

张贺玉,张 静,卢少勇,等.哈素海表层沉积物重金属时空分布特征、生态风险评价及来源解析 [J]. 中国环境科学, 2025,45(2):991-1003.

Zhang H Y, Zhang J, Lu S Y, et al. Spatial and temporal distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of Hasuhai Lake [J]. China Environmental Science, 2025,45(2):991-1003.

哈素海表层沉积物重金属时空分布特征、生态风险评价及来源解析

张贺玉¹,张 静¹,卢少勇^{1*},韩镇阳¹,石祖秦¹,张荣社² (1.中国环境科学研究院,湖泊水污染治理与生态修复技术国家工程实验室,北京 100012; 2.浙江工业职业技术学院,浙江 绍兴 312099)

摘要: 选取哈素海为研究对象,分别于2023年4月(枯水期)、2023年7月(丰水期)和2023年9月(平水期)各采集19个采样点的表层沉积物样品并测定了7种重金属(As、Cr、Cd、Cu、Pb、Zn和Hg)的含量(除Cr以外的重金属均检出),分析其污染及空间分布特征.采用地累积指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法(RI)对6种重金属污染程度和潜在生态风险进行了评估,并结合相关性分析(CA)、主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分解(PMF)模型解析了表层沉积物重金属的来源及相对贡献.结果表明,枯水期和丰水期6种重金属含量的平均值均超过内蒙古水系沉积物背景值,平水期除As以外的5种重金属含量的平均值均超过内蒙古水系沉积物背景值,其中Cd和Hg含量的平均值在3个水期均超过中国水系沉积物背景值;空间上,各水期表层沉积物重金属含量分布存在明显差异,枯水期重金属含量高值集中在湖区东西部,丰水期主要集中在湖区南北部,平水期则主要集中在湖区中部;地累积指数法结果和潜在生态风险指数法结果均表明Cd和Hg是造成3个水期生态风险的主要重金属元素,各水期RI均值分别为590.42、503.73和570.07,整体表现为强潜在生态风险水平,Cd和Hg在3个水期对RI值的贡献率之和均超过了90%;表层沉积物重金属的主要来源为农业生产活动和交通运输、工业活动、自然源和采矿活动,相对贡献率分别为32.5%、22.7%、20.1%和24.7%.

关键词: 表层沉积物; 重金属; 时空分布; 潜在生态风险; 来源解析

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)02-0991-13

Spatial and temporal distribution characteristics, ecological risk assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of Hasuhai Lake. ZHANG He-yu¹, ZHANG Jing¹, LU Shao-yong^{1*}, HAN Zhen-yang¹, SHI Zu-qin¹, ZHANG Rong-she² (1.National Engineering Laboratory for Lake Pollution Control and Ecological Restoration, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2.Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312099, China). *China Environmental Science*, 2025,45(2): 991-1003

Abstract: Hasuhai Lake was selected as the research object, where surface sediment samples were collected from 19 sampling points during three water periods: April 2023 (dry season), July 2023 (wet season), and September 2023 (normal season). The concentrations of seven heavy metals (As, Cr, Cd, Cu, Pb, Zn, and Hg) were determined, with all metals except Cr being detected. Subsequently, their pollution levels and spatial distribution characteristics were analyzed. The geo-accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (RI) were used to assess the potential ecological risks of six heavy metals, respectively. The correlation analysis (CA), principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) models were utilized to analyze the sources and relative contributions of heavy metals in surface sediments. The results indicated that the average contents of six heavy metals in both dry and wet season exceeded the background values of Inner Mongolia stream sediments, and the average contents of five heavy metals except As in normal season exceeded the background values of Inner Mongolia stream sediments. The average contents of Cd and Hg exceeded the background values of Chinese stream sediments in the three water periods. Spatially, the distribution of heavy metals content in surface sediments of each water period is significantly different. The high value of heavy metals content in the dry season is concentrated in the east and west of the lake area, the wet season is mainly concentrated in the north and south of the lake area, and the normal season is mainly concentrated in the middle of the lake area. The results of the geo-accumulation index method and the potential ecological risk index method revealed that Cd and Hg were the main heavy metals elements causing ecological risks in the three water periods, and the mean values of RI in each water period were 590.42, 503.73 and 570.07 respectively, indicating a strong potential ecological risk. The sum of the contribution rates of Cd and Hg to RI values in the three water periods exceeded 90%. The main sources of heavy metals in surface sediments were identified as agricultural production

收稿日期: 2024-07-25

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFC3201505);科技基础性工作专项(2015FY110900)

* 责任作者, 研究员, lushy2000@163.com

activities and transportation (32.5%), industrial activities (22.7%), natural sources (20.1%), and mining activities (24.7%).

Key words: surface sediments; heavy metals; spatio-temporal distribution; potential ecological risk; source apportionment

近几十年来,由于快速的城市化、工业化、高度集约的农业化以及对湖泊的粗放式管理,湖泊生态系统中重金属含量呈上升趋势^[1].重金属是一类具有难降解、易生物富集和毒性强等特点的污染物,可通过皮肤接触、食物链等途径进入人体,富集在人体不同部位而造成严重危害,如致癌、致突变和致畸形等^[2].重金属可通过多种途径进入湖泊,被水体中的悬浮物吸附、积累和沉淀后在沉积物中富集^[3].已有研究发现,水生系统中约 99% 的重金属最终附着在沉积物中^[4],沉积物中重金属的含量通常是上覆水中的 4~5 倍^[5-6].沉积物是湖泊生态系统的重要组成部分,其为底栖生物和水生植物的生长提供了栖息地,同时也是湖泊生物群落营养物质的储存库.然而,当环境因素如氧化还原电位、pH 值、盐度和有机物含量发生变化时可能导致沉积物中重金属释放到上覆水体,引发二次污染,进而影响水质和生态平衡^[7-8].鉴于此,对湖泊沉积物重金属污染程度进行评价并溯源对深入了解湖泊生态系统的健康状态和制定有效的控污策略具有重要意义.

确定湖泊沉积物重金属的来源对于控制污染至关重要.当前众多学者利用因子分析(FA)、主成分分析(PCA)、聚类分析(CA)、化学质量平衡法(CMB)和正定矩阵因子分解(PMF)模型等方法解析重金属来源^[9].其中 PCA 是一种历史悠久且被广泛应用的污染物来源识别方法,它无需依赖难以获取的污染源调查数据,但只能定性识别主要污染物类别,无法对各污染源的具体贡献进行定量评估^[10].美国环境保护署(EPA)推荐的 PMF 模型在污染源解析领域具有显著优势,可以定性识别污染源类型并量化其对污染源的相对贡献,但单独使用该方法时,对污染源的定性分析过于依赖对以往数据的整理和筛选,使得 PMF 模型的分析结果具有一定的主观性^[11].若将 PCA 与 PMF 模型联合分析则可以有效提高污染物来源贡献的准确性,增强潜在源的识别能力,降低在源解析过程中不准确估计的风险^[12].匡荟芬等^[9]结合 PCA 和 PMF 模型探究鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属的主要来源,得

出 4 个污染源:矿业和工业活动、尾矿和废渣、农业活动和自然来源,贡献率分别为:38%、28%、19% 和 14%.而 Luo 等^[13]运用 PCA 和 PMF 模型两种方法识别陕西省沔河流域表层沉积物重金属的污染来源和贡献,PCA 法确定了 2 个污染源,PMF 模型识别了 4 个污染源,两种方法相结合提高了解析结果的可靠性.

哈素海作为呼和浩特市辖区唯一内陆湖,属大黑河水系的外流淡水湖泊,素有“塞外西湖”之称.近年来,随着环湖地区经济社会的发展和受全球气候变暖的影响,人类活动对哈素海的影响日渐加深,湖泊水面不断萎缩(从 1986 年的 18.74km² 减小至 2014 年的 14.90km²),芦苇和蒲草繁殖茂盛,湖泊底部泥沙淤积严重,沼泽化趋势明显,水体交换不畅,湖泊重金属含量不断上升,水质日趋恶化^[14].已有学者对哈素海表层沉积物重金属赋存展开了相关研究^[15],但针对不同水期沉积物重金属含量和重金属来源解析尚鲜有成果报道.本文选取哈素海表层沉积物为研究对象,分析了枯水期、丰水期和平水期 3 个不同水期 7 种重金属(As、Cr、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg)的空间分布特征,运用地累积指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法(RI)协同评估重金属潜在风险,结合相关性分析(CA)、主成分分析(PCA)和正定矩阵因子分解(PMF)模型解析重金属污染来源并量化其相对贡献率,以为哈素海表层沉积物重金属污染控制和治理提供理论参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

哈素海(40°34'N~40°38'N,110°56'E~111°1'E)位于内蒙古自治区呼和浩特市土默特左旗境内,大青山南麓洪积平原、黄河冲积平原和大黑河冲积平原的交接处^[16].湖区呈两头小、中间大的形态,正常蓄水位下库容为 4840 万 m³,水域面积 29.7km²,湖岸线长 24.1km,平均水深 1m.该湖泊北面为大青山,东、南、西三面被农田和牧场包围,周边鱼池总面积 8.36km²,同时兼有渔业、灌溉和旅游等多种功能.年平均气温为 6.5℃,多年平均降水量为 391.8mm(主要

集中在 6~9 月),年平均蒸发量为 1851.7mm,年平均风速为 2.0m/s,春季风多且大,最大风速为 36m/s^[17].其补给水源主要是黄河水(民生渠补水),占总补水量的 75.7%,其他补给水源包括美岱沟、万家沟等河流补给和地下水补给^[18].

