



黄河三角洲北部湿地沉积物重金属污染风险评价及来源分析

蔡传双, 赵广明, 苏大鹏, 丁喜桂, 尼鑫, 张尧

Risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in wetland sediments in the northern Yellow River Delta

CAI Chuanshuang, ZHAO Guangming, SU Dapeng, DING Xigui, NI Xin, and ZHANG Yao

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2024030801>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 67-81

曼谷湾河口区百年来沉积物重金属变化趋势及污染来源

Variation trend and contamination source of heavy metals in sediments from estuary area of Bangkok Bay in the past century

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 61-69

日照市海岸带土壤和海底沉积物重金属分布与环境质量评价

Distribution of heavy metals in soils and surface sediments along Rizhao coast and environmental assessment

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(1): 59-68

黄河三角洲周边海域表层沉积物地球化学特征分布及影响因素

Controlling factors and distribution of geochemical characteristics of the surface sediments in the Yellow River Delta

海洋地质与第四纪地质. 2022, 42(6): 104-118

长江口地区近1500年以来沉积物重金属含量变化及其对流域环境响应

Changes in heavy metal elements in the sediments from Changjiang Estuary and their environmental responses in recent 1500 years

海洋地质与第四纪地质. 2019, 39(2): 21-30

黄河三角洲北部地区软土工程地质特性及空间分布

Soft soil engineering geological characteristics and spatial distribution in the north of Yellow River delta

海洋地质与第四纪地质. 2020, 40(1): 31-41



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

蔡传双, 赵广明, 苏大鹏, 等. 黄河三角洲北部湿地沉积物重金属污染风险评价及来源分析 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2024, 44(5): 176-188.

CAI Chuanshuang, ZHAO Guangming, SU Dapeng, et al. Risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in wetland sediments in the northern Yellow River Delta[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2024, 44(5): 176-188.

黄河三角洲北部湿地沉积物重金属污染风险评价及来源分析

蔡传双¹, 赵广明^{2,3,4,5}, 苏大鹏^{4,5}, 丁喜桂^{4,5}, 尼鑫^{4,5}, 张尧^{4,5}

1. 中国地质科学院, 北京 100037

2. 自然资源部生态预警与保护修复重点实验室, 青岛 266033

3. 山东科技大学地球科学与工程学院, 青岛 266590

4. 中国地质调查局滨海湿地生物地质重点实验室, 青岛 266237

5. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237

摘要:以黄河三角洲北部湿地39个表层沉积物样品为研究对象,测定Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg的含量,对其进行重金属污染风险评价及来源分析。结果表明:8种重金属元素在表层沉积物中平均含量由高到低顺序为:Cr>Zn>Ni>Pb>Cu>As>Cd>Hg,除As外其含量均低于山东省土壤背景值;沉积物以砂质粉砂为主,重金属元素的空间分布特征相似,可能受到“粒度效应”的影响;基于地累积指数法和潜在生态危害指数法,揭示了Cd、Hg为研究区主要污染物和重要的潜在生态危害因子;相关分析和因子分析表明,Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg可能来源于成土母质、工业活动以及油田开采,Ni、Cd可能来源于农业活动、水产养殖以及油田开采;聚类分析表明,可进一步把Cr单独分为一类;通过因子探测分析发现,黏土含量、TOC和含水率对潜在生态危害指数(RI值)解释力较大,表明其对RI值的影响较大;通过交互作用探测分析可知,任意两个影响因子交互作用后结果为双因子增强或非线性增强,表明复杂的环境加剧了湿地的潜在生态危害。

关键词:表层沉积物;重金属污染;污染评价;黄河三角洲北部湿地

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2024030801

Risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in wetland sediments in the northern Yellow River Delta

CAI Chuanshuang¹, ZHAO Guangming^{2,3,4,5}, SU Dapeng^{4,5}, DING Xigui^{4,5}, NI Xin^{4,5}, ZHANG Yao^{4,5}

1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Key Laboratory of Ecological Early Warning, Protection and Restoration of Bohai Sea, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266033, China

3. Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

4. The Key Laboratory of Coastal Wetlands Biogeosciences, Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

5. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266237, China

Abstract: The contents of Cu, Pb, Zn, Cr, Ni, Cd, As and Hg in 39 surface sediment samples collected in June 2021 from the northern wetland of the Yellow River Delta were determined, and the risk assessment and source analysis of heavy metal pollution in the sediments of the northern wetland of the Yellow River Delta were carried out. Results show that the average contents of eight heavy metal elements in the surface sediments of the wetland in the northern Yellow River Delta were in the order of Cr>Zn>Ni>Pb>Cu>As>Cd>Hg, which were lower than the soil background values of Shandong Province except for As. The sediments were mainly sandy silt, and the spatial distribution characteristics of heavy metal elements are similar, which may be affected by the “grain size effect”. The cumulative index and potential ecological hazard index (RI) revealed that Cd and Hg were the main pollutants and important potential ecological risk factors in the study area.

资助项目:自然资源部渤海生态预警与保护修复重点实验室基金(2023204);国家自然科学基金面上基金“1976年以来黄河三角洲湿地沉积有机碳汇稳定性:盐度和地貌联合制约”(42076070);山东省自然科学基金“地质过程影响下的1855年以来黄河三角洲沉积物陆源碳埋藏演化研究”(ZR2020MD079);中国地质调查局地质调查项目“重要河口及湿地滩区生态地质调查”(DD20221775),“黄渤海海岸带重点生态保护修复区综合地质调查”(DD20211401)

作者简介:蔡传双(2000—),女,硕士研究生,主要研究方向为滨海湿地生态地质, E-mail: ccs001120@163.com

通讯作者:赵广明(1984—),男,研究员,主要研究方向为滨海湿地、生态地质、生物地球化学和环境遥感, E-mail: guangming_210@163.com

收稿日期:2024-03-08; **改回日期:**2024-04-26. 周立君编辑

Correlation analysis and factor analysis showed that the sources of Cu, Pb, Zn, Cr, As, and Hg might be soil parent materials, industrial activities, and oilfield exploitation, and the sources of Ni and Cd might be from agricultural activities, aquaculture and oilfield exploitation. Cluster analysis showed that Cr could be placed into separate category. Through factor detection analysis, it was found that clay content, TOC and water content had a greater explanatory power on the RI, indicating that they had a greater impact on the RI value. The interaction detection analysis showed that the interaction of any two influencing factors resulted in two-factor enhancement or nonlinear enhancement, indicating that the complex environment aggravated the potential ecological hazards of wetlands. This study provided a scientific support for the control of heavy metal pollution in wetlands in the northern Yellow River Delta.

