

doi: 10.12029/gc20240528002

李聪, 黄凤寸, 王梓萌, 尹凤翔, 曹建, 廖琦, 徐雪生, 郭军. 2025. 洞庭湖区沉积物重金属生态风险评价及来源解析[J]. 中国地质, 52(4): 1381–1394.

Li Cong, Huang Fengcun, Wang Zimeng, Yin Fengxiang, Cao Jian, Liao Qi, Xu Xuesheng, Guo Jun. 2025. Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Dongting Lake[J]. Geology in China, 52(4): 1381–1394(in Chinese with English abstract).

洞庭湖区沉积物重金属生态风险评价及来源解析

李聪¹, 黄凤寸¹, 王梓萌², 尹凤翔³, 曹建³, 廖琦¹, 徐雪生⁴, 郭军¹

(1. 中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心, 湖南 长沙 410014; 2. 曼彻斯特大学自然科学学院, 英国 曼彻斯特 M13 9PL; 3. 中南大学资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410014; 4. 湖南省地球物理地球化学调查所, 湖南 长沙 410014)

摘要:【研究目的】洞庭湖为中国第二大淡水湖, 但由于周边矿山开采、化工冶金造成湖区重金属含量累积上升, 查明洞庭湖重金属污染特征及其来源, 对其重金属污染防控和治理具有重要意义。【研究方法】本研究于 2023 年 8 月在洞庭湖 4 条主要入湖流域采集测定了 37 件表层沉积物中 8 种重金属及其理化指标, 采用沉积物质量指南值(SQG)评价了其污染特征, 使用潜在生态风险指数法识别了区内沉积物生态风险, 运用正定矩阵因子模型法(PMF)和相关性解析了其来源及贡献率, 进一步运用冗余分析(RDA)探索了沉积物重金属形态特征。【研究结果】洞庭湖区水系沉积物重金属生态风险较强, Cd 对生态风险贡献程度最高(75.1%), 其次为 Hg(17.2%), 湘江、资江流域具有较高的重金属污染风险。依据 PMF 模型结合区域特征确定了研究区沉积物重金属存在 4 个可能的污染来源, 分别为农业源(42.7%)、大气沉降源(16.1%)、自然源(21.8%)、金属冶炼源(19.5%)。RDA 结果表明 4 条入湖流域沉积物重金属以铁锰结合态为主。【结论】根据 RDA 和相关分析, 说明湖区沉积物 Cd 等重金属含量主要受控于 Fe、Mn 氧化物, 在下步环境修复和污染治理中, 可以利用铁和锰的氧化物特性, 实现重金属污染的有效控制和治理。

关键词: 重金属; 沉积物; 洞庭湖; 生态风险; 源解析; 地质调查工程

创 新 点: 以沉积物质量指南法、潜在生态风险评价法、相关性分析、正定矩阵因子模型法(PMF)和冗余分析(RDA)研究了洞庭湖区沉积物重金属生态风险和来源。

中图分类号: X524; X826 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)04-1381-14

Ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in sediments of Dongting Lake

LI Cong¹, HUANG Fengcun¹, WANG Zimeng², YIN Fengxiang³, CAO Jian³, LIAO Qi¹,
XU Xuesheng⁴, GUO Jun¹

(1. Changsha Natural Resources Comprehensive Survey Center, China Geological Survey, Changsha 410014, Hunan, China; 2. Faculty of Natural Sciences, University of Manchester, Manchester M13 9PL, UK; 3. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410014, Hunan, China; 4. Hunan Provincial Key Laboratory of Geochemical Processes and Resource Environmental Effects, Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan, Changsha 410014, Hunan, China)

收稿日期: 2024-05-28; 改回日期: 2024-08-06

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230478)、湖南省自然科学基金(2024JJ7620)和湖南省重点研发计划基金项目(2023SK2066)联合资助。

作者简介: 李聪, 男, 1995 年生, 助理工程师, 主要研究方向为重金属污染防治研究; E-mail: 448557091@qq.com。

通信作者: 郭军, 男, 1989 年生, 高级工程师, 主要研究方向为环境地球化学; E-mail: Xiaofeng8093@163.com。

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] Dongting Lake, the second largest freshwater lake in China, has experienced increased heavy metal accumulation due to surrounding mining activities and chemical metallurgy. Understanding the characteristics and sources of heavy metal pollution in Dongting Lake is crucial for effective prevention, control and remediation efforts. **[Methods]** In August 2023, 37 surface sediment samples were collected from four main inflow rivers of Dongting Lake. Eight heavy metals and their physicochemical indicators were measured. The pollution characteristics were evaluated using sediment quality guidelines (SQG). The potential ecological risk index method was used to identify the ecological risk of sediments in the area. The sources and contribution rates of the heavy metals were analyzed using the Positive Matrix Factorization (PMF) model and correlation analysis. Redundancy analysis (RDA) was used to explore the morphological characteristics of heavy metals in sediments. **[Results]** The ecological risk of heavy metals in the sediments of the Dongting Lake water system is relatively high, Cd contributed the most to ecological risk (75.1%), followed by Hg (17.2%), with the Xiangjiang and Zijiang river basins exhibiting higher heavy metal pollution risks. Based on the PMF model and regional characteristics, four potential sources of heavy metal pollution in the sediments were identified: agricultural sources (42.7%), atmospheric deposition sources (16.1%), natural sources (21.8%) and metal smelting sources (19.5%). The RDA results showed that the heavy metals in the sediments of the four drainage basins were mainly Fe–Mn combined. **[Conclusion]** According to RDA and related analyses, it is indicated that the content of heavy metals such as Cd in the lake area sediments is mainly controlled by Fe and Mn oxides. In the next step of environmental remediation and pollution control, the oxide characteristics of iron and manganese can be utilized to effectively control and treat heavy metal pollution.

Key words: heavy metals; sediment; Dongting Lake; ecological risk; source analysis; geological survey engineering

Highlights: The distribution characteristics and sources of heavy metal pollution in sediments of Dongting Lake were studied by means of sediment quality guide method, correlation analysis, positive definite matrix factor model (PMF) and redundancy analysis (RDA).

About the first author: LI Cong, male, born in 1995, assistant engineer, engaged in heavy metal pollution prevention and control; E-mail: 448557091@qq.com.

About the corresponding author: GUO Jun, male, born in 1989, senior engineer, engaged in environmental geochemistry; E-mail: Xiaofeng8093@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20230478), Natural Science Foundation of Hunan Province (No.2024JJ7620) and Key Research and Development Project of Hunan Province (No.2023SK2066).

1 引言

重金属由于其毒性、隐蔽性、难以被微生物降解及生物富集等特征,对生态环境及人体健康都具有潜在危害性。水系沉积物是水体重金属的重要归宿和主要储存场所,也是潜在污染受体和污染源(张光贵, 2015),其作为重金属的源和汇,对于水体中重金属的分布和变化有重要作用(刘春雷等, 2023)。同时沉积物作为淡水生态系统的重要组成部分,是重金属污染物的主要载体,绝大部分(超过90%)的重金属污染物从水体归趋到沉积物(Zhang et al., 2017),其汇集了大气沉降、流域侵蚀及人类活动释放等多种来源的重金属污染物;且在水动力作用下,可成为水体重金属二次污染的重要污染源,被认为是水体重金属污染的重要汇源(陈春雷

等, 2013; 李贺等, 2023)。大多数重金属化合物为非降解型有毒物质,生态效应的浓缩和累积作用使其沿食物链被生物体吸收、富集,最终成为生命体慢性中毒的源头(Chen et al., 2016)。同时,沉积物中重金属含量可以判断研究区受污染程度,其含量水平分布可以追踪污染源,了解其扩散范围,甚至可以作为陆源物质的示踪元素(王昕等, 2013)。据调查,世界近80%的人口面临着因人类活动而导致的沉积物重金属污染引发的水质安全问题(Yu et al., 2011),因此,探究识别湖区水体生态系统沉积物中重金属的分布特征及其风险和来源十分必要。

洞庭湖位于湖南省,作为中国第二大淡水湖,具有调蓄、渔业、航运、调节湖区气候和生物多样性保护等重要生态功能(谢意南等, 2017)。其南纳湘江、资江、沅江、澧水(简称“四水”),湖水经西、