1.2 样品采集与分析

参考《湖泊沉积物调查规范》^[19]并根据哈素海水域形态、面积和植物覆盖等实际情况共设计 19 个采样点(图 1),其中 H1~H15 共 15 个采样点位于湖边缘四周(H7 位于北侧入湖沟渠处,H9 位于西侧后河入湖沟渠处,H15 位于南侧黄河民生渠处),湖区分布较多芦苇等挺水植物,H16~H19 共 4 个采样点位于湖中心.分别于 2023 年 4 月(枯水期)、7 月(丰水期)和 9 月(平水期)进行 3 次采样,采样前利用手持 GPS 对各个预设采样点进行精准定位并记录坐标,利用彼得森采样器在每个采样点采集表层沉积物(0~10cm),样品密封在洁净的聚乙烯塑料袋中,置于冷藏箱内,在 6h 内运送至实验室,并保存在-20℃下以备进一步分析.

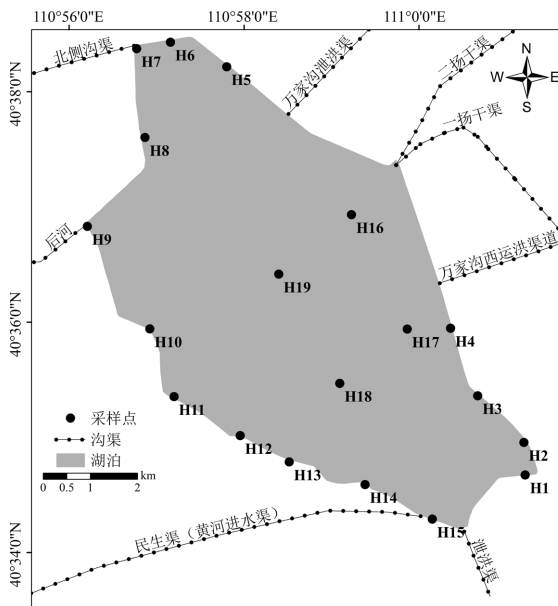


图 1 哈素海表层沉积物采样点位示意

Fig.1 Sampling sites of surface sediment in Hasu Lake

所有沉积物样品经冷冻干燥后去除砾石和植物残体等杂质,研磨并过 200 目筛后装入自封袋备用.在聚四氟乙烯消解管中采用 HCl-HNO₃-HF-HClO₄ 体系消解处理样品,采用电感耦合等离子体发射质谱仪(ICP-MS,Agilent-7700x,美国)测定 As、

Cr、Cd、Cu、Pb 和 Zn 的含量,Hg 的含量则采用原子荧光光谱仪(XGY-1011A)进行测定.As、Cr、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 的检出限分别为 0.1,0.5,0.01,0.02,0.02,0.2 和 0.002mg/kg.通过加入标准参考物质(GBW07366GSD-2)、平行样和空白对照进行质量保证和质量控制,各重金属的回收率为 85%~115%,3 次重复分析结果的误差均在 5%以内.除 Cr 外,其他 6 种目标重金属均有检出.具体测试方法和实验注意事项参考本课题组之前的研究成果^[20].

1.3 沉积物重金属污染评价

1.3.1 地累积指数法 地累积指数法是德国学者 Muller 于 1969 年提出的可以反映沉积物或土壤中重金属潜在污染程度的一种方法^[21],其计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 \left[\frac{C_i}{k \times B_i} \right] \quad (1)$$

式中: I_{geo} 为重金属的地累积指数; C_i 是第 i 种重金属的实测含量,mg/kg; k 是考虑地面岩石差异可能导致重金属背景值变化而得到的常数,一般取 1.5; B_i 是第 i 种重金属的参照值,mg/kg.本研究选用内蒙古自治区水系沉积物背景值作为参照值^[22],沉积物地累积指数评价标准见表 1.

1.3.2 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法是瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出的一种基于重金属实测值与背景值比较及重金属毒性系数的评价指标,其综合考量了重金属元素的生态、环境和毒理效应,广泛应用于沉积物重金属污染以及生态危害综合评价^[20,23-24].计算公式如下:

$$C_r^i = \frac{C_i}{C_n^i} \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_r^i \quad (3)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C_r^i \quad (4)$$

式中: C_r^i 是第 i 种重金属的污染系数; C_i 是第 i 种重金属的实测含量,mg/kg; C_n^i 是第 i 种重金属的背景值,本研究选用内蒙古自治区水系沉积物背景值作为参照值,mg/kg; E_r^i 是第 i 种重金属的潜在生态风险指数; T_r^i 是第 i 种重金属的毒性系数;RI 为多种重金属综合潜在生态风险指数.本研究参照马建华等^[25]提出的修正后的潜在生态风险指数分级标准,具体见表 1.

表 1 沉积物重金属污染评价方法分级标准

Table 1 Classification standard of evaluation method for heavy metals pollution in sediments

地累积指数(I_{geo})		潜在生态风险指数(E_r^i)		多种重金属综合潜在生态风险指数(RI)	
指数	风险等级	指数	风险等级	指数	风险等级
$I_{geo} < 0$	无污染	$E_r^i < 40$	轻度生态风险	$RI < 110$	轻度生态风险
$0 < I_{geo} < 1$	轻度污染	$40 < E_r^i < 80$	中生态风险	$110 < RI < 220$	中生态风险
$1 < I_{geo} < 2$	偏中度污染	$80 < E_r^i < 160$	较强生态风险	$220 < RI < 440$	较强生态风险
$2 < I_{geo} < 3$	中度污染	$160 < E_r^i < 320$	强生态风险	$440 < RI < 880$	强生态风险
$3 < I_{geo} < 4$	偏重度污染	$E_r^i > 320$	极强生态风险	$RI > 880$	极强生态风险
$4 < I_{geo} < 5$	重度污染	—	—	—	—
$I_{geo} > 5$	极重度污染	—	—	—	—

1.4 重金属来源解析

1.4.1 主成分分析 PCA 是一种用来反映变量与因子之间相关程度及关系的多元统计分析方法,将原来多个变量进行降维,通过全面分析各指标信息,以正交变换的方式将一组线性相关的变量转换成线性无关的新变量,划分出少数能概括大多数数据的综合指标,并求出主成分的特征值及方差贡献率^[26]。

1.4.2 正定矩阵因子分解模型 PMF 模型是芬兰学者 Paatero 于 1994 年提出的一种改进的用于源分配的因子分析受体模型^[27],该模型利用最小迭代二乘算法将浓度矩阵(X)分解为源贡献矩阵(G)、源成分矩阵(F)和残差矩阵(E).计算公式如下:

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^p (G_{ik} \cdot F_{kj}) + E_{ij} \quad (5)$$

式中: X_{ij} 为样品浓度矩阵,表示第*i*个样品中第*j*种重金属的含量,mg/kg; p 为源因子个数; G_{ik} 为源贡献矩阵,表示源因子*k*对第*i*个样品的贡献率; F_{kj} 为源成分矩阵,表示源因子*k*中第*j*种重金属的含量,mg/kg; E_{ij} 为残差矩阵,表示第*i*个样品中第*j*种重金属的残差值。

为使目标函数 Q 值最小,PMF 通过多次计算分解原始矩阵来选择最合适的因子数.计算公式如下:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left[\frac{X_{ij} - \sum_{k=1}^p (G_{ik} \cdot F_{kj})}{U_{ij}} \right]^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \left(\frac{E_{ij}}{U_{ij}} \right)^2 \quad (6)$$