Key words: surface sediments; heavy metals; pollution assessment; Wetlands in the northern part of the Yellow River Delta

重金属元素广泛存在于自然界各种环境介质中^[1]。重金属元素具有高隐蔽性、易富集性以及强生物毒性等特点, 可通过食物链迁移并富集, 会对动植物、人类健康以及生态系统多样性等造成严重危害^[2-3], 因而受到广泛关注。例如, Ding 等^[4]研究表明, 在水稻生长过程中 Cd 和 Cr 会在果实中累积, 食用受污染的大米后会对人类健康造成威胁。

黄河三角洲湿地地处山东半岛东北部, 是我国形成最晚、最广阔、保存最完整的暖温带河口湿地生态系统^[5-6], 具有稳定海岸线、净化环境、水源涵养和保护生物多样性等多重生态系统服务功能^[7]。近年来, 随着社会经济的快速发展、工业生产规模不断扩大、人口快速增长等, 大量污染物通过河流进入海洋, 导致黄河三角洲出现不同程度的重金属污染^[5,8]。例如, 杨清香等^[8]以黄河三角洲实验区表层沉积物为研究对象, 运用地累积指数法和潜在生态风险指数评价法研究表明, Cd 和 Hg 相较于其他元素污染较严重, 且为主要的潜在生态风险因子。Yang 等^[9]对现代黄河三角洲表层土壤中 Cr、Pb、Ni、Cd 的分布及评价研究表明, 该地区存在 Cd 中度污染和 Pb 轻度—中度污染, 具有较强的生态危害性。

前人已对黄河三角洲地区进行了多方面的基础调查研究^[10-13], 尤其是对黄河南北两岸以及黄河入海口的重金属元素研究较为深入^[2-3,6,8]。尽管以往诸多学术成果为黄河三角洲湿地环境保护和生态建设等方面提供了翔实的史料, 但是重点针对该地区北部湿地沉积物重金属元素污染风险评价和来源等方面的研究却屈指可数。因此, 本文以黄河三角洲北部湿地为研究区, 测定其表层沉积物中铜、铅、锌、铬、镍、镉、砷、汞的含量, 分析这 8 种重金属的空间分布特征; 进行重金属生态风险和污染程度评价, 分析表层沉积物中重金属污染来源, 阐明各环境因子对潜在生态危害指数 RI 值的解释程度, 以期对黄河三角洲北部湿地重金属污染防治提供科学依据。

1 研究区背景

研究区坐落于山东省东营市, 位于黄河三角洲北部湿地 (37°57'~38°5'N、118°37'~118°44'E) (图 1), 黄河故道西侧, 地处渤海湾南岸。黄河三角洲湿地地处中纬度地区, 属于暖温带季风气候类型, 雨热同季, 气候宜人, 年平均气温为 11.7~12.6℃, 年平均日照时数为 2590~2830 h, 年均降水量为 530~630 mm, 平均蒸散量为 750~2400 mm。

2 材料与方法

2.1 样品采集与测定

2021 年 6 月在黄河三角洲北部湿地开展外业调查, 综合考虑当地实际地理情况以及土地利用方式, 设置了 39 个采样点。用 Garmin62SC 手持 GPS 确定采样点经纬度, 用木铲获取表层 (0~5 cm) 沉积物, 并将样品装在聚乙烯样品袋中密封, 外业调查结束后运回实验室。采样过程中用采集记录表记录采样点具体信息, 用相机记录采样点周围环境。

沉积物样品室温风干, 去除贝壳、草根等杂物, 全部通过 10 目孔径试样筛处理, 随后将样品用玛瑙球磨机研磨后过 200 目孔径试样筛。利用 MS2000 型激光粒度分析仪测定沉积物样品粒径, 并按照砂、粉砂、黏土进行分级。样品用 HF-HNO₃-HClO₄ 混合溶液分解处理后, 应用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS) 测定 Cu、Ni、Cd 元素含量; 样品采用粉末压片法制样后, 应用 X 射线荧光光谱法 (XRF) 直接测定 Cr、Pb、Zn 元素含量; 样品被王水分解后, 应用氢化物-原子荧光光谱法 (HG-AFS) 测定 As 元素含量, 应用冷原子-原子荧光光谱法 (CV-AFS) 测定 Hg 元素含量。

