农作物和道路灰尘重金属污染源解析及人类健康风险评价的研究。该结论与前文所述结果有较好的一致性,也印证了前文关于本研究领域的演进历程和焦点变化的总结。

心度表明其在该领域具有较大贡献,国际影响力较强。中国发文数量第一,然而中心度不高。这表明中国在该领域虽然作出了重要贡献,但还应进一步加强创新性研究。

(2)国际上本领域研究大致划分为2个时期:2008-2014年,研究焦点侧重于工业、采矿、冶炼等行业的重金属污染状况研究,主要涉及大气、水体和沉积物(湖泊、水库和河流)等介质的重金属污染源解析;2015-2021年,研究焦点逐渐转向重金属与人体健康领域,重点关注土壤及农作物重金属的污染源解析、食品安全和人体健康风险评估等问题。土壤(灰尘)重金属示踪及健康风险评估研究为当前本领域的热门研究方向。

(3)基于对Pb、Cd同位素在重金属污染源解析领域中应用研究的相关文献计量分析,对未来研究工作提出2点展望:①以生产安全为目标研究重金属在土壤-食物链系统中累积与源解析尚缺乏系统性,今后可运用同位素指纹法对土壤-生产者(植物)-消费者(动物)系统中重金属迁移进行深入研究。②当前同位素测定精度有待进一步提高,需对样品的分离纯化流程和仪器测试方法进行优化。

参考文献:

- [1] 赵其国,周炳中,杨浩.江苏省环境质量与农业安全问题研究[J].土壤,2002(1):1-8.
- [2] YAO Y R, LI J, HE C, et al. Distribution characteristics and relevance of heavy metals in soils and colloids around a mining area in Nanjing, China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021, 107(6): 996-1003.
- [3] 廖建波.流域复合环境系统中重金属的归趋与综合风险评估[D].广州:华南理工大学,2016:20-27.
- [4] 刘硕,吴泉源,曹学江,等.龙口煤矿区土壤重金属污染评价与空间分布特征[J].环境科学,2016,37(1):270-279.
- [5] 蒲雅丽,涂耀仁,游镇烽,等.Pb-Zn同位素在沉积物重金属污染源解析方面的应用:综述与展望[J].环境化学,2017,36(3):581-590.
- [6] ZHANG Y, ZHANG H W, SU Z C, et al. Soil microbial characteristics under long-term heavy metal stress: a case study in Zhangshi Wastewater Irrigation Area, Shenyang[J]. Pedosphere, 2008, 18(1):1-10.
- [7] 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.
- [8] ZHANG M, SALNON L G, SCHAUER J J, et al. Seasonal trends in PM2.5 source contributions in Beijing, China[J]. Atmospheric Environment, 2005, 39(22): 3967-3976.
- [9] OGURA I, GAMO M, MASUNAGA S, et al. Quantitative identification of sources of dioxin-like polychlorinated biphenyls in sediments by a factor analysis model and a chemical mass balance model combined with Monte Carlo techniques[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 2(2): 277-285.
- [10] EMILY H, EMILY N, DAWIT B, et al. A method for separation of heavy metal sources in urban groundwater using multiple lines of evidence[J]. Environmental Pollution, 2018, 241: 787-799.
- [11] BAO Z A, ZONG C L, LIANG P, et al. Direct measurement of Fe isotope compositions in iron-dominated minerals without column chromatography using MC-ICP-MS[J]. Analytical Methods, 2020, 12(20): 2599-2607.
- [12] SATAKE A, UNE A, UENO T, et al. Isotope ratio analysis by HRGC-MS of monoterpene hydrocarbons from citrus essential oils[J]. Bioscience Biotechnology and Biochemistry, 2003, 67(3): 599-604.
- [13] FANG J, FAN J M, LIN Q, et al. Characteristics of airborne lead in Hangzhou, southeast China: concentrations, species, and source contributions based on Pb isotope ratios and synchrotron X-ray fluorescence based factor analysis[J]. Atmospheric Pollution Research, 2018, 9(4): 607-618.
- [14] KATAHIRA K, ISHITAKE M, MORIWAKE H, et al. Statistical analysis of metal concentrations in a sediment core to reveal influences of human activities on atmospheric environment for 200 years[J]. Water Air and Soil Pollution, 2009, 204(1): 215-225.
- [15] CHARALAMPIDES G, MANOLIADIS O. Sr and Pb isotopes as environmental indicators in environmental studies[J]. Environment International, 2002, 28(3): 147-151.
- [16] VEYSSEYRE A M, BOLLHOFER A F, ROSMAN K J, et al. Tracing the origin of pollution in French Alpine snow and aerosols using lead isotopic ratios[J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(22): 4463-4469.
- [17] CLOQUET C, CARIGNAN J, LIBOUREL G. Atmospheric pollutant dispersal around an urban area using trace metal concentrations and Pb isotopic compositions in epiphytic lichens[J]. Atmos Environ, 2006, 40: 574-587.
- [18] SILVA N, SCHOFIELD J E, MIGHALL T M, et al. Climate changes, lead pollution and soil erosion in south Greenland over the past 700 years[J]. Quaternary Research, 2015, 84(2): 159-173.
- [19] CICCHELLA D, DE VIVO B, LIMA A, et al. Heavy metal pollution and Pb isotopes in urban soils of Napoli[J]. Geochemistry-exploration Environment Analysis, 2008, 8: 103-112.
- [20] PODIO N S, BARONI M V, BADINI R G, et al. Elemental and isotopic fingerprint of argentinean wheat. Matching soil, water, and crop composition to differentiate provenance[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(16): 3763-3773.
- [21] OLATUNJI A S, AFOLABI O O. Assessment of Pb contamination of soils, sediments and road dusts of the City of Lagos, Nigeria[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2021, 42(4):