式中: Q 为目标函数; n 为样品数; m 为重金属种类数; U_{ij} 为不确定度,表示第*i*个样品中第*j*种重金属的不确定度.本研究中重金属含量均大于相应的方法检出限,不确定值计算公式如下:

$$U_{ij} = \sqrt{(\delta \cdot C)^2 + (0.5MDL)^2} \quad (7)$$

式中: δ 为相对标准偏差,一般为 5%~30%,本文选取 10%来计算; C 为重金属的含量,mg/kg;MDL 为重金属方法检出限,mg/kg。

1.5 数据处理

采用 ArcGIS 10.8 绘制研究区域采样图和重金属含量空间分布图,使用 Excel 2021 进行数据整理,采用 SPSS 26.0 进行相关性分析和主成分分析,利用 EPA PMF 5.0 解析沉积物重金属来源,采用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量及空间分布特征

2.1.1 表层沉积物重金属含量统计特征 由表 2 可见,枯水期表层沉积物中 6 种重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 分别为:5.85~16.90,0.07~0.31,16.00~40.00,20.00~40.00,60.00~96.00 和 0.06~0.47mg/kg,平均值分别为:9.39,0.19,27.95,31.05,76.95,0.18mg/kg,其中 As、Cu、Zn 3 种重金属含量的平均值均超过内蒙水系沉积物背景值,Cd 和 Pb 2 种重金属含量的平均值与中国水系沉积物背景值接近,Hg 含量的平均值远超中国水系沉积物背景值,超标倍数为 3.6,表明枯水期哈素海表层沉积物中 Hg 污染相对严重。

丰水期表层沉积物中 6 种重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 分别为:6.32~17.80,0.38~1.70,10.00~77.00,18.00~50.00,56.00~107.00 和 0.05~0.10mg/kg,平均值分别为:12.03,1.00,33.32,33.00,74.89,0.07mg/kg,其中 Cu、Pb、Zn 3 种重金属含量的平均值均超过内蒙水系沉积物背景值,As 和 Hg 2 种重金属含量的平均值与中国水系沉积物背景值接近,Cd 含量的平均值远超中国水系沉积物背景值,超标倍数为 5.26,表明丰水期哈素海表层沉积

物中 Cd 污染相对严重。

平水期表层沉积物中 6 种重金属 $\omega(\text{As})$ 、 $\omega(\text{Cd})$ 、 $\omega(\text{Cu})$ 、 $\omega(\text{Pb})$ 、 $\omega(\text{Zn})$ 和 $\omega(\text{Hg})$ 分别为:3.93~22.77, 0.72~1.49,6.74~70.36,25.97~66.70,44.93~131.59 和 0.03~0.15mg/kg,平均值分别为:7.91,1.14,30.33,40.17, 79.38 和 0.08mg/kg,其中 Cu 和 Zn 含量的平均值均介于内蒙水系沉积物背景值和中国水系沉积物背景值之间,Cd、Pb 和 Hg 3 种重金属含量的平均值超过中国水系沉积物背景值,Cd 的超标倍数最高(超标倍数为 6),表明其为丰水期哈素海表层沉积物中污染相对严重的重金属。

将哈素海 3 个水期沉积物重金属含量平均值与内蒙古其他典型湖泊^[15,28-32]进行对比,如表 3 所示,分析可知 Pb 和 Hg 的含量均显著高于其他湖泊,Cd

的含量仅低于哈马太湖,Cu 和 Zn 的含量均高于呼伦湖、达里诺尔湖和哈马太湖,As 的含量相对较低。

总体来看,哈素海表层沉积物重金属含量在 3 个水期呈现不同的规律,其中 As 和 Cu 在丰水期的平均含量大于枯水期和平水期,Cd、Pb 和 Zn 在平水期的平均含量大于枯水期和丰水期,Hg 则表现为枯水期平均含量大于丰水期和平水期,Cd 和 Hg 在 3 个水期污染均较为严重.各重金属含量范围变化较大,且变异系数均大于 20%(当变异系数超过 20%时,人类活动是导致重金属含量空间差异的主要驱动因子^[33]),其中 Hg(72.58%)的变异系数最大,Cd(63.18%)、Cu(46.97%)、As(45.95%)和 Pb(27.99%)次之,Zn(20.49%)的变异系数最小,表明这 6 种重金属存在显著的空间异质性,受人类活动的影响较大。

表 2 哈素海不同水期表层沉积物重金属含量统计

Table 2 Statistics of heavy metals content in surface sediments during different water periods in Hasuhai Lake

项目	数理统计参数	重金属					
		As	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg
枯水期	最大值(mg/kg)	16.90	0.31	40.00	40.00	96.00	0.468
	最小值(mg/kg)	5.85	0.07	16.00	20.00	60.00	0.062
	平均值±标准差(mg/kg)	9.39±3.28	0.19±0.06	27.95±7.14	31.05±6.20	76.95±9.54	0.18±0.10
丰水期	最大值(mg/kg)	17.80	1.70	77.00	50.00	107	0.096
	最小值(mg/kg)	6.32	0.38	10.00	18.00	56	0.050
	平均值±标准差(mg/kg)	12.03±3.42	1.00±0.39	33.32±18.56	33.00±9.47	74.89±14.81	0.07±0.01
平水期	最大值(mg/kg)	22.77	1.49	70.36	66.70	131.59	0.154
	最小值(mg/kg)	3.93	0.72	6.74	25.97	44.93	0.033
	平均值±标准差(mg/kg)	7.91±5.58	1.14±0.19	30.33±15.13	40.17±10.84	79.38±21.32	0.08±0.03
全年	变异系数(%)	45.95	63.18	46.97	27.99	20.49	72.58
	中位值(mg/kg)	8.66	0.86	27.80	33	75.00	0.08
背景值	内蒙古水系沉积物背景值(mg/kg)	9.15	0.107	17.70	20.90	56.80	0.014
	中国水系沉积物背景值(mg/kg)	12.1	0.19	31.70	31.00	88.00	0.05

表 3 内蒙古其他湖泊表层沉积物重金属平均含量

Table 3 The average content of heavy metals in surface sediments of other lakes in Inner Mongolia

湖泊	采样年份	重金属(mg/kg)					
		As	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg
哈素海(本研究)	2023	9.78	0.78	30.53	34.74	77.07	0.11
哈素海 ^[15]	2014	13.76	0.05	32.29	28.25	128.10	0.04
乌梁素海 ^[28]	2021	3.64	0.43	53.74	5.86	94.69	0.02
呼伦湖 ^[29]	2020	7.22	0.33	19.32	17.63	71.36	—
达里诺尔湖 ^[30]	2018	13.87	0.19	21.66	18.77	56.67	—
岱海 ^[31]	2010	—	0.21	39.4	29.9	102.6	—
哈马太湖 ^[32]	2020	20.21	0.80	15.22	5.32	33.16	—

注:“—”表示没有相关数据。

2.1.2 表层沉积物重金属空间分布特征 哈素海

不同水期表层沉积物重金属含量的空间分布见图 2,从中可得,枯水期哈素海表层沉积物重金属含量呈现出东西部较高,南部较低的特点.其中 Cd、Cu 和 Zn 在空间分布上具有一致性,主要分布于湖区西部,Cd 和 Cu 在湖区北部沟渠附近也有较高的含量.As 和 Pb 主要集中于湖区东部,Pb 在湖区中部 H18、H19 等点位的含量也较高.Hg 则呈现出较独特的空间分布规律,其含量高值区仅位于湖区的西南部位(H12 和 H13 点位),在湖区其他点位含量较低.枯水期重金属空间分布特征可能与哈素海的潮流类型有关,枯水期时哈素海风生流较强,湖面常年风向和强风向基本为北向^[15],在北风作用下,哈素海大部分表层水

体由北向南流动,且枯水期时哈素海处于供水状态(由民生渠补水),加大了湖泊由南向北的水流速度,重金属在此处停留时间较短,湖体南部重金属向北部迁移使得湖体南部 H14 和 H15 点位沉积物的 As、Cu、Zn、Pb 和 Hg 含量较低。

丰水期哈素海表层沉积物重金属含量呈现出南北部较高,东部较低的特点.其中 Cu 和 Hg 主要集中于湖区南部,Hg 在湖区西部 H11 点位处含量也较高.Pb 和 Zn 主要分布于湖区中部和北部,在湖区西部 H11 和 H12 点位也有较高的含量.As 与 Cd 的空间分布规律则不同于其他重金属,As 绝大部分高值含量分布于 H1、H2、H12、H13、H14 和 H15 等湖区南部的点位,在 H8 点位的含量也较高.Cd 在湖区北部、西部和东部均有较高的含量,其中最高值位于湖区西部 H12 点位.丰水期重金属空间分布特征可能与降雨径流有关,哈素海东侧存在万家沟泄洪渠、一扬干渠、二扬干渠、万家沟西运洪渠等多条支流