南、东洞庭湖调蓄后由城陵矶汇入长江,其周边农业发达,素有“鱼米之乡”美称(童霆, 2005),但沿岸矿山开采、化工冶金等企业众多,所产生的大量废水及材料随之入湖,诱发了一系列环境污染问题,使得洞庭湖存在重金属污染风险(方小红等, 2018)。同时湖区周边养殖有大量鱼、虾、蟹等水产品,聚集在水底的重金属容易“二次释放”到水体中,影响水产品的安全性,通过生物富集和食物链从而威胁到人体健康(方小红等, 2016)。湖南作为中国著名的“有色金属之乡”,污染物排入相对集中、区域污染叠加影响,使得局部区域环境质量持续恶化,对其水系及水域环境造成了严重污染,而这也成为了众多学者所关注的热点问题(Qian et al., 2005)。近年来,不少学者针对洞庭湖沉积物重金属分布特征(祝云龙等, 2008)、赋存形态(Li et al., 2013)、污染程度(祝云龙等, 2008)、生态风险(谢意南等, 2017)以及来源(彭渤等, 2011)进行了大量研究,取得了丰硕成果。但针对洞庭湖“四水”入湖沉积物重金属污染的系统分析还比较欠缺,有关“四水”河流对洞庭湖水域内部所携带重金属贡献率大小尚缺乏明确的认识,因此,本研究通过多元统计学方法,综合分析评价洞庭湖区沉积物重金属含量及空间分布的基础上,定量确定其重金属来源贡献

率,以期对洞庭湖重金属污染防治和生态风险管控提供依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

洞庭湖位于亚热带季风气候区,年均温约 17℃,年降水量 1100~1400 mm,其中 4—6 月占年总降水量的 50% 以上,“四水”流域的矿产资源开采利用的强度大,历史悠久(方小红等, 2019)。省内具有多家大型有色金属冶炼加工企业,主要分布在湘江中下游。

2.2 样品采集

本研究样品采集安排于 2023 年 8—9 月,在研究区域共设置 37 个采样点位,分别为澧水流域(L1~L4)、资江流域(Z1~Z14)、沅江流域(Y1~Y14)和湘江流域(X1~X7)(图 1)。样品采集使用抓斗式采样器采集表层沉积物(0~20 cm)样品,完成后装入聚丙烯密封盒中保存。

2.3 样品处理和分析

样品分析单位为湖南省地质测试研究院,样品经自然风干除杂后研磨,而后将样品过 10 目、20 目筛,研磨至 100 目、200 目。按所送样品总数随机抽取 5% 进行重复分析,计算重复分析的相对偏差。

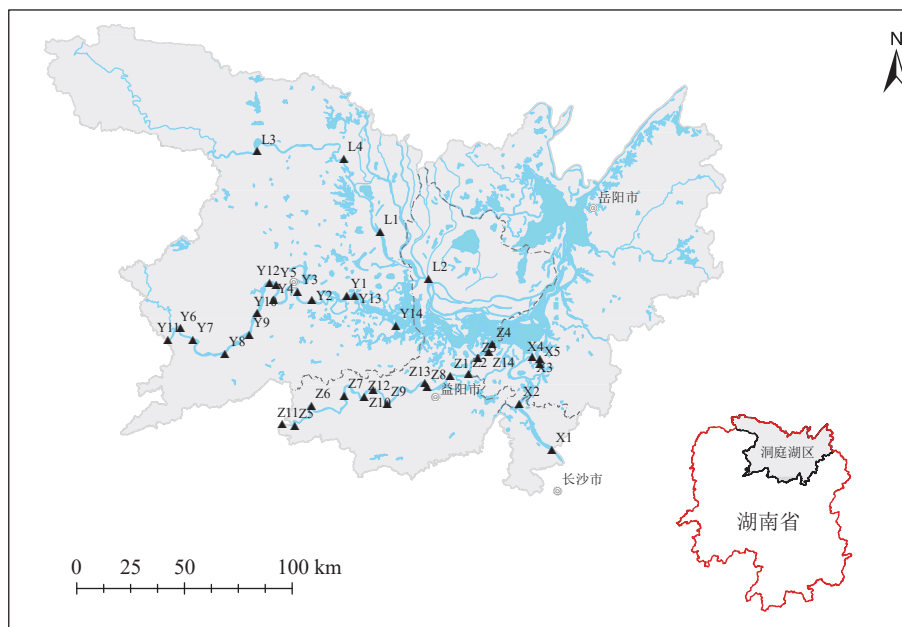


图 1 洞庭湖区主要河流表层沉积物采样位置

Fig.1 Sampling locations of surface sediments of major rivers in Dongting Lake area

样品日常分析精密度控制采用分析国家一级标准物质进行控制。选择 4 个不同的国家一级标准物质, 均匀插入每一分析批中(50 个一批), 与试样一起分析, 每批分析完毕后, 按每个标准物质计算测量值与标准值的对数偏差和对数标准偏差, 用以量化精密度。4 个标准物质的选择, 根据测区样品性质、主要分析元素种类及含量情况, 选取接近背景含量, 兼顾高、中、低含量的标准物质进行控制, 每种元素的分析精密度合格率要求 $\geq 98\%$, 样品分析测试质量均通过了样品分析质量监控单位的验收。元素分析方法及检出限见表 1, 具体测试方法如下。

土壤 As 和 Hg 测定, 称取土壤样品 0.5 g, 通过王水和盐酸溶样并提取后, 利用 5% 的硫脲-抗坏血酸作预还原剂, 高强度空心阴极灯作激发源, 硼氢化钾作氢化物发生剂, 通过原子荧光光谱法测定 As 和 Hg。土壤 Cd、Cu、Pb 和 Zn 测定, 称取土壤样品 0.1g, 通过氢氟酸、盐酸、硝酸和高氯酸溶样并提取后, 利用电感耦合等离子体质谱法测定。土壤 Cr 测定, 称取 105℃ 下烘干的土壤样品 4 g, 通过粉末压片法制样, 利用 X 射线荧光光谱法测定。土壤 Ni 通过氢氟酸、盐酸、硝酸和高氯酸溶样并提取后, 利用电感耦合等离子体原子发射光谱法测定。

2.4 数据分析方法

2.4.1 沉积物质量指南 (SQG)

采用沉积物质量指南中提出的平均可能效应商(mPECQs)值(Macdonald et al., 2000), 来评价水系沉积物中多种重金属元素的生态毒性效应。计算公式如下:

$$\text{mPECQs} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{PEC}_i}}{n} \quad (1)$$

式中, C_i 为水系沉积物中重金属 i 的含量,

表 1 元素分析方法与检出限

Table 1 Element analysis methods and detection limit		
项目	测定方法	检出限/(mg/kg)
As	原子荧光光谱法	0.2
Cd	电感耦合等离子体质谱法	0.02
Cr	X射线荧光光谱法	1.5
Cu	电感耦合等离子体质谱法	0.1
Hg	原子荧光光谱法	0.0005
Ni	电感耦合等离子体原子发射光谱法	0.2
Pb	电感耦合等离子体质谱法	1
Zn	电感耦合等离子体质谱法	1

PEC_i 为重金属 i 对应的可能效应浓度(PECs)值(表 2), n 为重金属元素数量。

综合 Jin et al.(2022) 和 Farkas et al.(2007) 以样本的生物毒性与 mPECQs 值相关性的研究, mPECQs 与水系沉积物的发生率高度相关: 当 $\text{mPECQs} < 0.1$ 时, 预测水系沉积物无毒, 毒性发生概率较低($< 25\%$); 当 $0.1 \leq \text{mPECQs} < 0.34$ 时, 水系沉积物可能存在毒性, 毒性发生概率为 $25\% \sim 65\%$; 当 $0.34 \leq \text{mPECQs} < 1$ 时, 水系沉积物存在毒性的概率较高, 毒性发生概率为 $65\% \sim 70\%$; 当 $1 < \text{mPECQs} < 5$ 时, 水系沉积物存在毒性概率很高, 毒性的发生率为 $70\% \sim 75\%$; 当 $\text{mPECQs} \geq 5$ 时, 毒性发生概率超过 75% , 水系沉积物发生毒性概率极高(孙阔凯等, 2025)。

2.4.2 沉积物污染程度及风险评价

潜在生态风险指数法由 Hakanson 提出, 该方法考虑沉积物中重金属含量、种类、毒性水平和水体对重金属污染敏感性的影响, 广泛应用于国内外土壤与沉积物中重金属环境质量及风险评价(Hakanson, 1980)。计算公式如下:

$$\text{RI} = \sum_i E_i = \sum_i T_i \times \frac{C_i}{B_i} \quad (2)$$

式中: RI 为综合潜在生态风险指数, C_i 为元素 i 的实测质量浓度, mg/kg; B_i 为元素 i 在沉积物中背景值, mg/kg, 本研究采用全国水系沉积物背景值(史长义等, 2016), E_i 为元素 i 的潜在生态风险指数, T_i 为元素 i 的毒性响应系数, 见表 3。

Hakanson 研究了沉积物中 PCB、Hg、Cd、As、Pb、Cu、Cr 和 Zn 等 8 种污染物的潜在生态风险, 其毒性系数(T)分别为 40、40、30、10、5、5、2 和 1, 根据污染物中最大毒性系数($T_{\text{PCB}} = T_{\text{Hg}} = 40$)和