为保证测试的准确度和精密度, 对样品进行 5% 的重复抽样, 选用 12 个国家一级标准物质 (水

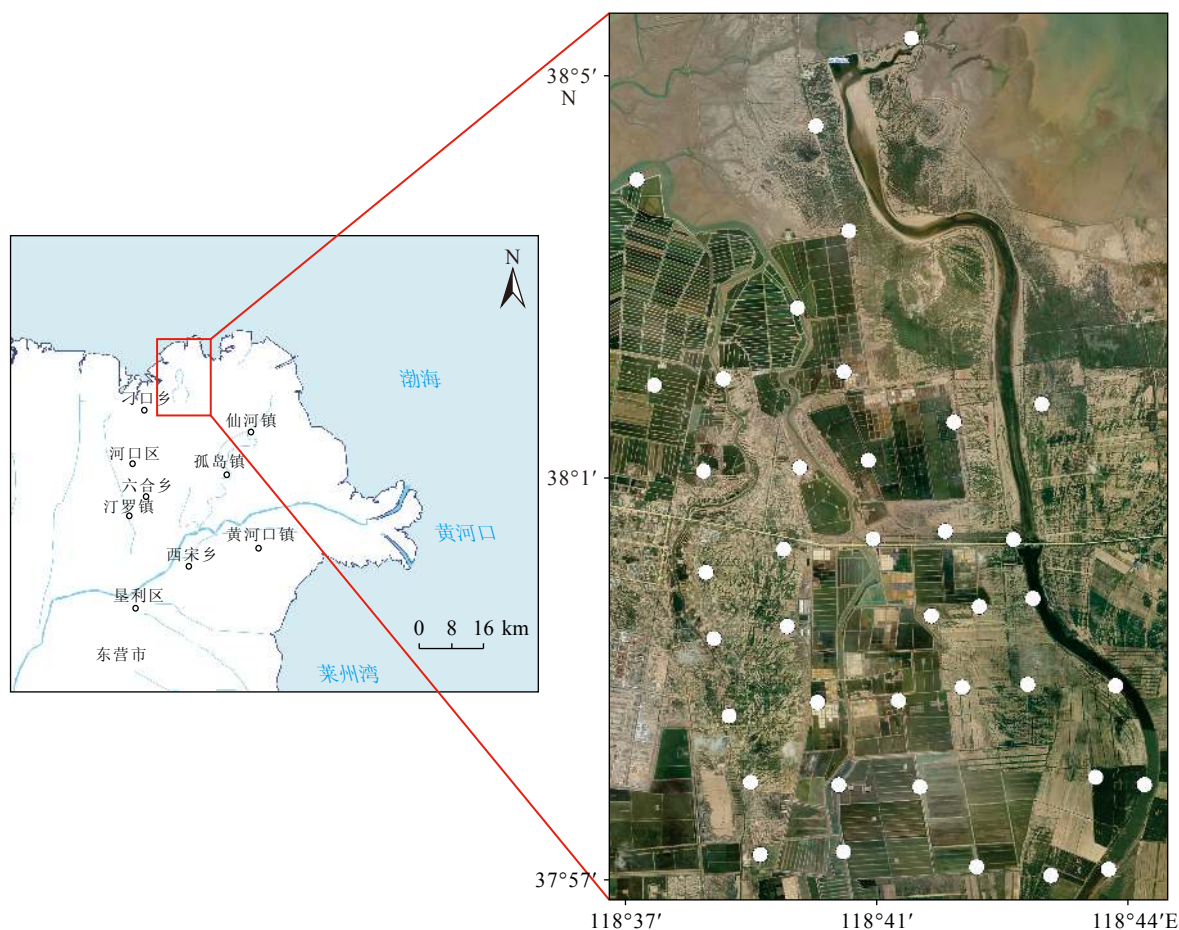


图1 黄河三角洲北部湿地采样点分布图

Fig.1 Distribution of wetland sampling points in the northern Yellow River Delta

系沉积物 GSD24、GSD25、GSD26、GSD27、GSD28、GSD31、GSD32, 土壤 GSS29、GSS31、GSS32、GSS34、GSS35) 进行分析方法检验和质量控制, 各项技术指标(检出限、报出率、准确度、精密度、检查分析合格率)均达到了《DZ/T 0130.5-2006 地质矿产实验室测试质量管理规范第 5 部分: 多目标地球化学调查(1:250000)土壤样品化学成分分析》及《DZ/T 0258-2014 多目标区域地球化学调查规范》的要求, 表明分析数据准确可靠。

2.2 土壤重金属污染风险评价方法

前人主要从沉积学角度对土壤重金属污染提出了诸多风险评价方法, 主要包括潜在生态危害指数法、地累积指数法、单因子污染指数法、富集因子法等^[14-15]。各评价方法优缺点不同, 适用情况不同, 本次研究主要应用地累积指数法和潜在生态危害指数法评价研究区表层沉积物中重金属的污染程度及其带来的生态风险。

2.2.1 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})又常被称为“Mull 指数”, 是

一种应用环境介质中某元素实际含量及其对应地球化学背景值定量计算研究样品中重金属污染程度的方法^[16-17], 计算公式如下:

$$I_{geo} = \log_2 [C_i / (K \times B_i)] \quad (1)$$

公式中, K 为修正系数, 是指土壤层的沉积特征、岩石差异及其他影响所导致的背景值变化而设定的修正常数, 一般取值 1.5; B_i 表示重金属元素 i 在沉积物中的背景参考值($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 滕彦国等^[18]的研究表明, 应用地累积指数法评价沉积物中重金属元素污染, 选择与沉积物有直接联系的地球化学背景值得出的污染状况最为真实, 故本文选择山东省东营市土壤环境背景值。地累积指数法一般分为 7 个级别, 地累积指数法分级标准见表 1^[8,19]。

2.2.2 潜在生态危害指数法

潜在生态风险指数是瑞典科学家 Hakanson 于 1980 年提出的一种基于环境学、生态学和生物毒理学的重金属污染评价方法, 能够准确定量描述重金属的潜在危险程度, 是目前研究评价沉积物重金属污染对生态环境影响常用的方法之一^[8,17], 计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i C_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \cdot C^i / C_n^i \quad (2)$$

公式中, E_r^i 表示所采样品中重金属元素 i 的潜在生态危害指数; T_r^i 表示所采样品中重金属元素 i 的生物毒性响应因子; C_n^i 为样品中重金属元素 i 的背景参考值($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 本文采用山东省土壤元素背景值, 重金属元素 Hg、Cd、As、Pb、Cu、Ni、Cr、Zn 的生物毒性响应因子分别为 40、30、10、5、5、5、2、1, 重金属潜在生态危害指数分级标准见表 2^[8,20]。

2.3 地理探测器

地理探测器由分异及因子探测、交互作用探测、生态探测、风险区探测 4 个探测器共同组成, 是探测并解译空间分层异质性影响机制的一系列统计学方法^[21]。此次研究主要应用分异及因子探测器分析影响因子对重金属元素潜在生态危害指数 RI 值的解释程度, 应用交互作用探测器分析两影响因子在交互作用下对重金属元素潜在生态危害指数 RI 值的解释程度。分异及因子探测用 q 值度量, 公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n m_i \sigma_i^2}{m \sigma^2} \quad (3)$$

表 1 地累积指数法 (I_{geo}) 分级标准

Table 1 Scaling of the land accumulation index (I_{geo})

地累积指数 I_{geo}	等级	污染程度
$I_{\text{geo}} < 0$	0	无污染
$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	1	轻度—中度污染
$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	2	中度污染
$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	3	中度—重度污染
$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	4	重度污染
$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	5	重度—极度污染
$5 \leq I_{\text{geo}}$	6	极严重污染

表 2 潜在生态危害指数法分级标准

Table 2 Scaling of the potential ecological hazard index

潜在生态危害单项系数 E_r^i	单个污染物潜在生态风险程度	潜在生态危害指数 RI	综合潜在生态风险程度
$E_r^i < 40$	轻微生态危害	$RI < 150$	轻微生态危害
$40 \leq E_r^i < 80$	中等生态危害	$150 \leq RI < 300$	中等生态危害
$80 \leq E_r^i < 160$	强生态危害	$300 \leq RI < 600$	强生态危害
$160 \leq E_r^i < 320$	很强生态危害	$600 \leq RI < 1200$	很强生态危害
$E_r^i \geq 320$	极强生态危害	$RI \geq 1200$	极强生态危害

式中, q 为因子对潜在生态危害指数 RI 值的解释力; n 为变量 Y 或因子 X 的分层; m_i 为 i 层的单元数; σ_i^2 是 i 层的变量 Y 的方差; m 为全区的单元数; σ^2 是全区的变量 Y 的方差。 $q \in [0,1]$, q 值越接近 1 表明变量 Y 的空间分层异质性越强, 反之则越弱。

基于分异及因子探测器的交互作用探测器, 分析两因子共同作用时 q 值的变化, 以对应两因子共同作用增强或减弱对变量 Y 的解释力, 亦或这些因子对变量 Y 的作用是互不影响的。因子协同作用类型可划分为非线性增强、独立、双因子增强、单因子非线性减弱以及非线性减弱。本文共选取黏土含量、TOC、含水率、距河距离、盐度、植被类型、距公路距离、距海距离等 8 个环境因子。