渠道,而丰水期降雨量大,受汇入水流冲刷影响导致水中重金属不易沉降,使得湖体东部 H1 和 H4 点位沉积物的 Cu、Zn、Pb 和 Hg 含量较低。

平水期哈素海表层沉积物重金属含量呈现出中部较高,南北部较低的特点.其中 Cd、Pb 和 Hg 这 3 种重金属在空间分布上具有一致性,主要分布于湖区中部,Cd 在湖区西北部泄洪渠附近(H5 点位)也有较高的含量,Hg 在湖区北部 H7 点位处的含量也较高,Pb 的分布规律与枯水期和丰水期相似,即湖区中部和北部的含量大于湖区南部的含量,这表明 Pb 的分布在各水期较为均衡,受人类活动影响的可能性较小.Cu 和 Zn 主要集中于湖区东部,而 As 含量高值区主要集中在湖区西部,呈现出相反的空间分布规律.平水期哈素海降雨量减少,湖面几乎无风,湖体扰动降低,湖体重金属更易在湖中部沉积,使得湖体中部 H17、H18、H19 点位沉积物的 As、Cd、Zn、Pb 和 Hg 含量较高。

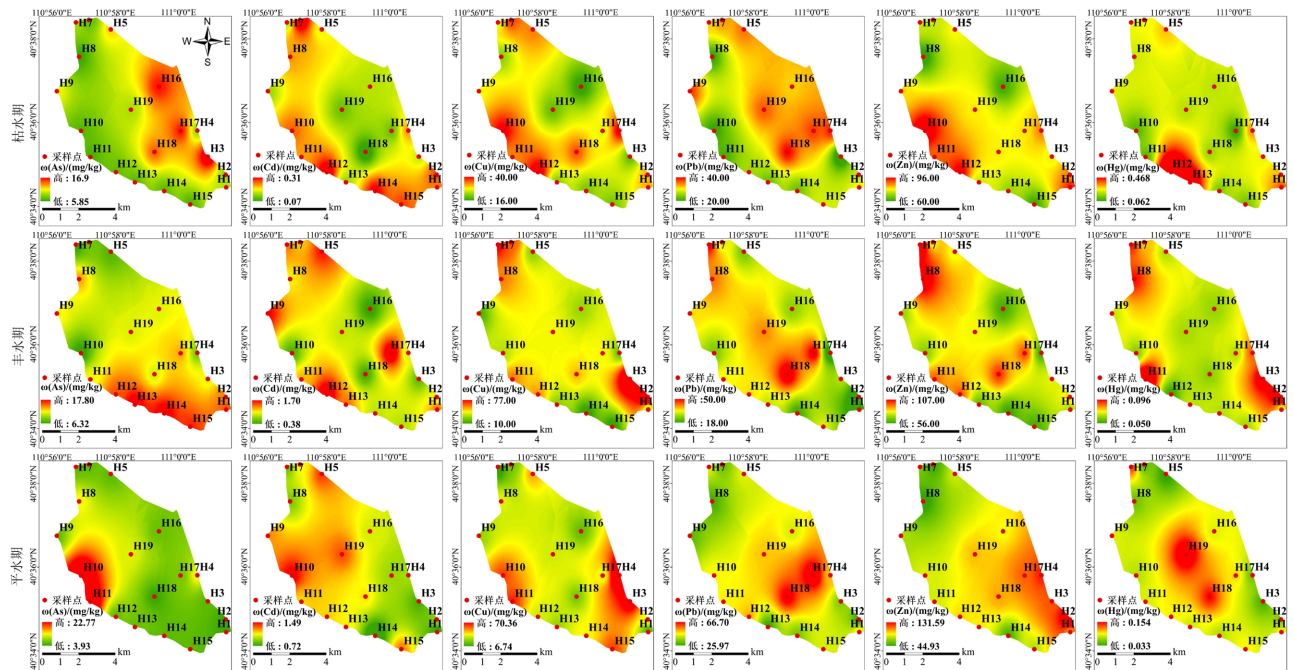


图 2 哈素海不同水期表层沉积物重金属含量空间分布

Fig.2 Spatial distribution of heavy metals content in surface sediments during dry periods in Hasu Lake

2.2 表层沉积物重金属污染评价

2.2.1 地累积指数法评价结果

不同水期地累积指数统计结果见图 3,As 和 Cu 的丰水期地累积指数平均值大于枯水期和平水期平均值,Cd 和 Pb 的平水期地累积指数平均值大于枯水期和丰水期平

均值,Hg 的枯水期地累积指数平均值大于丰水期和平水期平均值,Zn 在 3 个水期的地累积指数平均值相近.枯水期各重金属地累积指数平均值大小顺序为:Hg>Cd>Cu>Pb>Zn>As,丰水期地累积指数平均值大小顺序为:Cd>Hg>Cu>Pb>Zn>As,平水期地

累积指数平均值大小顺序为: $Cd > Hg > Pb > Cu > Zn > As$ 。在 3 个水期 Cd 和 Hg 均是造成沉积物污染的主要元素。根据地累积指数评价标准可以得出, Cd 在枯水期有 58% 的采样点处于轻度污染水平, 在丰水期则全部采样点位于偏中度-偏重度污染水平, 在平水期全部采样点位于中度-偏重度污染水平。Hg 在枯水期有 95% 的采样点处于中度及以上污染水

平, 在丰水期和平水期全部采样点均处于轻度-中度污染水平。Cu 和 Pb 在 3 个水期的污染水平相似, 有 45% 左右的采样点均处于无污染水平, 有 55% 左右的采样点均处于轻度-偏中度污染水平。As 和 Zn 在 3 个水期超过 60% 的点位均处于无污染水平, 其余点位均处于轻度污染水平, 对表层沉积物造成的污染最小。

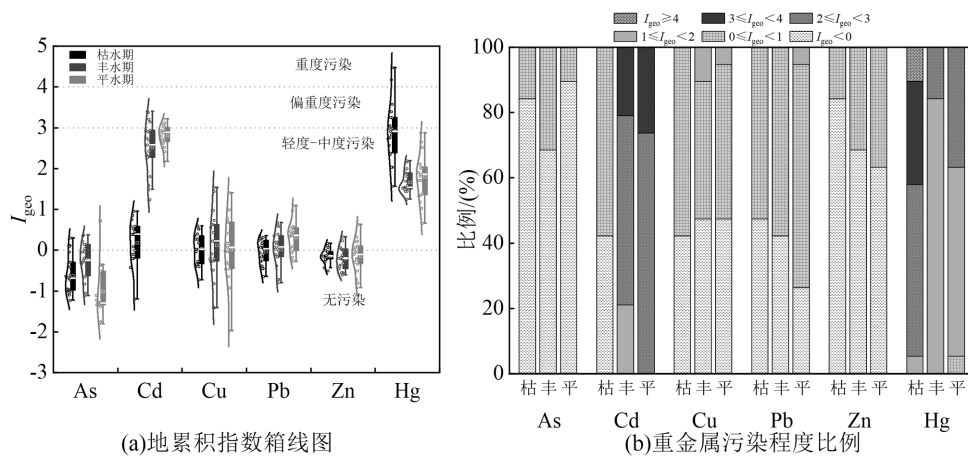


图3 哈素海不同水期表层沉积物地累积指数分布

Fig.3 Geoaccumulation index of surface sediments during different water periods in Hasu Lake

2.2.2 潜在生态风险指数法评价结果 不同水期表层沉积物潜在生态风险统计结果见表 4, 从中可得, 3 个水期 As、Cu、Pb 和 Zn 的 E_r^i 值均小于 40, 处于低生态风险水平。Cd 和 Hg 在枯水期 E_r^i 的平均值分别为 53.86 和 509.62, 其中 Cd 有 74% 的采样点处于轻度生态风险水平, 有 26% 的采样点处于中度生态风险水平, 而 Hg 的全部采样点均处于强生态风险和极强生态风险。在丰水期 Cd 的全部采样点都处于中度生态风险水平到极强生态风险水平之间, Hg 有 95% 的采样点处于强生态风险水平。在平水期 Cd 的全部采样点都处于强生态风险和极强生态风险, Hg 有 89% 的采样点处于强生态风险水平, 11% 的采样点处于较强生态风险水平。因此 Cd 和 Hg 是造成哈素海 3 个水期表层沉积物生态风险的主要元素, 这与地累积指数的分析结论一致。

通过综合潜在生态风险指数(RI)结果来看, 哈素海表层沉积物总体上处于强生态风险水平, 枯水期哈素海表层沉积物重金属 RI 值范围为 244.64~1445.86, 均值为 590.42, 其中 58% 的采样点处于强生态风险水平($440 \leq RI < 880$), 10% 的采样点处于极强潜