表 2 重金属 TECs 和 PECs 划分

Table 2 Classification of heavy metals TECs and PECs								
元素	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Hg	Ni	Zn
TECs	5.9	0.596	37.3	35.7	35	0.174	18	123
PECs	17	3.53	90	197	91.3	0.486	36	315

表 3 水系沉积物背景值及毒性响应系数

Table 3 Drainage sediment background value and toxicity response coefficient								
参数	As	Hg	Cr	Cu	Ni	Zn	Cd	Pb
B_i /(mg/kg)	7.98	0.067	54.04	20.03	21.95	65.01	0.109	21.93
T_i	10	40	2	5	5	1	30	5

8 种污染物的毒性系数之和 (133) 提出了 E_i 和 RI 的分级标准, 污染物的数目越多、毒性越强, RI 就越大, 因此本研究根据污染物种类及数量, 进行分级标准调整, 见表 4。

2.4.3 正定矩阵因子模型法 (PMF)

本研究采用 PMF5.0 软件(美国环境保护署)模型识别洞庭湖区沉积物重金属的主要来源及其贡献率, 其基本原理是将沉积物数据分解为多个因子的线性组合, 每个因子代表一个潜在的污染源或过程(Paatero et al., 1997)。通过对这些因子的贡献率及特征进行解释, 进而对其进行识别。

3 结果与讨论

3.1 含量特征

研究区 8 种重金属的含量统计结果(表 5)显示, Cd、Cu、Ni、Pb、Cr、Zn、As 和 Hg 的算术平均值分别为 2.11 mg/kg、34.66 mg/kg、32.05 mg/kg、35.54 mg/kg、74.58 mg/kg、141.08 mg/kg、24.04 mg/kg 和 0.22 mg/kg, 变异系数反映了重金属分布在空间上的均匀程度, 变异系数越高, 表明重金属的区域分布受人类活动制约越明显。当变异系数 ≤ 0.2 时其变异程度较低, 0.2~0.51 为中等变异, 0.51~1 为高度变异, >1 时变异程度为极高, 且高变异程度说明污染源差异较大或存在突出的点源污染。根据大小分级依据, Cd(0.93)、As(0.76)、

Hg(0.59) 属于高度变异, Cu(0.35)、Ni(0.27)、Pb(0.40)、Zn(0.37)属于中等变异, Cr(0.19)属于低变异。与 20 世纪 90 年代洞庭湖水系沉积物背景值相比, 分别为洞庭湖水系沉积物背景值 6.3、1.7、1.5、1.5、1.69、1.7、1.8 和 4.6 倍, 说明在过去 30 多年中沉积物中重金属有明显的累积, 人为污染加剧是其重要原因之一。

3.2 沉积物重金属含量分布特征

从洞庭湖区水系沉积物中重金属元素含量的统计结果(图 2), 可以看出 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 Zn 元素在湘江流域其含量最高, 资江流域次之, 而 Hg 元素其含量在沅江流域处于最高值, 综合来看, 4 条入湖流域重金属含量特征为湘江 $>$ 资江 $>$ 澧水 $>$ 沅江。水系沉积物重金属的生物效应强度可以通过 SQG 法进行评价, 其包括阈值效应浓度(TECs)和可能效应浓度(PECs)(表 2)。若水系沉积物重金属的含量低于 TECs 值, 重金属就不会产生有害的生物影响; 若水系沉积物重金属的含量高于 TECs 值而低于 PECs 值, 重金属存在部分生态毒性风险; 若水系沉积物重金属含量高于 PECs 值, 重金属就会产生有害的生物影响。研究区 70.3% 沉积物样品 Pb 含量低于 TECs 值, 29.7% 样品介于 TECs 和 PECs 间且没有样品高于 PECs 值; 62.2% 和 40.5% 的沉积物样品 Cu、Zn 元素含量低于 TECs 值且没有样品高于 PECs 值; 67.6%、78.4%、

表 4 潜在生态风险评估指标及等级划分
Table 4 Potential ecological risk assessment indicators and classification

E_i	污染程度	RI	调整后 RI	危害级别
<40	轻微生态危害	<150	<110	轻微生态危害
40~80	中等生态危害	150~300	110~220	中等生态危害
80~160	较强生态危害	300~600	220~440	强生态危害
160~320	强生态危害	≥ 600	≥ 440	极强生态危害
≥ 320	极强生态危害			

表 5 研究区沉积物重金属含量特征
Table 5 Characteristics of heavy metal content in sediments in the study area

元素	Cd	Cu	Ni	Pb	Cr	Zn	As	Hg
平均值	2.11	34.66	32.05	35.54	74.58	141.08	24.04	0.22
最小值	0.15	15.70	14.70	18.80	43.70	49.90	6.51	0.07
最大值	8.17	67.60	54.10	81.80	101.00	279.00	89.00	0.70
标准偏差	1.97	12.02	8.74	14.06	14.39	52.23	18.30	0.13
变异系数	0.93	0.35	0.27	0.40	0.19	0.37	0.76	0.59
全国水系沉积物背景值	0.109	20.03	21.95	21.93	54.04	65.01	7.98	0.067
洞庭湖水系沉积物背景值	0.33	20.2	21.2	23.3	44	83.3	12.9	0.047

注: 各元素含量单位均为mg/kg, 全国水系沉积物背景值详见史长义等(2016); 洞庭湖水系沉积物背景值详见李芬芳等(2017)。

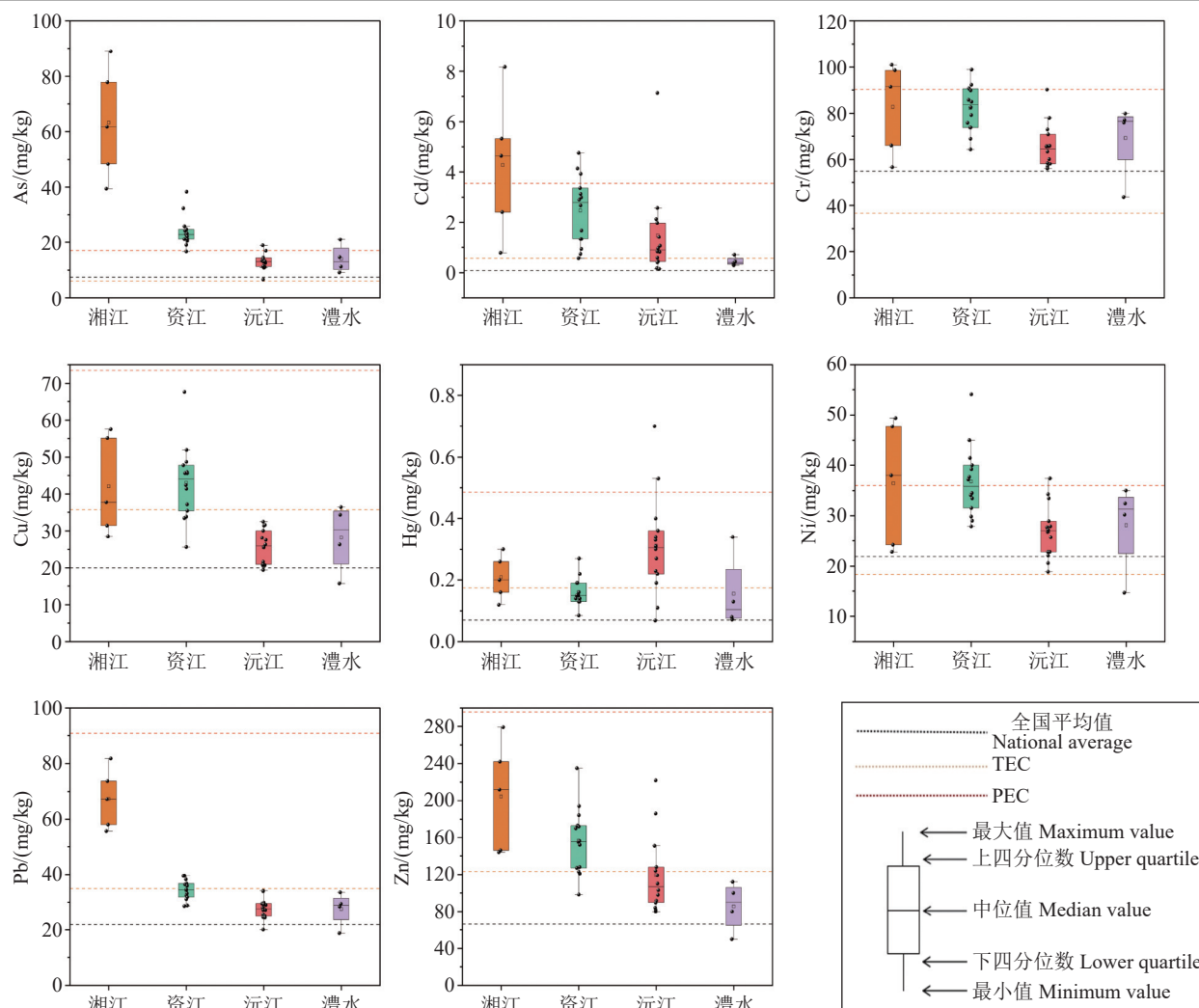


图2 洞庭湖区四水流域沉积物重金属元素含量分布图
Fig.2 Distribution of heavy metal elements in sediments of the Sishui Basin in Dongting Lake area