2.4 数据分析与统计

本文使用 ArcGIS10.8 软件绘制重金属空间分布特征图, 使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行数据处理和分析, 利用地理探测器分析各环境因子对潜在生态危害指数 RI 值的解释程度。

3 结果与讨论

3.1 沉积物重金属含量特征

黄河三角洲北部湿地表层沉积物重金属元素含量测定与统计结果如表 3 所示。由表 3 可知, 研究区表层沉积物重金属平均含量由高到低顺序为: $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 且本文重金属元素平均含量与贾少宁等^[6]的研究结果相当, 略低于 Cheng 等^[22]的研究结果。重金属元素变异程度表现为: $\text{Cd} > \text{Cu} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Ni} > \text{Cr}$ (其中 Zn 变异系数为 0.153, Ni 变异系数为 0.152)。据表 3 可知, 研究区表层沉积物中重金属元素平均含量均低于国家土壤环境质量标准的一级标准^[23]。与国内其他学者在不同区域的研究结果相比, 元素

表 3 黄河三角洲北部湿地沉积物重金属含量

Table 3 Contents of heavy metals in surface sediments of wetlands in northern Yellow River Delta

项目	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
最小值	7.70	13.20	43.50	45.50	18.00	0.06	5.66	0.01
最大值	28.60	26.80	81.80	75.70	35.00	0.20	14.70	0.03
平均值	17.60	17.70	58.20	59.00	23.40	0.09	9.07	0.02
中值	17.10	18.09	58.17	60.32	24.04	0.11	9.09	0.02
变异系数/%	0.29	0.16	0.15	0.10	0.15	0.31	0.21	0.28
国家一级标准值 ^[23]	35.00	35.00	100.00	90.00	40.00	0.20	15.00	0.15
珠江流域 ^[24]	48.72	63.97	186.60	67.44	—	2.76	49.29	—
长江三角洲 ^[25]	29.94	31.95	86.17	75.39	30.85	0.18	8.30	0.15
莱州湾 ^[26]	19.06	20.30	55.98	60.10	—	0.11	11.72	0.04
山东省背景值 ^[27]	22.60	23.60	63.30	62.00	27.10	0.13	8.60	0.03
东营市背景值 ^[28]	21.00	19.40	62.20	65.50	27.50	0.13	10.30	0.02

注：表中除变异系数外，其他单位均为mg/kg。

Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 平均含量均低于珠江流域^[24]；除 As 元素外，其他 7 种重金属元素含量平均值均低于长江三角洲^[25]；除 Zn 元素含量略高于莱州湾，其他 6 种重金属元素含量平均值均略低于莱州湾^[26]。研究区表层沉积物中重金属元素含量最大值均超过山东省土壤背景值^[27]，其中只有 As 的平均值大于山东省土壤背景值。As 的平均含量是山东省土壤背景值的 1.06 倍，表明研究区内出现了 As 富集现象，其变异系数属于中度变异(CV=0.21，中度变异范围为 0.16~0.36^[29])，由此看出，重金属元素 As 在研究区的分布具有分异性，表明砷污染与采样点周围环境密不可分。其中 Cu、Pb、Cd、Hg 只有极少部分采样点超出山东省土壤背景值，且变异系数为中度变异(CV 范围为 0.16~0.31)，表明这些重金属元素的主要来源可能是成土母质或采样点周边环境^[6]。其中重金属元素 Zn、Cr、Ni 变异系数分别为 0.15、0.10、0.15，属于低度变异(CV<1.6)，表明这 3 种重金属元素相对于其他元素受外界影响较小。

3.2 沉积物重金属空间分布特征

Pb 和 As 在研究区内均有分布且空间分布特征较为相似，其呈现从西北向东南逐渐增加、从中间区域分别向西南和东北逐渐降低的空间分布特征，高值区出现在研究区东南部。Cu 和 Zn 在研究区内均有分布且空间分布特征较为相似，高值区出现在研究区东南部，低值区出现在研究区西南部。Cr、

Ni、Cd、Hg 在研究区内均有分布，Cr、Ni、Cd 高值区均出现在研究区东南部，Cr、Ni 低值区出现在研究区东北部，且 Cr 呈现从西北向东南逐渐增加的空间分布特征；Hg 呈现从中间区域分别向西北和东南逐渐增加的空间分布特征，高值区出现在研究区西北部 and 东南部，低值区出现在研究区西南部(图 2)。

由 Pearson 相关系数矩阵(表 4)可知，黏土含量与 8 种重金属元素含量均呈显著正相关，表明黏土对重金属元素吸附能力较强。由图 3 可知，32 个采样点为砂质粉砂，4 个采样点落于粉砂区、3 个采样点落于粉砂质砂区。研究表明，在沉积物粒径为 0.2~0.63 μm 时，沉积物中重金属元素的分布与含量受到沉积物粒度影响，沉积物颗粒越细，比表面积越大，表面吸附能力越强，重金属元素含量越高^[30-31]。故而研究区内 8 种重金属元素空间分布特征相似，可能是因为受到研究区内“粒度效应”影响。

3.3 沉积物重金属风险评价

3.3.1 地累积指数法评价

地累积指数评价结果显示(表 5)，8 种重金属元素的 I_{geo} 平均值均小于 0，重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、As 在黄河三角洲北部湿地各采样点的污染等级均为无污染，重金属元素 Cd、Hg 在黄河三角洲北部湿地采样点中各有一个采样点的污染等级为轻度—中度污染，占比 3%，其他采样点的污染等级均为无污染，占比 97%，由此可知，重金属元素