在生态风险($RI \geq 880$)。丰水期 RI 值范围为 298.95~684.39, 均值为 503.73, 其中有 12 个采样点处于强生态风险水平($440 \leq RI < 880$)。平水期 RI 值范围为 411.86~853.61, 均值为 570.07, 其中 89% 的采样点处于极强潜在生态风险($RI \geq 880$)。枯水期和丰水期哈素海表层沉积物各重金属对 RI 值的平均贡献率大小顺序均为: $Hg > Cd > As > Cu > Pb > Zn$, 平水期各重金属对 RI 值的平均贡献率大小顺序为: $Cd > Hg > Pb > Cu > As > Zn$, 且 Cd 和 Hg 在 3 个水期对 RI 值的贡献率之和均超过了 90%, 远大于其他 4 种重金属元素的贡献率。因此, 这两种元素不仅在表层沉积物重金属污染中占据主导地位, 也是导致潜在生态风险的主要来源。

综上所述, 2 种评价方法对重金属污染评价结果一致, Cd 和 Hg 为哈素海潜在生态风险最大的重金属元素, 该结果与鲁玥^[18]等研究哈素海表层沉积物、杜彩丽等^[28]和崔志谋等^[24]研究乌梁素海表层沉积物、以及李星谕等^[34]研究汤逊湖表层沉积物重金属污染得出的结论类似。因此, 在今后对哈素海表层沉积物重金属研究中应重点关注 Cd 和 Hg 两种元素。

表 4 哈素海不同水期表层沉积物潜在生态风险指数值

Table 4 Potential ecological risk index values of surface sediments during different water periods in Hasuhai Lake

项目	水期	类型	E_r^i						RI	
			As	Cd	Cu	Pb	Zn	Hg		
潜在生态 风险指数 统计	枯水期	最大值	18.47	86.92	11.30	9.57	1.69	1337.14	1445.86	
		最小值	6.39	19.63	4.52	4.78	1.06	177.14	244.64	
		平均值	10.26	53.86	7.89	7.43	1.35	509.62	590.42	
	丰水期	最大值	19.45	476.64	21.75	11.96	1.88	274.29	684.39	
		最小值	6.91	106.54	2.82	4.31	0.99	142.86	298.95	
		平均值	13.15	279.78	9.41	7.89	1.32	192.18	503.73	
	平水期	最大值	24.88	417.51	19.88	15.96	2.32	439.33	853.61	
		最小值	4.29	202.96	1.90	6.21	0.79	94.94	411.86	
		平均值	8.54	315.75	8.63	9.54	1.39	210.46	570.07	
	潜在生态 风险指数 分布/(%)	枯水期	轻度生态风险	100	74	100	100	100	0	0
			中度生态风险	0	26	0	0	0	0	0
			较强生态风险	0	0	0	0	0	0	32
强生态风险			0	0	0	0	0	26	58	
极强生态风险			0	0	0	0	0	74	10	
丰水期		轻度生态风险	100	0	100	100	100	0	0	
		中度生态风险	0	0	0	0	0	0	0	
		较强生态风险	0	21	0	0	0	5	37	
		强生态风险	0	42	0	0	0	95	63	
		极强生态风险	0	37	0	0	0	0	0	
平水期		轻度生态风险	100	0	100	100	100	0	0	
		中度生态风险	0	0	0	0	0	0	0	
	较强生态风险	0	0	0	0	0	31	11		
	强生态风险	0	47	0	0	0	53	89		
	极强生态风险	0	53	0	0	0	16	0		

2.4 表层沉积物中重金属来源解析

2.4.1 表层沉积物重金属相关性分析 相关性分析是推测各重金属元素之间同源性的主要依据,具有相同来源的重金属元素之间的相关性系数较大^[35-36].将 3 个水期数据整合,利用 Spearman 相关系数(已对数据进行 $k-s$ 检验,不服从正态分布)对 6 种重金属相关性进行分析.相关性分析结果如图 4 所示,重金属 Cu 和 Zn 呈极显著正相关($P<0.001$),Pb 和 Zn 呈显著正相关($P<0.01$),Cd 和 Pb 之间也呈显著正相关($P<0.05$),表明这些元素在哈素海沉积物中的地球化学性质相似,可能具有相同来源或者产生了复合污染.Hg 和 Cd 均呈极显著负相关($P<0.001$),表明 Hg 和 Cd 之间可能存在拮抗作用,其来源可能不同.

2.4.2 表层沉积物重金属主成分分析 采用 PCA 进一步分析表层沉积物重金属的主要来源,结果显示 KMO 度量值为 0.594(>0.5),Bartlett 球形度检验结果为 0.00(<0.05),表明各元素之间的相关性较强,适合进行主成分分析.根据特征值大于 1 的原则共提取了 3 个主成分,累积方差贡献率为 73.50%,表明其

能解释 6 种重金属元素的大部分信息,结果见表 5.

可知,第一主成分(PC1)的特征值为 1.803,方差贡献率为 30.05%,其中 Cd 和 Pb 具有较高的载荷值,分别为 0.740 和 0.658,表明 Cd 和 Pb 具有较强的相关性,这与相关性分析的结果一致,推测这 2 种重金属可能来源相同.前文数理统计分析部分的结果显示大部分采样点的 Cd 和 Pb 含量高于内蒙古水系物沉积物背景值,全年的变异系数为 63.18%和 27.99%,说明这两种重金属污染受到人为活动干扰较大.其中 Cd 作为农业活动的标志性元素^[37],不仅是磷肥等无机肥料中含量较高的重金属,也是水产养殖中常用的饲料添加剂^[38],其积累与长期农业活动施用的磷肥、农药和水产养殖中饲料投喂等密切相关.实地调查发现,哈素海作为土默特左旗主要的农田灌溉和畜牧水资源地,东岸、西岸和南岸有大面积的农田(耕地多为盐碱地,富含 Cd、Pb 等重金属)和牧场,化肥和农药使用量较高,家禽粪便产出量大,大量未被充分利用的农药、化肥和有机肥以淋溶、渗漏等途径,携带重金属随入湖渠道富集在沉积物中^[15].同时,

哈素海是内蒙古土默川平原上最大的水产养殖基地,近年来湖区周边大片沼泽地被开发成养鱼池,渔业资源丰富,年产鱼量 300 多万 t^[39],水产养殖过程中大量外源饵料的投喂,导致重金属随残饵和水生动物排泄物在沉积物中蓄积^[18].Pb 的主要来源为汽车尾气^[40]、发动机中金属合金的磨损^[41]、轮胎磨损^[42]和铅锌矿的生产活动^[43].哈素海是内蒙古重点旅游区,旅游业发达,北部有 G6 京藏高速、G110 国道和京包高铁,大量汽车在环湖公路和高速公路行驶以及船舶在水上活动不可避免的向环境中释放含 Pb 的粉尘,经降雨径流和大气沉降进入湖中,引起沉积物 Pb 的累积.因此,PC1 的主要来源可能是农业生产活动和交通运输.

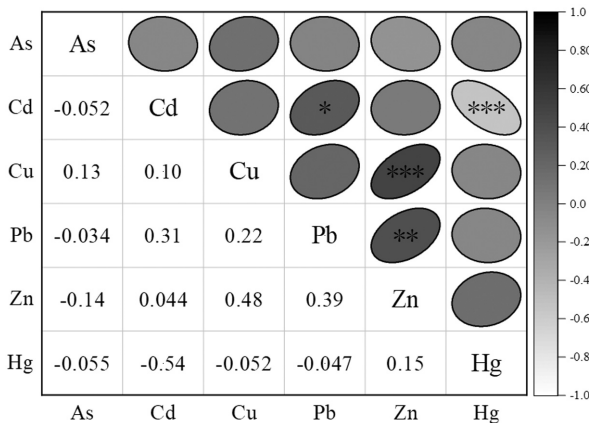


图 4 哈素海表层沉积物重金属相关系数

Fig.4 Correlation analysis of heavy metals in surface sediments in Hasu Lake

红色表示正相关,蓝色表示负相关;椭圆大小和颜色的深浅表示相关性系数绝对值的大小;*、**和***分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 上水平显著

第二主成分(PC2)的特征值为 1.498,方差贡献率为 24.937%,其中 Zn 和 Hg 具有较高的载荷值,分别为 0.709 和 0.638,可能具有相同来源.其中 Zn 的来源通常与人类活动有关,是冶炼和采矿的重要污染物^[20,44].Hg 的主要来源包括含 Hg 废水的排放、大气中含 Hg 颗粒物的干湿沉降和地表径流等^[34,45].实地调查发现,哈素海位于大青山南部,矿石开采活动较为频繁,矿区生产活动产生的含 Zn 粉尘或重金属废水进入湖体后易被有机物吸附而富集在沉积物中,矿山尾矿和矿石冶炼厂所排出的含 Hg 的废气和煤烟经大气沉降易进入湖体.因此,PC2 的主要来源可能是采矿活动.