45.9%的沉积物样品 Ni、Cr、As 元素含量介于 TECs 和 PECs 之间, 且 32.4%、21.6%、54.1% 的样品高于 PECs 值; 24.3%、45.9% 的沉积物样品 Cd、Hg 含量低于 TECs 值, 而 18.9%、5.4% 的样品高于 PECs 值, 说明其分布很不均衡。总体而言, Cd、Ni、Cr、As 和 Hg 元素的潜在生物效应较大(图3)。

根据水系沉积物全国背景值、TECs 值和 PECs 值, 对洞庭湖区四水流域重金属含量进行分级(图3), 同时结合空间分布图(图4)可以直观显示出各流域重金属含量及生态风险空间分布特征。洞庭湖区中资江和湘江汇集附近的各沉积物内重金属含量均较高, Cr、Cu、Zn、Pb 分布特征较为相似, 主要污染样品存在于湘江附近, 而 Ni、As、Cd 分布

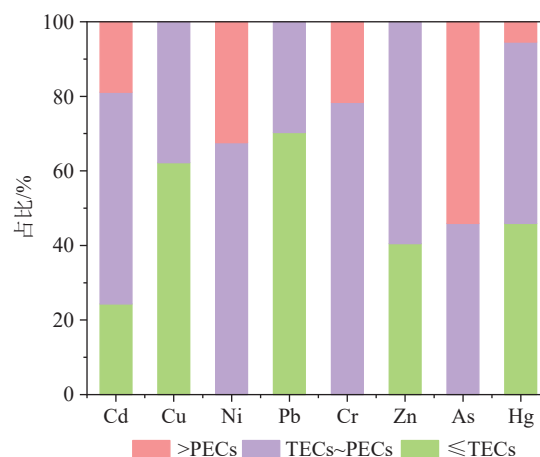


图3 洞庭湖区四水沉积物重金属元素分级比例
Fig.3 Classification proportion of heavy metal elements in four-water sediments in Dongting Lake area

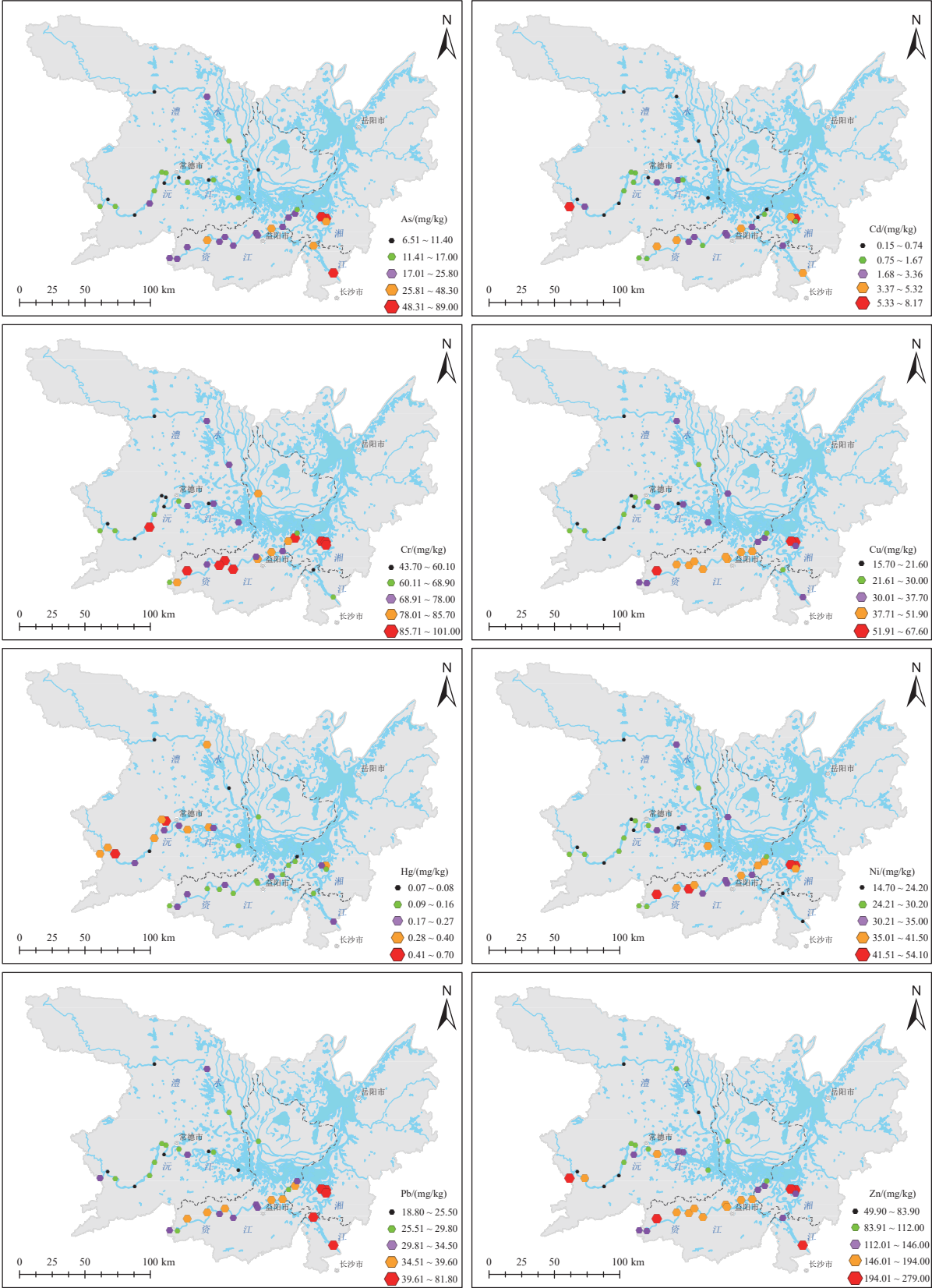


图 4 洞庭湖区沉积物重金属元素含量空间分布
Fig.4 Spatial distribution of heavy metal elements in sediments in Dongting Lake area

特征较为相似,高值区在资江与湘江均有分布,Hg 的峰值区域主要分布在沅江流域内。

通过统计分析,洞庭湖区沉积物 mPECQ 值介于 0.34~1.0 的样品点有 33 个,占比达 89.1%,可以视为存在毒性的概率较高,毒性发生率为 65%~70%;mPECQ 值介于 0.1~0.34 间的样点只有 1 个,占比为 2.7%,具有较低的生态风险;mPECQ 值大于 1.0 的样点有 3 个,占比 8.1%,可以视为具有较高的风险(图 5)。

3.3 沉积物潜在生态风险评价

潜在生态风险评价结果显示,研究区表层沉积物重金属潜在生态风险评价主要是由 Cd 和 Hg 引起(图 6),两者贡献率分别为 75.1% 和 17.2%(图 6),且 Cd 和 Hg 的单元素生态风险指数均值大于 130,有较强生态风险,其余元素均低于 40,为较低的生态风险。

研究区表层沉积物 8 种重金属的综合潜在生态风险指数平均值为 774.19,具有极强生态风险,其主要为 Cd 元素贡献,其单元素生态风险指数达 581.7, Cd 在毒性系数小于 Hg 的情况下,对综合潜在生态风险贡献程度反而高于 Hg 元素。根据图 7 可以看出, RI>440 的重度生态风险区主要位于资江流域和湘江流域,且沅江流域也有