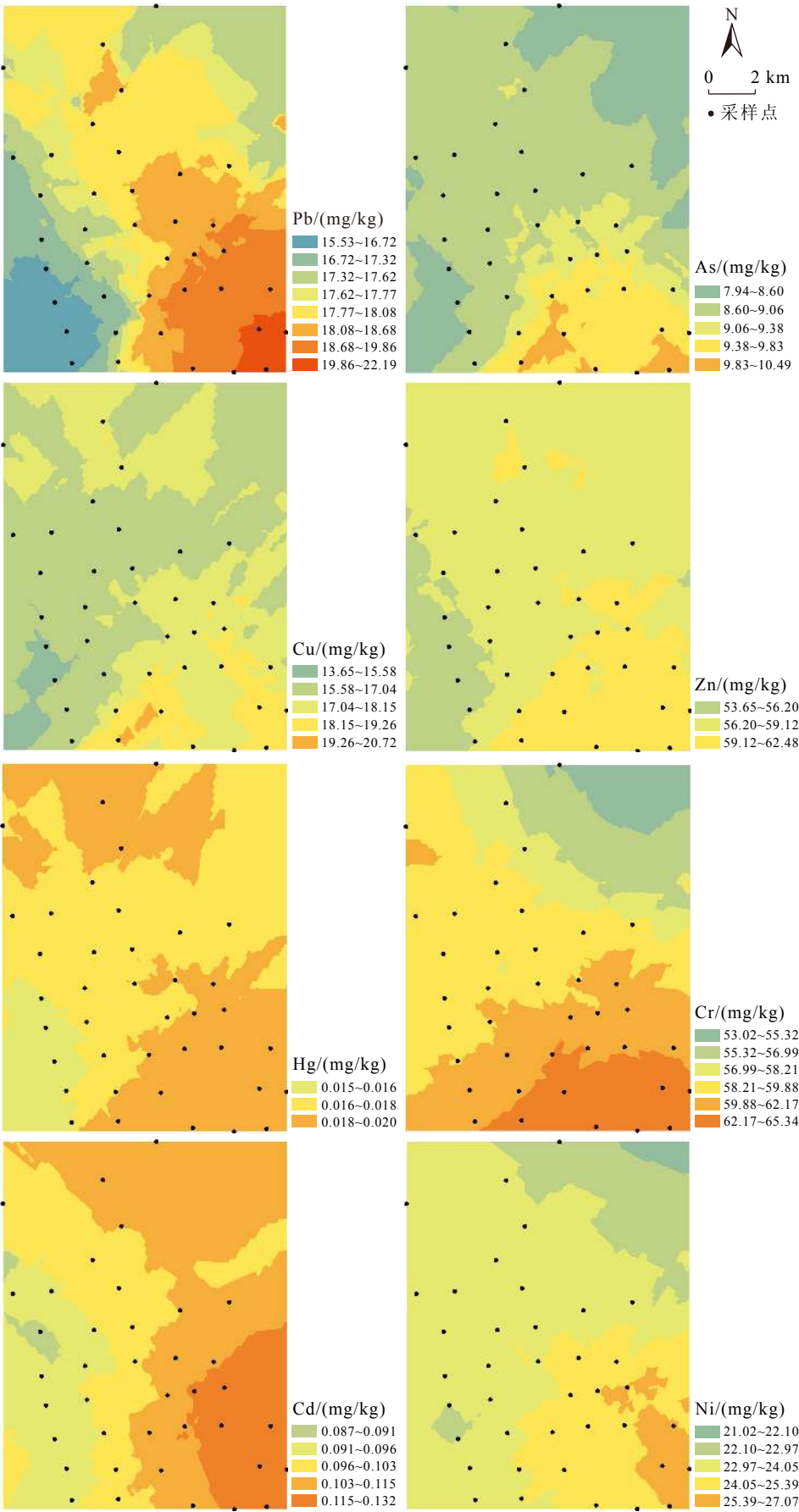


图 2 黄河三角洲北部湿地沉积物重金属分布示意图

Fig.2 Distribution of heavy metals in surface sediments of wetlands in northern Yellow River Delta

表 4 黄河三角洲北部湿地沉积物中 8 种重金属含量及其与粒径相关性

Table 4	The contents of 8 heavy metals in wetland sediments in the northern Yellow River Delta and their correlation with particle size										
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg	砂	粉砂	黏土
Cu	1										
Pb	0.74**	1									
Zn	0.93**	0.83**	1								
Cr	0.50**	0.70**	0.68**	1							
Ni	0.42**	0.39*	0.45**	0.26	1						
Cd	0.36*	0.52**	0.47**	0.28	0.79**	1					
As	0.86**	0.73**	0.88**	0.69**	0.36*	0.28	1				
Hg	0.87**	0.85**	0.93**	0.66**	0.50**	0.58**	0.81**	1			
砂	-0.67**	-0.46**	-0.67**	-0.29	-0.19	-0.15	-0.62**	-0.58**	1		
粉砂	0.50**	0.24	0.49**	0.09	0.08	0.02	0.43**	0.40*	-0.95**	1	
黏土	0.79**	0.76**	0.82**	0.60**	0.37*	0.37*	0.80**	0.77**	-0.74**	0.50**	1

注: **表示在 $p<0.01$ 水平, 相关性显著; *表示在 $p<0.05$ 水平, 相关性显著。

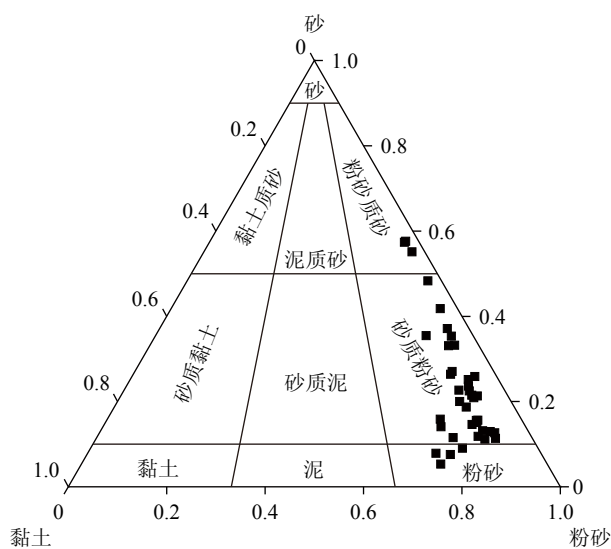


图 3 黄河三角洲北部湿地沉积物粒度三角图
Fig.3 Grain size triangle diagram for surface sediments
nomenclature in northern Yellow River Delta wetland

Cd、Hg 为黄河三角洲北部湿地表层沉积物中的主要污染物。

3.3.2 潜在生态危害指数法评价

重金属潜在生态环境风险分析显示, Cu、Pb、Zn、Cr、Ni、Cd、As、Hg 重金属元素的 E_r 值排序为 $Cd>Hg>As>Ni>Pb>Cu>Cr>Zn$ (表 6)。研究区内, 虽然 Hg 和 Cd 呈现轻微生态危害等级, 采样点占比分别为 97%、95%, 但是 Cd 呈现中等生态危害等级的采样点占比 5%, 比同一等级的 Hg 的占比 (3%) 要高, 因此 Cd 的潜在生态风险高于 Hg; 重金

属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Ni 和 As 的潜在生态危害指数均小于 40, 属于轻微生态危害等级。研究区表层沉积物重金属元素的 RI 值为 47.15~119.36, 平均值为 72.86(表 6), 潜在生态风险等级均为轻微生态危害等级。