第三主成分(PC3)的特征值为 1.108,方差贡献率为 18.48%,其中 As 和 Cu 具有较高的载荷值,分别为 0.709 和 0.671.As 和 Cu 在 3 个水期的平均值接近内蒙古水系沉积物背景值,造成的污染指数和生态风险均较低.有研究表明,As 在化肥和农药中含量较,主要来源是农业污染^[19,22],Cu 主要来源于金属冶炼^[46]、热力发电^[47]、化工企业^[48]等行业.研究发现,哈素海流域所处位置的沉积岩层属于太古代灰绿色大理岩、黑色玄武岩等岩层,As 含量比一般地壳丰度值高(7.7mg/kg,为地壳均值 4 倍^[49]),经过长期的风化溶解,含 As 碎屑物通过山间沟谷潜流和地表径流逐渐沉积到地势低缓的哈素海^[50],故推测 As 的来源为自然源.黄河内蒙古段沉积物中的 Cu 含量较高^[51-52],而哈素海年补水量的 75.7%来源于黄河,黄河内蒙古沿线城市巴彦淖尔、包头、达拉特前旗等均为重工业发达城市,金属冶炼、化工和炼油等企业较多,故推测 Cu 的来源为工业活动.因此,PC3 的主要来源可能是工业活动和自然源.

表 5 哈素海表层沉积物重金属主成分载荷矩阵

Table 5 Principal component load distribution of heavy metals in surface sediments in Hasu Lake

重金属元素	旋转后载荷系数		
	PC1	PC2	PC3
As	0.066	-0.469	0.709
Cd	0.740	-0.376	-0.171
Cu	0.469	0.330	0.671
Pb	0.658	0.210	-0.344
Zn	0.542	0.709	0.052
Hg	-0.551	0.638	0.067
特征值	1.803	1.498	1.108
方差贡献率(%)	30.05	24.97	18.48
累积方差贡献率(%)	30.05	55.02	73.50

注:加粗的数字为每个主成分中载荷较高值.

2.4.3 基于 PMF 模型的重金属来源及相对贡献率
将 57 个表层沉积物样品的 6 种重金属数据及计算出的不确定数据导入 EPA PMF 5.0 软件中,6 种重金属程度(Cat)均为“Strong”(S/N>1),根据前文 PCA 分析结果,选择不同的因子数(3~5)迭代运算 20 次,最终确定因子数为 4,绝大部分样品的残差值在-3~3 之间,说明重金属元素能够被 PMF 模型较好地分配.各重金属元素拟合曲线的 R² 值分别为 0.997、0.961、0.949、0.757、0.639 和 0.682,均大于 0.6,说明 PMF 模型对于 6 种重金属具有良好的预测作用,源解析

结果较好。

由图 5 可知,4 个因子的相对贡献率分别为 32.5%、22.7%、20.1%和 24.7%。因子 1 的主要贡献元素为 Cd(82.1%)、Pb(46.2%)和 Zn(31.4%),因子载荷与 PC1 相似。根据 2023 年呼和浩特统计年鉴,土默特左旗哈素海流域的农作物以玉米、大豆和油菜籽为主,全流域范围内磷肥施用量 $300\text{kg}/\text{hm}^2$,而我国磷肥和复合肥中 Cd 的平均含量分别为 0.91 和 $0.18\text{mg}/\text{kg}$ ^[53],均高于《土壤环境质量标准》的限值和内蒙古水系沉积物背景值。同时磷肥的过量施用会抑制根系对 Zn 的吸收,增加土壤中 Zn 的含量^[54]。前文分析表明,含铅汽油的燃烧等交通活动是 Pb 的重要来源。因此,可将因子 1 识别为农业生产活动和交通运输。

因子 2 的主要贡献元素为 Cu(67.6%)和 Zn(28.5%),相关性分析也显示重金属 Cu 和 Zn 呈极显著正相关($P<0.001$),可能具有相同来源。有研究表明,Cu 和 Zn 均来源于有色金属冶炼和燃煤等的烟尘^[55]。土默特左旗存在多家化肥化工、钢铁冶炼和燃煤发电等燃煤锅炉企业,同时冬季农村高污染燃料禁燃区内居民多采用燃煤供暖。因此,可将因子 2 识别为工业活动。

因子 3 的主要贡献元素为 As(58.9%),因子 4 的主要贡献元素为 Hg(64.6%)、Pb(31.2%)和 Zn(26.8%),其中因子 4 与 PCA 结果中的 PC2 一致,由上文分析可知将因子 3 识别为自然源,因子 4 识别为采矿活动。

综上所述,PCA 和 PMF 模型解析的重金属来源相似,PCA 方法将重金属来源分为 3 类,分别是农业生产活动和交通运输、采矿活动、工业活动和自然源,PMF 模型将 PCA 结果中的 PC3 工业活动和自然源解析得更加细致,将重金属来源分为 4 类,分别是农业生产活动和交通运输、工业活动、自然源和采矿活动,源相对贡献率分别为 32.5%、22.7%、20.1%和 24.7%。PCA 结果通过解析来源的一般分类,为 PMF 模型分析奠定了基础。与 PCA 相比,PMF 模型解析了更多具有较高解释方差的因子,提供了更多的细节,扩大了源的分类。PMF 模型在来源识别和重金属元素的分配方面优于 PCA,既提供了内部分析,又提供了定量分析。两种方法相互验证,提高了来源解析结果的可靠性。哈素海流域内的农业生产活动和交通运输对表层沉积物重金属的积累最明显,表

明重金属污染主要与农业生产活动和交通运输等外界人类活动有关,这与郑煌等^[56]研究洪湖沉积物重金属来源得出的结论一致,洪湖与哈素海均为当地重要的农业和水产养殖基地,哈素海流域所处的土默川平原占土默特左旗总面积的 66.5%,全旗耕地面积 $11.33\text{万}\text{hm}^2$,农业生产条件优良,具有悠久的农业生产历史。

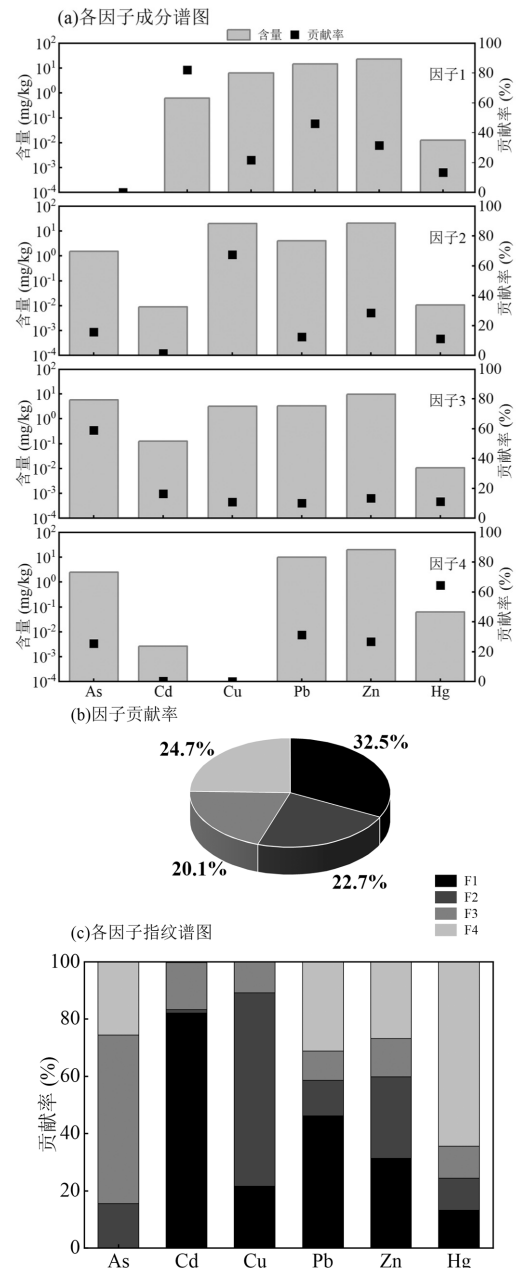


图 5 哈素海表层沉积物重金属 PMF 模型来源解析
Fig.5 Source apportionment of PMF model for heavy metals in surface sediments in Hasu Lake