分布。

3.4 来源解析

以洞庭湖为核心,向东、南、西三面由内向外依次分布着冲积平原、湖积平原、滨湖阶地、环湖低丘,洞庭盆地是指除了大堤围限的洞庭湖外,还包括其外围的垸田、洪道以及盆地周缘滨湖台地组成的低平区域,由河湖冲积物长期堆积而成,具有地表平坦,海拔多在 50 m 以下,地面坡度小于 5°等特征,根据地表形态和物质组成,洞庭湖区平原地貌可分为江河冲积平原、滨湖冲积平原、溪谷冲积平原和洞庭湖盆 4 类。“四水”作为洞庭湖最主要的入湖河流,也是中国著名的有色金属矿产聚集区,而大规模、高强度的开采利用,诱发最突出的环境问题就是重金属污染,使得洞庭湖成为典型的、受工矿活动严重影响的内陆湖泊(Peng et al., 2011; 彭渤等, 2011)。此外,各入湖流域因农业活动所造成的非点源污染,均对湖区沉积物重金属产生重要影响(谢意南等, 2017)。综合“四水”流域地质背景及人类活动特征,本研究将湖区沉积物重金属的潜在来源限定为农业源、大气沉降源、自然源和金属冶炼排放源。

运用 PMF 5.0 软件进行源解析,设定因子数为 3~5,运行速度为 20 次,结果表明当因子数为 4 时,

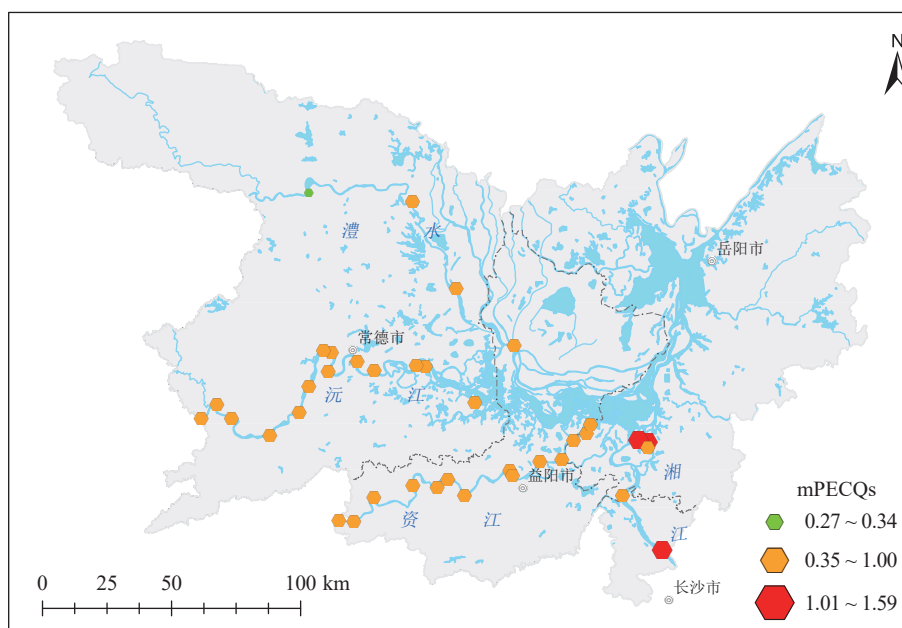


图 5 洞庭湖区沉积物平均可能效应浓度商值(mPECQs)空间分布

Fig.5 Spatial distribution of mean possible effect concentration quotient (mPECQs) in sediments in Dongting Lake area

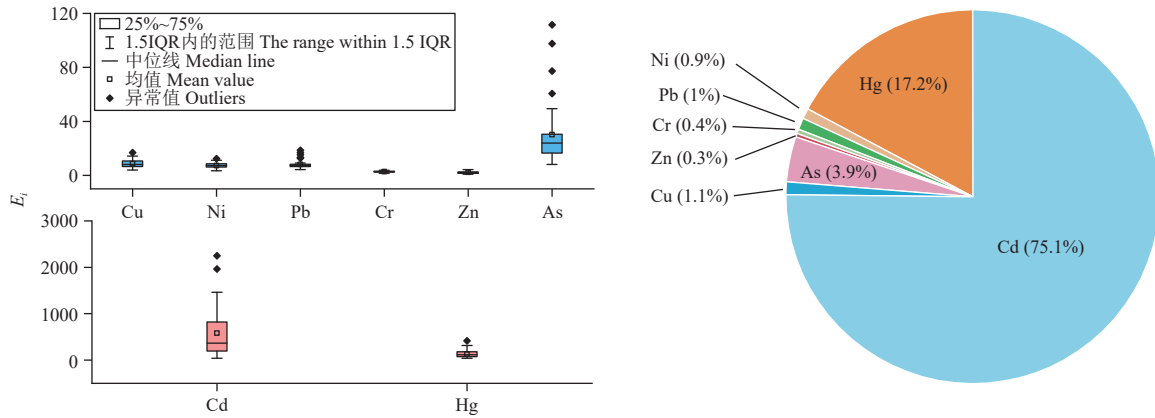


图 6 沉积物重金属生态风险评价结果及单元素贡献率

Fig.6 Ecological risk assessment results of sediment heavy metals and contribution rate of single element

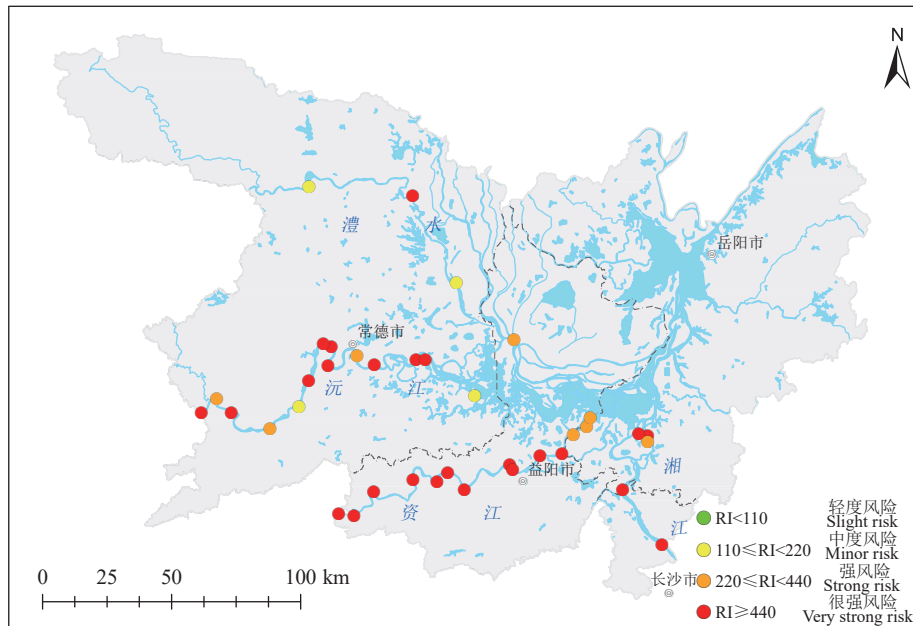


图 7 洞庭湖区表层沉积物生态风险指数分布

Fig.7 Distribution of ecological risk index of surface sediments in Dongting Lake area

其 Q 值较低,同时其实测值与 PMF 模型预测值拟合度最高,其结果最为稳定。拟合值显示,除 Cu 元素拟合系数(R^2)为 0.8,其余 R^2 均在 0.8 以上,因此,此模型可以解释原始数据所包含的信息(吴松泽等, 2022)。PMF 解析所得沉积物中重金属来源及其贡献率见图 8。

因子 1 解释了 42.7% 的重金属来源,其中 Cr、Cu、Pb、Zn 在因子 1 具有较高占比,根据以往研究表明,其通常作为农业污染源的禽畜粪便的指示物。而资江流域 Cu 和 Zn 的累积与农业活动有较大的关系(王成龙等, 2016),为提高饲料利用率,适

量添加 Cu 和 Zn 等微量元素(王飞等, 2015),从重金属空间分布(图 4)发现 Cr 在资江流域沿途有明显富集,因资江流域沿岸农业发达,牲畜排泄物作为有机肥施用到土壤中时会增加 Cr 的富集(夏文建等, 2021),而有机肥料中普遍存在较多 Pb 元素(杨帆等, 2021)。因此,可判识因子 1 是农业源。

因子 2 解释了 16.1% 的重金属来源,其中 Hg 元素占有较高权重,其他元素对因子 2 几乎无影响。研究发现大气沉降是影响 Hg 元素富集的一个重要因素(Gan et al., 2019),由于 Hg 的高度挥发性使得它很容易通过大气沉积迁移到表层土壤中而