- 1095-1107.
- [22] CLOQUET C, CARIGNAN J, LIBOUREL G, et al. Tracing source pollution in soils using cadmium and lead isotopes[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(8): 2525-2530.
- [23] 张三夕,刘 焯. 论作为一种文学研究方法的文献学[J]. *湖北大学学报(哲学社会科学版)*, 2019, 46(4): 39-43, 176.
- [24] 陈 悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace 知识图谱的方法论功能[J]. *科学学研究*, 2015, 33(2): 242-253.
- [25] 陈 悦,刘则渊,陈 劲,等. 科学知识图谱的发展历程[J]. *科学学研究*, 2008, 26(3): 449-460.
- [26] 帅 鸿,欧阳迪庆,陈玉成. 基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 688-695.
- [27] 田 稼,路鹏鹏,孙 超,等. 基于 Web of Science 数据库的微生物肥料研究发展趋势分析[J]. *中国农业科技导报*, 2019, 21(3): 7-18.
- [28] 吴同亮,王玉军,陈怀满. 2016-2020 年环境土壤学研究进展与热点分析[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(1): 1-15.
- [29] WANG J R, YU D Y, WANG Y H, et al. Source analysis of heavy metal pollution in agricultural soil irrigated with sewage in Wuqing, Tianjin[J]. *Scientific Reports*, 2021, 1: 1-12.
- [30] CHEN L, ZHOU S, LI B, et al. Combining emission inventory and isotope ratio analyses for quantitative source apportionment of heavy metals in agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 204: 140-147.
- [31] FRANCOVA A, CHRASTNY V, SILLEROVA H, et al. Evaluating the suitability of different environmental samples for tracing atmospheric pollution in industrial areas[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 220: 286-297.
- [32] HANA S, VLADISLAV V, MARTINA V, et al. Stable isotope tracing of Ni and Cu pollution in North-East Norway: potentials and drawbacks[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228: 149-157.
- [33] GIVELET N, ROUX G L, CHEBURKIN A, et al. Suggested protocol for collecting, handling and preparing peat cores and peat samples for physical, chemical, mineralogical and isotopic analyses[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2004, 6(5): 481-492.
- [34] DONG S, GONZALEZ R O, HARRISON R M, et al. Isotopic signatures in atmospheric particulate matter suggest important contributions from recycled gasoline for lead and non-exhaust traffic sources for copper and zinc in aerosols in London, United Kingdom[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 126: 88-98.
- [35] CHENG H F, HU Y. Lead (Pb) isotopic fingerprinting and its applications in lead pollution studies in China: a review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5): 1134-1146.
- [36] KOMAREK M, ETTLER, CHRASTNY V, et al. Lead isotopes in environmental sciences: a review[J]. *Environment International*, 2008, 34(4): 562-577.
- [37] KOMAREK M, CHRASTNY V, STICHOVA J. Metal/metalloid contamination and isotopic composition of lead in edible mushrooms and forest soils originating from a smelting area[J]. *Environment International*, 2007, 33(5): 677-684.
- [38] LIU E F, YAN T, BIRCH G, et al. Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 476: 522-531.
- [39] XU H M, CAO J J, HO K F, et al. Lead concentrations in fine particulate matter after the phasing out of leaded gasoline in Xi'an, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 217-224.
- [40] HONG S, CANDELONE J, PATTERSON C, et al. History of ancient copper smelting pollution during Roman and Medieval times recorded in Greenlandic ice[J]. *Science*, 1996, 272: 246-248.
- [41] SHOTYK W, APPLEBY P G, BICALHO B, et al. Peat bogs in northern Alberta, Canada reveal decades of declining atmospheric Pb contamination[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(18): 9964-9974.
- [42] KAMENOV G D, ESCOBAR J, ARNOLD T E, et al. Appearance of an enigmatic Pb source in South America around 2000 BP: anthropogenic vs natural origin[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2020, 276: 122-134.
- [43] LEE C L, QI S, ZHANG G, et al. Seven thousand years of records on the mining and utilization of metals from lake sediments in central China[J]. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42: 4732-4738.
- [44] HU W Y, ZHANG Y, HUANG B, et al. Soil environmental quality in greenhouse vegetable production systems in eastern China: current status and management strategies[J]. *Chemosphere*, 2017, 170: 183-195.
- [45] HU W Y, WANG H F, DONG L, et al. Source identification of heavy metals in peri-urban agricultural soils of southeast China: An integrated approach[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 237: 650-661.
- [46] BI C, ZHOU Y, CHEN Z, et al. Heavy metals and lead isotopes in soils, road dust and leafy vegetables and health risks via vegetable consumption in the industrial areas of Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 619: 1349-1357.
- [47] 韦刚健,黄 方,马金龙,等. 近十年我国非传统稳定同位素地球化学研究进展[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2022, 41(1): 1-44, 223.
- [48] DURDIC S, STANKOVIC V, RAZIC S, et al. Lead isotope ratios as tool for elucidation of chemical environment in a system of *Macrolepiota procera* (Scop) Singer-soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 28(42): 59003-59014.
- [49] WIGGENHAUSER M, BIDLAK M, IMSENG M, et al. Using isotopes to trace freshly applied cadmium through mineral phosphorus fertilization in soil-fertilizer-plant systems[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 648: 779-786.
- [50] SALMANZADEH M, HARTLAND A, STIRLING C H, et al. Isotope tracing of long-term cadmium fluxes in an agricultural soil