根据 2023 年呼和浩特市统计年鉴数据^[57],土左旗农用塑料薄膜(包括地膜)使用量高达 4933t,位居

全市榜首,氮肥和磷肥分别施用 2 万 t 和 1 万 t,大量塑料薄膜、化肥和农药等农用物质的使用加剧了土壤重金属污染。且自 20 世纪 60 年代起,哈素海周边开始进行大规模水产围栏养殖,鱼产量每年约为 60~340t,直至 2020 年为推进哈素海生态环境修复治理,对哈素海周边禁渔退池,此前大量外源性饲料的添加导致重金属最终沉积到湖底沉积物中^[58]。鉴于此,为减少哈素海沉积物重金属造成的生态风险,建议实施合理有效的农业种植结构,结合灌排制度采取合理的灌排技术,改善土地盐碱化程度有效提高耕地土壤肥力,减少化肥和农药施用量,提倡施用生物有机肥、提升秸秆粉碎还田和饲料化利用比重;规范渔业养殖并研究养殖废水中重金属的去除机制和资源化利用;大力推进废弃矿山地质环境保护与治理,加强哈素海退水渠道等主要河道与河岸滩涂的生态治理。

3 结论

3.1 哈素海表层沉积物 6 种重金属 As、Cd、Cu、Pb、Zn 和 Hg 在枯水期和丰水期含量的平均值均超过内蒙水系沉积物背景值,平水期除 As 以外的 5 种重金属含量的平均值均超过内蒙水系沉积物背景值,6 种重金属全年的变异系数均超过 20%,存在显著的空间异质性,受人类活动影响较大。

3.2 哈素海表层沉积物重金属含量在 3 个水期呈现不同的空间分布特征,在枯水期重金属含量较高的采样点主要集中在湖区东西部,在丰水期主要集中在湖区南北部,在平水期则主要集中在湖区中部。

3.3 枯水期 6 种重金属地累积指数平均值大小顺序为:Hg>Cd>Cu>Pb>Zn>As,丰水期 6 种重金属地累积指数平均值大小顺序为 Cd>Hg>Cu>Pb>Zn>As,平水期 6 种重金属地累积指数平均值大小顺序为 Cd>Hg>Pb>Cu>Zn>As, Cd 和 Hg 在 3 个水期大部分点位处于偏中度-中度污染水平;潜在生态风险指数结果显示 3 个水期 RI 平均值分别为 590.42、503.73 和 570.07,整体上处于强生态风险水平,Cd 和 Hg 是造成 3 个水期生态风险的主要元素,其余元素均处于低风险水平。

3.4 结合 PCA 和 PMF 模型解析结果表明,哈素海表层沉积物重金属主要来源分别是农业生产活动和交通运输、工业活动、自然源和采矿活动,源相对

贡献率分别为 32.5%、22.7%、20.1%和 24.7%。其中 Cd 和 Pb 主要来源于农业生产活动和交通运输,贡献率分别为 82.1%和 46.2%,Cu 主要受工业活动的影响,As 的来源主要受自然因素的影响,Hg 主要来源于采矿活动,贡献率为 64.4%,Zn 的来源受农业生产活动和交通运输、工业活动和采矿活动多种因素的影响。

参考文献:

- [1] Khan R, Hossain S, Anik A H, et al. Indexical and statistical approaches to investigate the integrated origins of elements in the sediment of Teesta River, Bangladesh: Sediment quality and ecological risk assessment [J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2023,25(4):832-849.
- [2] Zhang J, Yang R, Li Y C, et al. Distribution, accumulation, and potential risks of heavy metals in soil and tea leaves from geologically different plantations [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020,195:110475.
- [3] Wang S, Wang W, Chen J, et al. Geochemical baseline establishment and pollution source determination of heavy metals in lake sediments: A case study in Lihu Lake, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,657(20):978-986.
- [4] Peng J F, Song Y H, Yuan P, et al. The remediation of heavy metals contaminated sediment [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2):633-640.
- [5] Yuan G L, Liu C, Chen L, et al. Inputting history of heavy metals into the inland lake recorded in sediment profiles: Poyang Lake in China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011,185(1):336-345.
- [6] Li Y, Gao B, Xu D, et al. Hydrodynamic impact on trace metals in sediments in the cascade reservoirs, North China [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,716:136914.
- [7] Zhu M, Zhu G, Li W, et al. Estimation of the algal-available phosphorus pool in sediments of a large, shallow eutrophic lake (Taihu, China) using profiled SMT fractional analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2013,173:216-223.
- [8] He Z, Li F, Dominech S, et al. Heavy metals of surface sediments in the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Distribution, speciation and environmental risks [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 198:18-28.
- [9] 匡荟芬,胡春华,吴根林,等.结合主成分分析法(PCA)和正定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析 [J]. *湖泊科学*, 2020,32(4):964-976.
Kuang H F, Hu C H, Wu G L, et al. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2020, 32(4):964-976.
- [10] 张胜楠,孟福军,尤永军,等.APCS-MLR 结合 PMF 模型的塔里木河上游沉积物重金属源解析与风险评估 [J]. *环境化学*, 2023,42(12): 4264-4277.
Zhang S N, Meng F J, You Y J, et al. APCS-MLR combined with PMF model for sediment heavy metal source analysis and risk

- assessment in the upper Tarim River Basin [J]. *Environmental Chemistry*, 2023,42(12):4264-4277.
- [11] Zhang M, Wang X, Liu C, et al. Identification of the heavy metal pollution sources in the rhizosphere soil of farmland irrigated by the Yellow River using PMF analysis combined with multiple analysis methods—using Zhongwei city, Ningxia, as an example [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020,27(14):16203-16214.
- [12] Feng W, Zhang Y, Huang L, et al. Source apportionment of environmentally persistent free radicals (EPFRs) and heavy metals in size fractions of urban arterial road dust [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2022,157:352-361.
- [13] Luo P, Xu C, Kang S, et al. Heavy metals in water and surface sediments of the Fenghe River Basin, China: Assessment and source analysis[J]. *Water Science & Technology*, 2021,84(10/11):3072-3090.
- [14] 孙 标,杨志岩,赵胜男.8 个时期哈素海芦苇群落扩张状况及其原因分析 [J]. *湿地科学*, 2016,14(6):931-935.
Sun B, Yang Z Y, Zhao S N, Expansion status of *Phragmites australis* communities in Hasuhai Lake for 8 periods and their reasons [J]. *Wetland Science*, 2016,14(6):931-935.
- [15] 孙 标,赵胜男,王利明,等.哈素海表层沉积物重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *湿地科学*, 2018,16(6):756-763.
Sun B, Zhao S N, Wang L M, et al. Pollution characteristics of heavy metals in surface sediments in Hasuhai Lake and their ecological risk assessment [J]. *Wetland Science*, 2018,16(6):756-763.
- [16] 沈丽丽,何 江,吕昌伟,等.哈素海表层沉积物中内源磷的释放研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2009,28(6):1219-1224.
Shen L L, He J, Lv C W et al. Phosphorus release from surface sediment of the Hasuhai Lake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009,28(6):1219-1224.
- [17] 孙 标,杨志岩,赵胜男,等.哈素海湖底沉积物氮磷分布特征及潜在的资源化利用探讨 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019,(2):194-200.
Sun B, Yang Z Y, Zhao S N, et al. Distribution characteristics of nitrogen and phosphorus in sediments and its potential resource utilization in Hasuhai Lake [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019,(2):194-200.
- [18] 鲁 玥,方维琦,王牧仁,等.呼和浩特市哈素海水体中重金属污染特征及生态风险评价 [J]. *广东化工*, 2021,48(20):168-170.
Lu Y, Fang W Q, Wang M R, et al. Contaminant characteristics and ecological risk assessments of heavy metals of Lake Hasuhai, Hohhot [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021,48(20):168-170.
- [19] 范成新.湖泊沉积物调查规范 [M]. 北京:科学出版社, 2018:10-23.
Fan C X. Specification for lake sediment survey [M]. Beijing: Science Press, 2018:10-23.
- [20] 卢洪斌,卢少勇,李 响,等.长江中游典型湖泊沉积物重金属分布特征、生态风险评估及溯源 [J]. *环境科学*, 2024,45(3):1402-1414.
Lu H B, Lu S Y, Li X, et al. Distribution characteristics, ecological risk assessment, and source tracing of heavy metals in the sediments of typical lakes in the middle reaches of the Yangtze River [J]. *Environmental Science*, 2024,45(3):1402-1414.
- [21] Muller G. Index of geo accumulation in sediments of the Rhine river [J]. *GeoJournal*, 1969,2(3):108-118.
- [22] 刘汉粮,聂兰仕,Davaa S,等.中蒙边界地区汇水域沉积物 69 种元素的背景值 [J]. *地学前缘*, 2020,27(3):202-221.
Liu H L, Nie L S, Davaa S et al. Background values of 69 elements in catchment sediments of the China-Mongolia boundary region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2020,27(3):202-221.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. *Water Research*, 1980,14(8):975-1001.
- [24] Almeida L C, da Silva Júnior J B, dos Santos I F, et al. Assessment of toxicity of metals in river sediments for human supply: Distribution, evaluation of pollution and sources identification [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020,158:111423.
- [25] 马建华,韩昌序,姜玉玲.潜在生态风险指数法应用中的一些问题 [J]. *地理研究*, 2020,39(6):1223-1241.
Ma J H, Han X C, Jiang Y L. Some problems in the application of potential ecological risk index [J]. *Geographical Research*, 2020,39(6):1223-1241.
- [26] Liu Q, Yang P, Hu Z, et al. Identification of the sources and influencing factors of the spatial variation of heavy metals in surface sediments along the northern Jiangsu coast [J]. *Ecological Indicators*, 2022,137:108716.
- [27] Paatero P, Tapper U. Positive matrix factorization: A non - negative factor model with optimal utilization of error estimates of data values [J]. *Environmetrics*, 1994,5(2):111-126.
- [28] 杜彩丽,黎佳茜,李国文,等.乌梁素海表层沉积物中营养盐和重金属分布特征以及风险评价 [J]. *环境科学*, 2022,43(12):5598-5607.
Du C L, Li J Q, Li G W, et al. Distribution and risk assessment on the nutrients and heavy metals in surface sediments of Wuliangsu Lake [J]. *Environmental science*, 2022,43(12):5598-5607.
- [29] Liu T, Zhang D, Yue W, et al. Heavy metals in sediments of Hulun Lake in Inner Mongolia: Spatial-temporal distributions, contamination assessment and source apportionment [J]. *Water*, 2023,15(7):1329.
- [30] Xu M, Sun W, Wang R. Spatial distribution and ecological risk assessment of potentially harmful trace elements in surface sediments from Lake Dali, North China [J]. *Water*, 2019,11(12):2544.
- [31] Jiang Z, Liu B, Liu H, et al. Trace metals in Daihai Lake sediments, Inner Mongolia, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014,71(1):255-266.
- [32] Liu J, Li Y, Liu S, et al. Distribution characteristics of heavy metals in surface sediments of alkaline lake in Plateau [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021,621(1):012126.
- [33] Yang Z, Lu W, Long Y, et al. Assessment of heavy metals contamination in urban topsoil from Changchun City, China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2011,108(1):27-38.
- [34] 李星谕,李 朋,苏业旺,等.汤逊湖表层沉积物重金属污染与潜在生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2022,43(2):859-866.
Li X Y, Li P, Su Y W, et al. Pollution and potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Tangxun Lake [J]. *Environmental Science*, 2022,43(2):859-866.
- [35] Li Y, Chen H, Teng Y. Source apportionment and source-oriented risk assessment of heavy metals in the sediments of an urban river-lake system [J]. *Science of the Total Environment*, 2020,737:140310.
- [36] Shao D, Zhan Y, Zhou W, et al. Current status and temporal trend of heavy metals in farmland soil of the Yangtze River Delta Region: Field survey and meta-analysis [J]. *Environmental Pollution*, 2016,219:329-