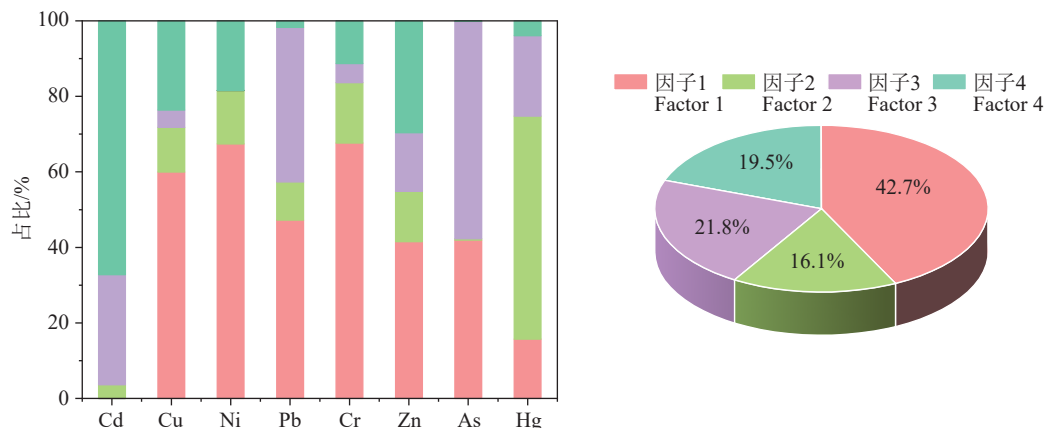


图 8 沉积物 PMF 模型因子贡献率
Fig.8 Factor contribution spectrum of sediment PMF model

产生富集(Lv, 2019)。从其空间分布(图 4)可以发现 Hg 元素在沅江流域富集明显,临近常德市区,交通发达,车辆密集,分布着大型火车站、汽车站等流通枢纽,其排放的 Hg 气体通过大气沉降的方式扩散。前人研究发现,车辆尾气中的重金属颗粒可能参与粉尘沉积(Ozcan et al., 2007),并且粉尘沉积增加了其重金属浓度(Hu et al., 2019),因此推测因子 2 为大气沉降源。Hg 元素生态风险强,未来应对洞庭湖区沉积物中 Hg 的形态、分布及生物地球化学过程开展研究。

因子 3 解释了 21.8% 的重金属来源,其中以 As 为代表性元素,同时 Pb、Cd 也具有一定的载荷,对照统计结果来看,这 3 个元素的平均值都高于全国水系背景值。Yalcin et al.(2008)发现这些元素主要受地质背景控制,可能是源区附近表生作用下基岩风化后随水体进入湖泊河流中沉积形成,因此推测因子 3 为自然源。

因子 4 解释了 19.5% 的重金属来源,其中 Cd 为代表性元素,其变异系数高达 0.93,空间变异性极强,空间分布特征极不均匀。通过对比其空间分布(图 4)可以发现,其元素峰值主要位于湘江流域,研究表明,工矿企业的“三废”排放对土壤 Cd 累积有重要影响(赵靛等, 2020)。Yang et al.(2019)研究也发现土壤 Cd 主要来自于工业排放。湘江上游具有较多有色金属冶炼厂,在煅烧、冶炼过程中产生大量废气,通过扩散沉降和污水排放等进入流域中。因此, Cd 的富集可能与工业活动有关,可判识因子 4 为金属冶炼排放源。

3.5 沉积物重金属形态特征

为了探究大量元素及理化性质对 Cd、As 等重金属含量的控制,本研究选取 Fe_2O_3 、 MgO 、 CaO 、 Al_2O_3 、 SiO_2 、Mn、C 和 pH 共 8 个氧化物指标及理化性质进行分析,结果如图 9 所示,可以看出,第 1 排序轴和第 2 排序轴的解解释率分别为 72.01% 和 17.03%,由此可知前两轴能够很好地反映沉积物重金属与理化性质间的关系,且主要由第一轴决定。 Fe_2O_3 、Mn 箭头最长(图 9),可知其对洞庭湖区沉积物内重金属特征含量起到了一个很好的解释作用。As 与 Fe_2O_3 、Mn、 Al_2O_3 呈显著正相关关系; Cd 与 Mn 呈显著正相关; Cr 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、Mn 呈显著正相关,与 SiO_2 、pH 呈显著负相关; Cu 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、Mn 呈显著正相关,与 SiO_2 、pH 呈显著负相关; Ni 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、Mn 呈显著正相关,与 SiO_2 呈显著负相关; Pb 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 呈正相关,与 Mn 呈显著正相关,与 SiO_2 呈负相关; Zn 与 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 呈正相关,与 Mn 呈显著正相关,与 CaO 、 SiO_2 、pH 呈负相关(图 9)。通过冗余分析(RDA)结果及相关性可以看出,土壤理化性质的重要排序为: $\text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Mn} > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{C} > \text{pH} > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{SiO}_2$, 其解释度分别为 35.9%、20%、4.3%、3.5%、2.6%、1.4%、1.4%、0.9%,可以探究出湖区沉积物重金属主要以铁锰结合态为主。在环境中,重金属的形态分布受到许多因素的影响,其中铁和锰的氧化物是重要的影响因素之一,铁和锰的氧化物具有强大的吸附能力,可以与重金属离子形成稳定的结合态,从而改变重金

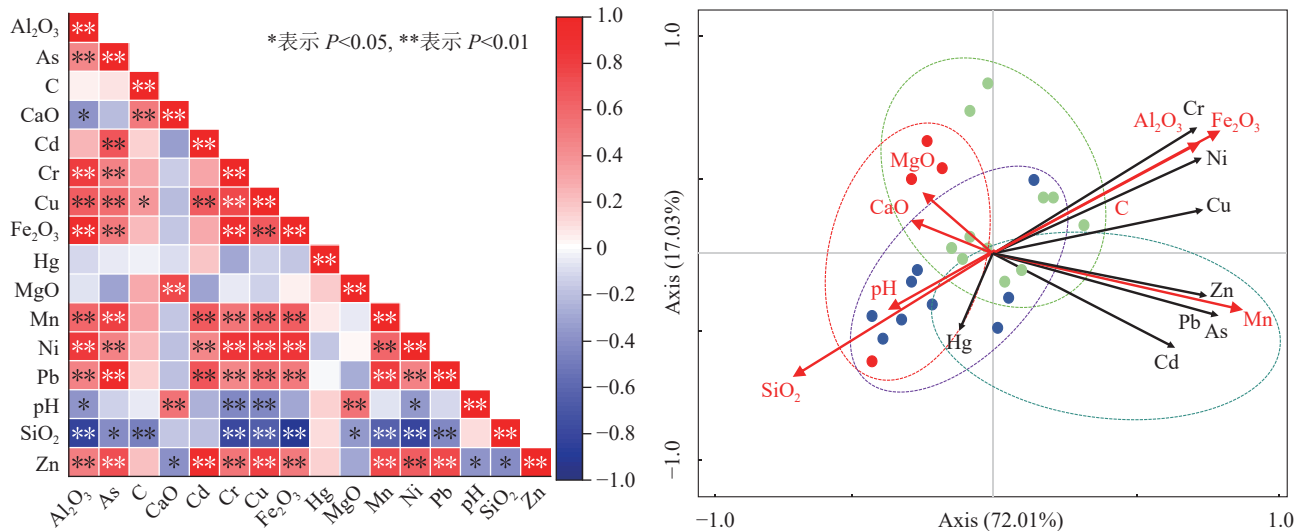


图 9 重金属与理化性质指标 RDA 排序图及相关性

Fig.9 RDA ranking diagram and correlation between heavy metals and physicochemical properties

属的形态分布,而铁锰结合态是各类重金属主要形态,这是因为铁和锰的氧化物在环境中广泛存在,它们具有较强的吸附能力和稳定性,能够与重金属离子形成稳定的络合物(Tessier et al., 1979)。这些络合物可以降低重金属的生物可利用性和毒性,从而影响重金属在环境中的迁移、转化和生态风险。Koelmans et al.(1992)研究了新西兰 Volkerek 湖沉积物和悬浮物对 Cd 的吸附状况,指出 Cd 被沉积物吸附全靠沉积物中的两种地球化学相,即铁锰氧化物和有机物。其中铁氧化物主要包括赤铁矿、磁铁矿、褐铁矿等,它们具有较大的比表面积和丰富的表面活性位点,可以有效地吸附重金属离子。铁氧化物对重金属的吸附能力与其表面性质、晶体结构和环境条件有关,一般来说,铁氧化物对重金属的吸附能力较强,可以使重金属以铁结合态的形式存在(姜智超, 2023)。锰氧化物主要包括软锰矿、硬锰矿、水锰矿等,它们同样具有较大的比表面积和丰富的表面活性位点,可以有效地吸附重金属离子。锰氧化物对重金属的吸附能力与其表面性质、晶体结构和环境条件有关,一般来说,锰氧化物对重金属的吸附能力较强,可以使重金属以锰结合态的形式存在(邓旭东, 2023)。铁和锰的氧化物对重金属形态分布的影响主要体现在它们可以与重金属离子形成稳定的结合态,从而使重金属以铁锰结合态为主,这种结