8 种重金属元素对黄河三角洲北部湿地表层沉积物 RI 值的贡献比例和整体潜在生态危害指数与 Cd、Hg 的单项潜在生态危害指数之间的关系显示, 在黄河三角洲北部湿地表层沉积物中, Cd 对潜在生态危害指数 RI 值的贡献率最高, 高达 33.30%, 其单项潜在生态危害指数 E_r 值部分达到中等生态危害比例。Hg 对潜在生态危害指数 RI 值的贡献率也较高, 高达 31.73%, 其单项潜在生态危害指数 E_r 值也部分达到中等生态危害比例。As、Ni、Pb、Cu、Cr、Zn 对潜在生态危害指数 RI 值的贡献率分别为 14.50%、6.09%、5.26%、5.19%、2.67%、1.26%, 明显低于 Cd 和 Hg, 潜在生态风险等级仅达到轻微生态危害等级。由图 4b 可以看出, RI 值与 Cd、Hg 的 E_r 值变化走向较为相似, 再次证明 Cd、Hg 是黄河三角洲北部湿地表层沉积物重金属污染的主要生态危害因子。大量研究表明, Cd、Hg 是由喷洒农药以及施有机肥等农业活动、工业生产、大气沉降、交通运输、污水灌溉等污染输入^[20,32], 对滨海湿地具有一定的影响^[8,17,19,26]。

3.3.3 两种评价结果的对比

利用地累积指数法得出的污染程度排序为 $Cd<Cu<Hg<As<Ni<Cr<Pb<Zn$, 重金属元素

表 5 黄河三角洲北部湿地沉积物重金属地累积指数评价结果

Table 5 Evaluation results of heavy metal land accumulation index in wetland sediments in northern Yellow River Delta

	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg
最小值	-2.03	-1.14	-1.10	-1.11	-1.20	-1.63	-1.45	-1.72
最大值	-0.14	-0.12	-0.19	-0.38	-0.24	0.04	-0.07	0.00
平均值	-0.94	-0.70	-0.70	-0.71	-0.79	-0.95	-0.80	-0.84
标准偏差	0.44	0.22	0.21	0.15	0.21	0.41	0.30	0.39
无污染比例/%	100	100	100	100	100	97	100	97
轻度—中度污染比例/%	0	0	0	0	0	3	0	3

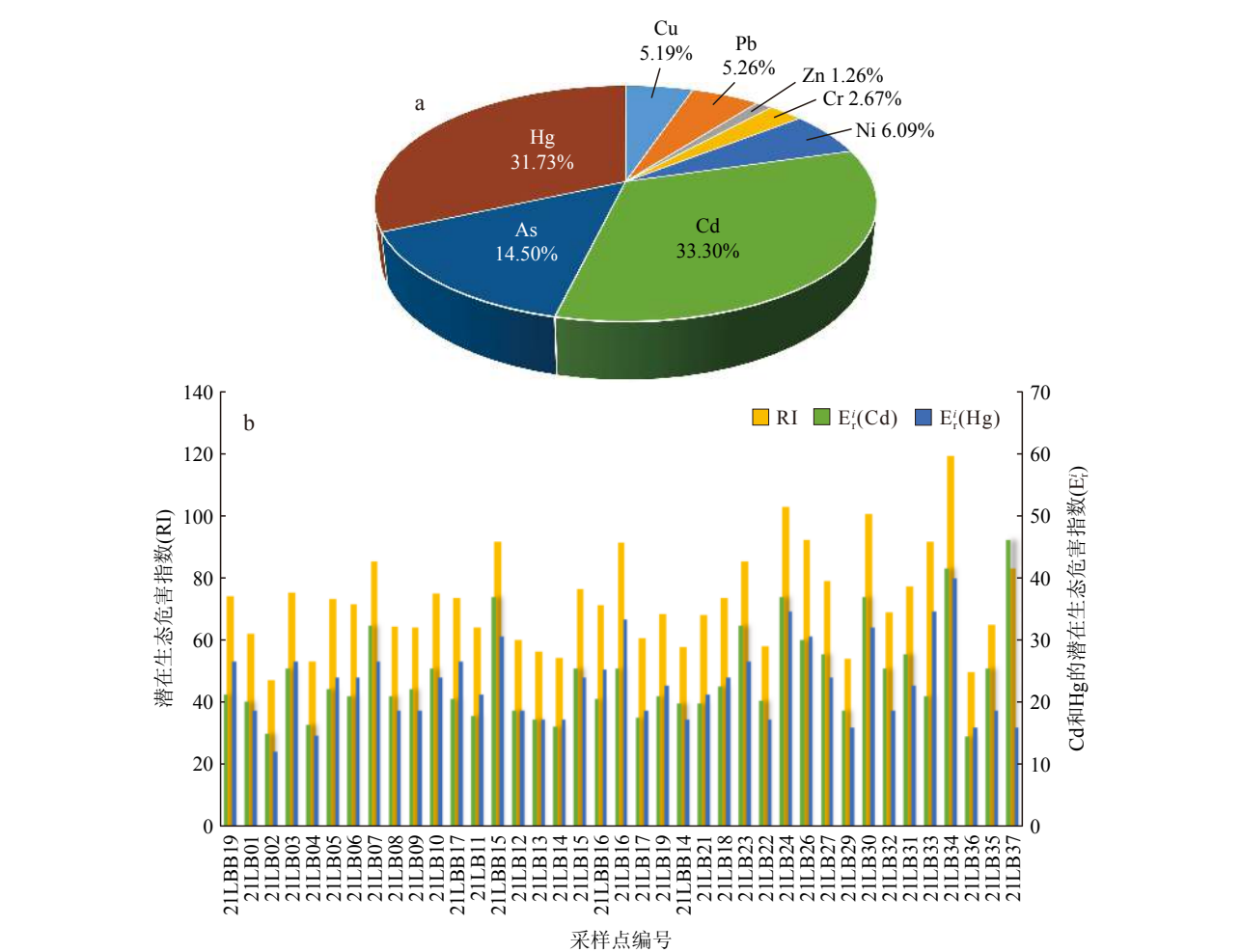


图 4 8 种重金属元素对黄河三角洲北部湿地沉积物 RI 值的贡献比例 (a) 和整体潜在生态危害指数与 Cd、Hg 的单项潜在生态危害指数之间的关系图 (b)

Fig.4 The contribution ratio of 8 heavy metal elements to the RI value of wetland sediments in the northern Yellow River Delta (a); and the relationship between the overall potential ecological hazard index and the single potential ecological hazard index of Cd and Hg (b)