- [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7369-7377.
- [51] ZHOU J W, LI Z, LIU M S, et al. Cadmium isotopic fractionation in the soil-plant system during repeated phytoextraction with a cadmium hyperaccumulating plant species[J]. *Issues in Environmental Science and Technology*, 2020, 54(21): 13598-13609.
- [52] DING T P, GAO J F, TIAN S H, et al. Chemical and isotopic characteristics of the water and suspended particulate materials in the Yangtze River and their geological and environmental implications[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014(1): 276-360.
- [53] WANG P C, LI Z G, LIU J L, et al. Apportionment of sources of heavy metals to agricultural soils using isotope fingerprints and multivariate statistical analyses [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249: 208-216.
- [54] KANG M J, KWON Y K, YU S, et al. Assessment of Zn pollution sources and apportionment in agricultural soils impacted by a Zn smelter in South Korea[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 364: 475-487.
- [55] GUINOISEAU D, GALER S J G, ABUCHAI W. Effect of cadmium sulphide precipitation on the partitioning of Cd isotopes: implications for the oceanic Cd cycle[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2018, 498: 300-308.
- [56] YANG S C, ZHANG J, SOHRIN Y, et al. Cadmium cycling in the water column of the Kuroshio-Oyashio Extension region: insights from dissolved and particulate isotopic composition [J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2018, 233: 66-88.
- [57] 罗 杨, 吴永贵, 段志斌, 等. 基于 CiteSpace 重金属生物给性的文献计量分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(1): 17-27.

(责任编辑:张震林)