合态的形成有助于降低重金属的生物有效性和毒性,减轻其对环境和生态系统的危害,在以后的污染治理中,可以利用铁和锰的氧化物特性,实现重金属的有效控制和治理。但在某些条件下,铁锰结合态的重金属也可能被释放出来,导致环境污染和生态风险(郭娟, 2011)。

4 结论

(1)根据沉积物质量指南来看,研究区水系沉积物中重金属元素空间分布不均匀,资江和湘江汇集附近的各沉积物内重金属含量均较高,Cr、Cu、Zn、Pb 主要污染样品存在于湘江附近,Ni、As、Cd 高值区在资江与湘江均有分布,Hg 的峰值区域主要分布在沅江流域内。Cd、Ni、Cr、As 和 Hg 元素的潜在生物危害效应较大。

(2)洞庭湖区表层沉积物潜在生态风险整体处于极强水平,Cd 对生态风险指数的贡献显著大于其余参评元素,Hg 元素次之。

(3)结合 PMF 模型,确定了研究区沉积物重金属主要来源于农业源(42.7%)、大气沉降源(16.1%)、自然源(21.8%)和金属冶炼排放源(19.5%)。

(4)根据 RDA 和相关分析,说明湖区沉积物 Cd 等重金属含量主要受控于 Fe、Mn 氧化物,在今后的环境修复和污染治理中,可以利用铁和锰的氧化物特性,实现重金属污染的有效控制和治理。

References

- Chen Chunxiao, Jiang Xia, Zheng Binghui, Zhao Zheng, Zhan Yuzhu. 2013. Heavy metals in sediment of Lake Taihu's Zhushan Bay: Chemical speciation and risk evaluation[J]. *Environmental Science Technology*, 36(6): 177–182 (in Chinese with English abstract).
- Chen H Z, Wang J G, Chen J M. 2016. Assessment of heavy metal contamination in the surface sediments: A reexamination into the offshore environment in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 113: 132–140.
- Deng Xudong. 2023. Study on the Effect and Mechanism of Manganese Modified Biochar and Iron Manganese Oxide On Heavy Metal Contaminated Sediment Remediation[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 1–76 (in Chinese with English abstract).
- Fang Xiaohong, Peng Bo, Song Zhaoliang, Tan Changyin, Wan Dajuan, Wang Xin, Yan Chuanyun, Xie Yiting, Tu Xianglin. 2019. Heavy metal contamination in bed sediments from the four inlets of Xiangjiang, Zijiang, Yuanjiang, and Lishui rivers to Dongting Lake, China[J]. *Geochimica*, 48(4): 378–394 (in Chinese with English abstract).
- Fang Xiaohong, Peng Bo, Zhang Kun, Yang Zixuan, Xiao Yao, Xie Weicheng, Yan Chuanyun, Xie Yiting, Tan Changyin, Wan Dajuan, Wang Xin. 2018. Geochemical study on evolution of heavy-metal contamination developed in bed sediments from the Yuanjiang River inlet to Dongting Lake, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 38(7): 2586–2598 (in Chinese with English abstract).
- Fang Xiaohong, Peng Bo, Zhang Kun, Zeng Dengzhi, Kuang Xiaoliang, Wu Beijuan, Tan Changyin, Wang Xin. 2016. Heavy metal contamination of bed sediments in inlet area of the lowermost Yuanjiang River, Hunan province of China[J]. *Geographical Research*, 35(10): 1887–1898 (in Chinese with English abstract).
- Farkas A, Erratico C, Vigano L. 2007. Assessment of the environmental significance of heavy metal pollution in surficial sediments of the River Po[J]. *Chemosphere*, 68(4): 761–768.
- Gan Y, Huang X, Li S, Liu N, Li Y C, Freidenreich A, Wang W, Wang R, Dai J. 2019. Source quantification and potential risk of mercury, cadmium, arsenic, lead, and chromium in farmland soils of Yellow River Delta[J]. *Journal of Cleaner Production*, 221: 98–107.
- Guo Juan. 2011. Experimental Study on Heavy Metals Adsorption or Release from Sediments of East Dongting Lake[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 1–76 (in Chinese with English abstract).
- Hakanson L. 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control asediment logical apprach[J]. *Waster Research*, 14(8): 975–986.
- Hu R, Zhou X, Wang Y, Fang Y. 2019. Survey of atmospheric heavy metal deposition in Suqian using moss contamination[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 26(7): 1–15.
- Jiang Zhichao. 2023. Spatial Distribution Characteristics and Migration Simulation of Heavy Metals in Non-ferrous Smelting Site and the Surrounding Soils[D]. Changsha: South University, 1–197 (in Chinese with English abstract).
- Jin D R, Lee C H, Kim C K, Moon S D, Huh I A, Kim S, Park M S, Lee J H. 2022. Development and validation of freshwater sediment quality assessment guidelines for trace elements in Korea[J]. *Environmental Engineering Research*, 27(4): 200643.
- Koelmans A A, Luklema L. 1992. Sorption of 1, 2, 3, 4-tetrachlorobenzene and cadmium to sediments and suspended solids in Lake Volkerak/Zoom[J]. *Water Research*, 26(3): 327–337.
- Li F, Huang J, Zeng G, Yuan X, Li X, Liang, J, Wang X, Tang X, Bai B. 2013. Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the dongting lake, middle China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 132: 75–83.
- Li Fenfang, Li Liqiang, Fu Zhe, Yin Yuying, Liu Yan. 2017. Pollution characteristics and ecological risk of heavy metals in the surface sediments of the inlets of Dongting Lake, China[J]. *Geochimica*, 46(6): 580–589 (in Chinese with English abstract).
- Li He, Wang Shuhang, Che Feifei, Jiang Xia, Niu Yong. 2023. Mate analysis of heavy metal pollution in sediments of Chaohu Lake, Dongting Lake and Poyang Lake[J]. *China Environment Science*, 43(2): 831–842 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunlei, Cao Shengwei, Li Yasong, Zhang Yuanjing, Li Jianfeng, Li Jing, Hong Bingyi. 2023. Distribution and sources of heavy metals in bottom sediments of the Xiamen Bay, Fujian Province and its effects on ecological environment[J]. *Geology in China*, 52(1): 232–245 (in Chinese with English abstract).
- Lv J S. 2019. Multivariate receptor models and robust geostatistics to estimate source apportionment of heavy metals in soils[J]. *Environmental Pollution*, 244: 72–83.
- Macdonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. 2000. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 39(1): 20–31.
- Ozcan H K, Demir G, Nemlioglu S. 2007. Heavy metal concentrations of atmospheric ambient deposition dust in Istanbul–Bosphorus Bridge tollhouses[J]. *Journal of Residuals Science & Technology*, 4(1): 55–59.
- Paatero P. 1997. Least squares formulation of robust non-negative factor analysis[J]. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 37(1): 23–35.
- Peng B, Tang X, Yu C, Tu X. 2011. Geochemistry of trace metals and Pb isotopes of sediments from the lowermost Xiangjiang River, Hunan Province (P. R. China): Implications on sources of trace metals[J]. *Environmental Earth Sciences*, 64(5): 1455–1473.
- Peng Bo, Tang Xiaoyan, Yu Changxun, Tan Changyin, Tu Xianglin, Liu Qian, Yang Kesu, Xiao Min, Xu Jingzhe. 2011. Heavy metal contamination of inlet sediments of the Xiangjiang River and Pb isotopic geochemical implication[J]. *Acta Geologica Sinica*, 85(2): 232–245 (in Chinese with English abstract).