Cd、Hg 为主要污染物,利用潜在生态危害指数法得出的潜在生态危害程度排序为 $Zn < Cr < Cu < Pb < Ni < As < Hg < Cd$, 重金属元素 Cd、Hg 为主要生态危害因子。可见,两种分析方法既存在一定的一致性,又存在明显的差异性。首先,可能是因为参考背景值不同,地累积指数法采用山东省东营市土壤环境背景值为参考值,潜在生态危害指数法采用山东省土壤元素背景值为参考值。其次,可能是因为潜在生态危害指数法不仅采用了重金属元素的实测含量,而且采用了重金属元素的生物毒性响应因子。

表 6 黄河三角洲北部湿地沉积物重金属潜在生态危害指数评价结果

Table 6 Evaluation results of potential ecological risk index of heavy metals in surface sediments of wetlands in northern Yellow River Delta

	E_r^i								RI
	Cu	Pb	Zn	Cr	Ni	Cd	As	Hg	
最小值	1.70	2.80	0.69	1.47	3.32	14.54	6.58	12.13	47.15
最大值	6.33	5.68	1.29	2.44	6.46	46.15	17.09	40.00	119.36
平均值	3.78	3.83	0.92	1.95	4.44	24.26	10.57	23.11	72.86
轻微生态危害比例/%	100	100	100	100	100	95	100	97	100
中等生态危害比例/%	—	—	—	—	—	5	—	3	—

3.4 沉积物重金属污染源分析

为了分析黄河三角洲北部湿地表层沉积物中元素来源的相似性,使用 IBM SPSS Statistics 27 软件对表层沉积物中 8 种重金属元素进行相关性分析,结果见表 4。

土壤中重金属元素的赋存主要受自然和人为因素的影响,其来源或地球化学过程的相似性可能导致不同元素之间存在一定的相关性,因此分析重金属元素之间的相关性是推断重金属来源的重要依据^[33-34]。由表 4 可知,Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 之间具有极显著的正相关关系($P<0.01$),相关系数为 0.50~0.93,说明在黄河三角洲北部湿地表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 具有相似的地球化学行为^[17]。Ni 和 Cd 之间呈现极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.79,说明在黄河三角洲北部湿地表层沉积物中 Ni 和 Cd 可能具有同源性或有相似的地球化学行为^[33]。研究表明,Ni 是植物生长必需的微量元素之一,磷肥中含有矿质成分 Ni,磷肥生产原料磷矿石的加工过程也会引入 Cd^[3,6,35],故而 Ni 和 Cd 的污染源可能是磷肥的使用。

为更加准确地识别黄河三角洲北部湿地表层沉积物中重金属元素来源,使用因子分析和聚类分析对重金属元素进行分析(表 7、图 5)。

在因子分析中 KMO 检验值为 0.85, Bartlett 球形检验值显著性水平 $P<0.001$,表明其适合进行因子分析。因子分析结果如表 7 所示,存在两个结果特征值大于 1,共可以提取出 2 个因子,这两个因子可以解释总变量方差的 55.293% 和 23.937%,旋转后累计方差贡献率达到 79.230%,反映了数据的大部分信息。其中 As、Zn、Cu、Hg、Pb、Cr、黏土、TOC 在因子 1 中具有较高的载荷,表明 As、Zn、Cu、Hg、Pb、Cr 具有相似的来源,且受到 TOC 和黏土的

表 7 黄河三角洲北部湿地沉积物中重金属元素因子分析

Table 7 Factor analysis of heavy metal elements in wetland sediments in the northern Yellow River Delta

元素	因子1	因子2
As	0.921	0.117
Zn	0.918	0.305
Cu	0.874	0.248
Hg	0.850	0.431
Pb	0.829	0.364
Cr	0.763	0.094
Cd	0.197	0.940
Ni	0.184	0.879
黏土	0.859	0.208
TOC	0.521	0.447
特征值	5.529	2.394
方差百分比/%	55.293	23.937
累积方差百分比/%	55.293	79.230

注:旋转方法采用凯撒正态化最大方差法。

影响。相关研究表明,有机碳是重金属元素迁移的重要载体^[36],前文亦已证明重金属元素受“粒度效应”影响;Cd、Ni 在因子 2 中具有较高的载荷,分别为 0.940、0.879。该因子分析结果与上述相关性分析结果一致。研究区周边有油田建设,存在工业生产、农业活动以及水产养殖等,且有研究表明,Cd 是农业活动的标识元素,Cu、Ni 是油田开采的标识元素^[37],结合相关性分析和重金属含量特征可知,因子 1 代表来源可能是成土母质、工业活动以及油田开采,因子 2 代表来源可能是农业活动、水产养殖以及油田开采。

为了验证并深入研究因子分析的结果,识别

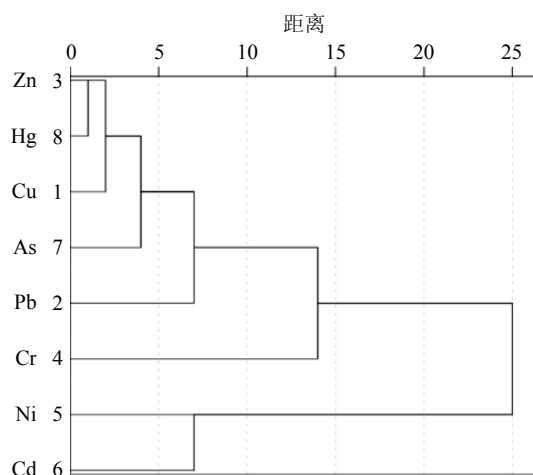


图 5 黄河三角洲北部湿地沉积物中重金属元素聚类分析
Fig.5 Cluster analysis of heavy metal elements in surface sediments of wetlands in northern Yellow River Delta

出黄河三角洲北部湿地表层沉积物中重金属元素更详细的来源划分,对黄河三角洲北部湿地表层沉积物重金属元素含量进行了聚类分析(图 5),聚类分析将 8 种重金属元素分为与因子分析相同的 Zn、As、Cu、Hg、Pb、Cr 与 Cd、Ni 两大类,同时可以将其划分的更加细微,将 Zn、As、Cu、Hg、Pb、Cr 一大类中的 Cr 单独分为一类,共分为 3 类:① Zn、As、Cu、Hg、Pb,② Cr,③ Cd、Ni,分为一类的重金属元素可能有更相似的来源、性质或地球化学行为。