- 336.
- [37] Wei J, Hu K, Xu J, et al. Determining heavy metal pollution in sediments from the largest impounded lake in the eastern route of China's South-to-North Water Diversion Project: Ecological risks, sources, and implications for lake management [J]. *Environmental Research*, 2022,214:114118.
- [38] 訾鑫源,张 鸣,谷孝鸿,等.洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评价 [J]. *环境科学*, 2021,42(11):5355-5363.
Zi X Y, Zhang M, Gu X H, et al. Impact of enclosure culture on heavy metal content in surface sediments of Hongze Lake and ecological risk assessment [J]. *Environmental science*, 2021,42(11):5355-5363.
- [39] 孙 标,赵胜男,朱永华.哈素海水量平衡分析及入湖污染负荷研究 [J]. *海洋湖沼通报*, 2019,(1):80-84.
Sun B, Zhao S N, Zhu Y H. Analysis of water balance and its pollution load of Hasu Lake [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019,(1):80-84.
- [40] 杨 安,邢文聪,王小霞,等.西藏中部河流、湖泊表层沉积物及其周边土壤重金属来源解析及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2020,40(10):4557-4567.
Yang A, Xing W C, Wang X X, et al. Source and risk assessment of heavy metals in surface sediments of rivers, lakes and their surrounding soils in central Tibet [J]. *China Environmental Science*, 2020,40(10):4557-4567.
- [41] Harrison R M, Tilling R, Callén Romero M S, et al. A study of trace metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in the roadside environment [J]. *Atmospheric Environment*, 2003,37(17):2391-2402.
- [42] Xiao H, Shahab A, Xi B, 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.
- [43] Chen Y, Ning Y, Bi X, et al. Pine needles as urban atmospheric pollution indicators: Heavy metal concentrations and Pb isotopic source identification [J]. *Chemosphere*, 2022,296:134043.
- [44] Al-Khlaifat A L, Al-Khashman O A. Atmospheric heavy metal pollution in Aqaba city, Jordan, using *Phoenix dactylifera* L. leaves [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41(39):8891-8897.
- [45] Rydberg J, Gälman V, Renberg I, et al. Assessing the stability of mercury and methylmercury in a varved lake sediment deposit [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008,42(12):4391-4396.
- [46] Li S, Zhang Q. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010,176: 579-588.
- [47] Fu J, Zhao C, Luo Y, et al. Heavy metals in surface sediments of the Jialu River, China: Their relations to environmental factors [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014,270:102-109.
- [48] Huang S S, Liao Q L, Hua M, et al. Survey of heavy metal pollution and assessment of agricultural soil in Yangzhong district, Jiangsu Province, China [J]. *Chemosphere*, 2007,67(11):2148-2155.
- [49] 袁 鹏.内蒙古土默特左旗砷中毒区砷的来源与富集研究 [D]. 北京:中国地质大学, 2017.
Yuan P. Study on the source and enrichment of arsenic in arsenic poisoning areas in Tuzuoqi, Inner Mongolia [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017.
- [50] 冯彦博.内蒙古哈素河流域高砷地下水化学特征及砷的迁移转化机制研究 [D]. 呼和浩特:内蒙古大学, 2023.
Feng Y B. Study on chemical characteristics of high arsenic groundwater and the migration and transformation mechanism of arsenic in Hasu Lake Basin, Inner Mongolia. [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2023.
- [51] 吴 涛.黄河内蒙古段河道沉积物重金属来源及污染分析 [D]. 兰州:兰州大学, 2016.
Wu T. Researches on the source of heavy metals and pollution analysis in sediment of Inner Mongolia Reach of the Yellow River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016.
- [52] 冯利忠,裴国霞,吕欣格,等.黄河呼和浩特段水体污染风险评估及其发生特性 [J]. *农业环境科学学报*, 2015,34(7):1349-1355.
Feng L Z, Pei G X, Lv X G, et al. Risk assessment and genetic characteristics of water pollution of the Yellow River at Huhhot, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015,34(7):1349-1355.
- [53] 余 垚,朱丽娜,郭天亮,等.我国含磷肥料中镉和砷土壤累积风险分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2018,37(7):1326-1331.
Yu Y, Zhu L N, Guo T L, et al. Risk assessment of cadmium and arsenic in phosphate fertilizer [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018,37(7):1326-1331.
- [54] 陈仕森,辛子兵,陆覃昱,等.Zn 对水稻吸收转运 Cd 的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019,38(10):2270-2277.
Chen S M, Xin Z B, Lu Q Y, et al. Effects of exogenous zinc on cadmium uptake and transport in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019,38(10):2270-2277.
- [55] Chen H, Wu D, Wang Q, et al. The predominant sources of heavy metals in different types of fugitive dust determined by principal component analysis (PCA) and positive matrix factorization (PMF) modeling in Southeast Hubei: A typical mining and metallurgy area in central China [J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022,19(20):13227.
- [56] 郑 煌,杨 丹,邢新丽,等.洪湖沉积柱中重金属的历史分布特征及来源 [J]. *中国环境科学*, 2016,36(7):2139-2145.
Zheng H, Yang D, Xing X L, et al. Historical records, distribution characteristics and sources of heavy metals from sediment core in Honghu Lake, China. [J]. *Science China Environmental*, 2016,36(7): 2139-2145.
- [57] 呼和浩特市统计局.呼和浩特统计年鉴 [M]. 北京:中国统计出版社, 2023.
Inner Mongolia Hohhot Bureau of Statistics. Hohhot statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2023.
- [58] 张 利,郭世和,李岩平,等.哈素海渔业资源调查及初步分析 [J]. *内蒙古农业科技*, 2010,(3):73-75.
Zhang L, Guo S H, Li Y P, et al. Investigate and preliminary analysis on the fishery resources in Hasu Lake [J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2010,(3):73-75.

作者简介: 张贺玉(1999-),男,湖北天门人,中国环境科学研究院硕士研究生,主要从事湖泊水体富营养化修复研究.发表论文 1 篇. 2446485042@qq.com.