- 282–299 (in Chinese with English abstract).
- Qian Y, Zheng M H, Gao L R, Zhang B, Liu W B, Jiao W H, Xiao K. 2005. Heavy metal contamination and its environmental risk assessment in surface sediments from Lake Dongting, People's Republic of China[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 75(1): 204–210.
- Shi Changyi, Liang Meng, Feng Bin. 2016. Average background values of 39 chemical elements in stream sediments of China[J]. *Earth Science*, 41(2): 234–251 (in Chinese with English abstract).
- Sun Kuokai, Hou Qingye, Yang Zhongfang, Yu Tao, Wang Jiaxin. 2023. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in river sediments of the Pearl River delta[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 44(1): 175–184 (in Chinese with English abstract).
- Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. 1979. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 51(7): 844–851.
- Tong Ting. 2005. Element concentrations in river delta sediments and mineral resources potential in the drainage basin: A case study in the Xiangjiang, Zishui Yuanjiang, and Lishui Rivers basins[J]. *Quaternary Sciences*, 25(3): 298–305 (in Chinese with English abstract).
- Wang Chenglong, Zou Xinqing, Zhao Yifei, Li Baojie. 2016. Source apportionment and ecological risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface water from Yangtze River, China: Based on PMF Model[J]. *Environmental Science*, 37(10): 3789–3797 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fei, Qiu Ling, Shen Yujun, Ge Yihong, Hou Yueqing. 2015. Investigation and analysis of heavy metal contents from livestock feed and manure in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(5): 261–267 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xin, Qiao Shuqing, Gao Jingjing, Zhu Aimei, Bu Wenrui, Guo Jingtian. 2013. Distribution patterns of heavy metals in surface sediments and environmental quality assessment on the adjacent sea area of Xiaomai Island[J]. *Marine Science Bulletin*, 32(3): 287–295 (in Chinese with English abstract).
- Wu Songze, Wang Dongyan, Li Wenbo, Wang Xingjia, Yan Zhuoran. 2022. Risk zoning of heavy metals in a peri-urban area in the black soil farmland based on agricultural products[J]. *Environmental Science*, 43(1): 454–462 (in Chinese with English abstract).
- Xia Wenjian, Zhang Lifang, Liu Zengbing, Zhang Wenxue, Lan Xianjin, Liu Xiumei, Liu Jia, Liu Guangrong, Li Zuzhang, Wang Ping. 2021. Effects of long-term application of chemical fertilizers and organic fertilizers on heavy metals and their availability in reddish paddy soil[J]. *Environmental Science*, 42(5): 2469–2479 (in Chinese with English abstract).
- Xie Yinan, Ouyang Meifeng, Huang Daizhong, Ou Fuping, Tian Qi, Zhang Yi, Liu Yan. 2017. Pollution characteristics, sources and ecological risk of heavy metals in sediments from dongting lake and its lake inlets[J]. *Environmental Chemistry*, 36(10): 2253–2264.
- Yalcin M G, Ilhan S. 2008. Multivariate analyses to determine the origin of potentially harmful heavy metals in beach and dune sediments from Kizkalesi Coast (Mersin), Turkey[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 81(1): 57–68.
- Yang Fan, Luo Hongxue, Zhong Yanxia, Wang Youqi, Bai Yiru. 2021. Spatial distribution characteristics, source apportionment, and risk assessment of topsoil PAHs in the core area of the Ningdong energy and chemical industry base[J]. *Environmental Science*, 42(5): 2490–2501 (in Chinese with English abstract).
- Yang S Y, He M J, Zhi Y Y, Chang S X, Gu B J, Liu X M, Xu J M. 2019. An integrated analysis on source-exposure risk of heavy metals in agricultural soils near intense electronic waste recycling activities[J]. *Environment international*, 133: 105239.
- Yu G B, Liu Y, Yu S, Wu S C, Leung A O W, Luo X S, Xu B, Li H B, Wong M H. 2011. Inconsistency and comprehensiveness of risk assessments for heavy metals in urban surface sediments[J]. *Chemosphere*, 85(6): 1080–1087.
- Zhang Guanggui. 2015. Pollution characteristics, sources and ecological risk of heavy metals in surface sediments from Dongting Lake[J]. *Environmental Monitoring in China*, 31(6): 58–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H, Jiang Y, Ding M, Xie Z. 2017. Level, source identification, and risk analysis of heavy metal in surface sediments from river-lake ecosystems in the Poyang Lake, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(27): 21902–21916.
- Zhao Liang, Liang Yunping, Chen Qian, Xu Qian, Jing Hongwei. 2020. Spatial distribution, contamination assessment, and sources of heavy metals in the urban green space soils of a city in North China[J]. *Environmental Science*, 41(12): 5552–5561 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yunlong, Jiang Jiahu, Sun Zhandong, Huang Qun, Wang Hongjuan, Zhou Yunkai. 2008. Character and assessment of heavy metals in the sediments from Lake Dongting[J]. *Lake Science*, 20(4): 477–485 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈春霄, 姜霞, 郑丙辉, 赵铮, 战玉柱. 2013. 太湖竺山湾沉积物重金属形态分析及风险评价[J]. *环境科学与技术*, 36(6): 177–182.
- 邓旭东. 2023. 锰改性生物炭与铁锰氧化物对重金属污染沉积物修复效果与机理探究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 1–76.
- 方小红, 彭渤, 宋照亮, 谭长银, 王大娟, 王欣, 颜川云, 谢依婷, 涂湘林. 2019. 洞庭湖“四水”入湖河床沉积物重金属污染特征[J]. *地球化学*, 48(4): 378–394.
- 方小红, 彭渤, 张坤, 杨梓璇, 肖瑶, 谢伟城, 颜川云, 谢依婷, 谭长银, 王大娟, 王欣. 2018. 沅江入湖河床沉积物重金属污染演化地球化学分析[J]. *环境科学学报*, 38(7): 2586–2598.
- 方小红, 彭渤, 张坤, 曾等志, 匡晓亮, 吴蓓娟, 谭长银, 王欣. 2016. 沅江下游入湖段河床沉积物重金属污染特征[J]. *地理研究*, 35(10):

- 1887–1898.
- 郭娟. 2011. 东洞庭湖沉积物中重金属吸附与释放规律研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 1–76.
- 姜智超. 2023. 有色冶炼场地及周边土壤重金属空间分布特征与迁移模拟[D]. 长沙: 中南大学, 1–197.
- 李芬芳, 李利强, 符哲, 尹宇莹, 刘妍. 2017. 洞庭湖水系入湖口表层沉积物中重金属的污染特征与生态风险[J]. [地球化学](#), 46(6): 580–589.
- 李贺, 王书航, 车霏霏, 姜霞, 牛勇. 2023. 巢湖、洞庭湖、鄱阳湖沉积物重金属污染及来源的 Meta 分析[J]. [中国环境科学](#), 43(2): 831–842.
- 刘春雷, 曹胜伟, 李亚松, 张媛静, 李剑锋, 李静, 洪炳义. 2023. 福建厦门湾底质沉积物重金属分布特征、来源及其对生态环境的影响[J]. [中国地质](#), 52(1): 232–245.
- 彭渤, 唐晓燕, 余昌训, 谭长银, 涂湘林, 刘茜, 杨克苏, 肖敏, 徐婧喆. 2011. 湘江入湖河段沉积物重金属污染及其 Pb 同位素地球化学示踪[J]. [地质学报](#), 85(2): 282–299.
- 史长义, 梁萌, 冯斌. 2016. 中国水系沉积物 39 种元素系列背景值[J]. [地球科学](#), 41(2): 234–251.
- 孙阔凯, 侯青叶, 杨忠芳, 余涛, 王佳鑫. 2025. 珠江三角洲水系沉积物重金属元素分布特征及风险评价[J]. [生态学杂志](#), 44(1): 175–184.
- 童霆. 2005. 河口三角洲元素含量与矿产资源——以湘资沅澧为例[J]. [第四纪研究](#), 25(3): 298–305.
- 王成龙, 邹欣庆, 赵一飞, 李宝杰. 2016. 基于 PMF 模型的长江流域水体中多环芳烃来源解析及生态风险评价[J]. [环境科学](#), 37(10): 3789–3797.
- 王飞, 邱凌, 沈玉君, 葛一洪, 侯月卿. 2015. 华北地区饲料和畜禽粪便中重金属质量分数调查分析[J]. [农业工程学报](#), 31(5): 261–267.
- 王昕, 乔淑卿, 高晶晶, 朱爱美, 卜文瑞, 郭敬天. 2013. 小麦岛附近海域表层沉积物重金属分布特征及环境评价[J]. [海洋通报](#), 32(3): 287–295.
- 吴松泽, 王冬艳, 李文博, 王兴佳, 闫卓冉. 2022. 农产品视角的城郊黑土地农田重金属风险分区[J]. [环境科学](#), 43(1): 454–462.
- 夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍. 2021. 长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响[J]. [环境科学](#), 42(5): 2469–2479.
- 谢意南, 欧阳美凤, 黄代中, 欧伏平, 田琪, 张屹, 刘妍. 2017. 洞庭湖及其入湖口沉积物中重金属的污染特征、来源与生态风险[J]. [环境化学](#), 36(10): 2253–2264.
- 杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹. 2021. 宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价[J]. [环境科学](#), 42(5): 2490–2501.
- 张光贵. 2015. 洞庭湖表层沉积物中重金属污染特征、来源与生态风险[J]. [中国环境监测](#), 31(6): 58–64.
- 赵靓, 梁云平, 陈倩, 徐谦, 荆红卫. 2020. 中国北方某市城市绿地土壤重金属空间分布特征、污染评价及来源解析[J]. [环境科学](#), 41(12): 5552–5561.
- 祝云龙, 姜加虎, 孙占东, 黄群, 王红娟, 周云凯. 2008. 洞庭湖沉积物中重金属污染特征与评价[J]. [湖泊科学](#), 31(4): 477–485.