3.5 潜在生态危害指数影响因素分析

3.5.1 因子探测

利用因子探测器探测 8 个因子对黄河三角洲北部湿地表层沉积物重金属元素潜在生态危害指数 RI 值的影响程度(图 6),结果表明不同影响因子对潜在生态危害指数 RI 值解释力不同,各环境因子的 q 值从高到低顺序为黏土含量(0.589) > TOC(0.585) > 含水率(0.550) > 距河距离(0.443) > 盐度(0.402) > 植被类型(0.387) > 距公路距离(0.248) > 距海距离(0.114)。黏土含量、TOC、含水率对表层沉积物重金属元素潜在生态危害指数 RI 值解释力较大(q 值均在 0.5 以上),可能是因为这几种环境因子均属于自然条件因子,黏土含量、TOC、含水率等自然条件可以影响成土母质的形成、重金属元素的迁移和转化等,从多个方面影响重金属元素含量,进而影响重金属元素潜在生态危害指数 RI 值。综合 8 个因子探测结果可知,重金属元素潜在生态危害指数 RI 值不止受到自然过程影响,还受控于人类活动,主要影响因素是自然条件因子。

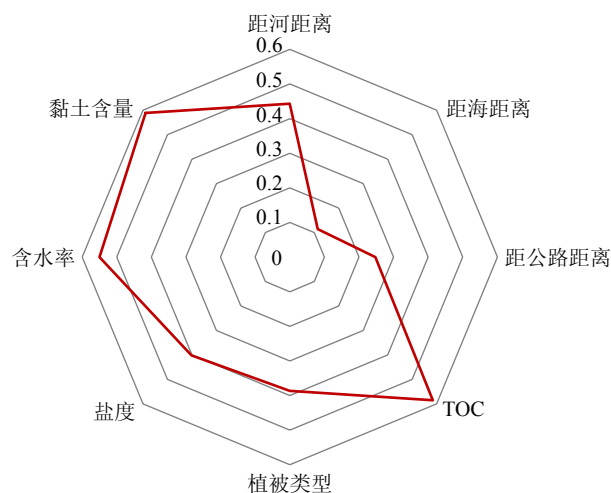


图 6 各影响因子对 RI 值影响的解释力
Fig.6 Explanatory power of the effect of each influence factor on RI values

3.5.2 交互作用探测

沉积物中重金属元素的空间分布不只受单一因素控制,而是由人类活动、自然环境等多种影响因素共同作用的结果^[38]。故而,本研究采用交互作用探测器探测 8 种影响因子对黄河三角洲北部湿地表层沉积物重金属元素潜在生态危害指数 RI 值交互作用程度。如图 7 所示,任意两个影响因子交互作用的解释力 q 均高于单个影响因子,全部为双因子增强、非线性增强,不存在减弱和独立的交互作用类型,表明复杂的环境将加剧湿地的潜在生态危害。其中,距公路距离与黏土含量、距河距离与 TOC、距河距离与含水率、距河距离与盐度、距河距离与距海距离、距河距离与距公路距离、距公路距离与盐度对重金属元素潜在生态危害指数 RI 值交互作用较为显著;距公路距离、植被类型两个人类活动因子在交互探测中对其他自然条件因子也有着显著的增强作用,表明重金属元素潜在生态危害指数 RI 值受自然条件和人类活动等多种因素共同影响。

4 结论

本文以黄河三角洲北部湿地 39 个表层沉积物样品为研究对象,基于地累积指数法、潜在生态危害指数法、相关性分析、因子分析和聚类分析等方法,对黄河三角洲北部湿地沉积物进行了重金属污染风险评价及来源分析,取得以下几点认识:

(1) 黄河三角洲北部湿地表层沉积物 8 种重金属元素除 As 外平均含量均低于山东省土壤背景值,其平均含量由高到低顺序为 Cr > Zn > Ni > Pb >

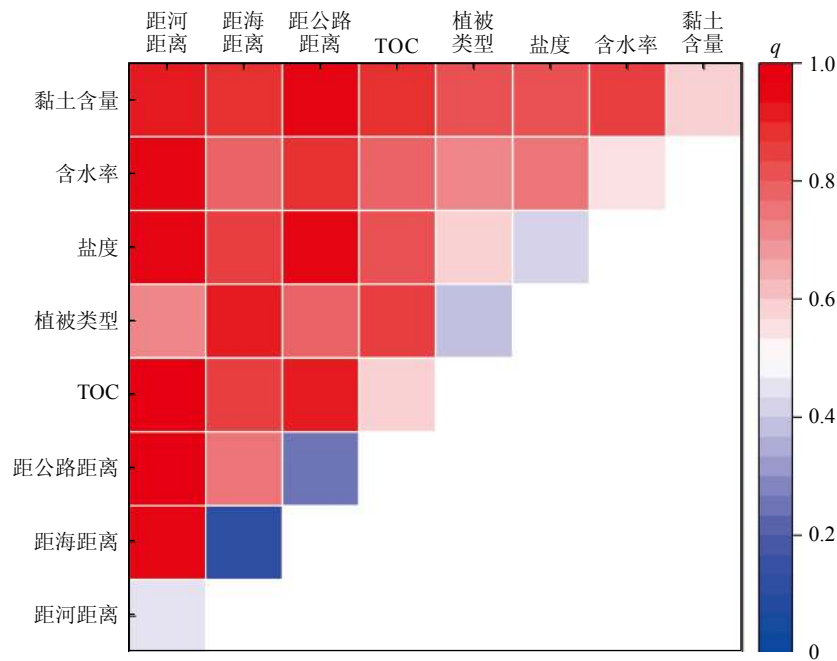


图 7 各影响因子对 RI 值影响的交互作用

Fig.7 Interaction of the effect of each influencing factor on the RI value

Cu>As>Cd>Hg。东南部均出现高值区,可能受到“粒度效应”的影响。

(2)地累积指数法和潜在生态危害指数法表明,Cd、Hg 为研究区主要污染物和重要的潜在生态危害因子。

(3)相关性分析和因子分析表明,Cu、Pb、Zn、Cr、As、Hg 可能来源于成土母质、工业活动以及油田开采,Ni、Cd 可能来源于农业活动、水产养殖以及油田开采;聚类分析可进一步把 Cr 单独划分为一类。

(4)因子探测分析结果显示黏土含量、TOC、含水率对潜在生态危害指数(RI 值)解释力较大,表明其对 RI 值的影响较大;交互作用探测发现,任意两个影响因子交互作用后结果为双因子增强或非线性增强,表明复杂的环境将加剧湿地的潜在生态危害,重金属元素潜在生态危害指数 RI 值受自然条件和人类活动等多种因素共同影响。

参考文献 (References)

- [1] 王辉,赵悦铭,刘春跃,等.辽河干流沉积物重金属污染特征及潜在生态风险评价[J].环境工程,2019,37(11): 65-69. [WANG Hui, ZHAO Yueming, LIU Chunyue, et al. Characterization of heavy metal contamination and evaluation of potential ecological risk of sediments in the main stream of Liaoh River[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(11): 65-69.]
- [2] 柴元武,宫静.重金属对人类健康的影响[J].固原师专学报,2002,23(6): 19-20. [CHAI Yuanwu, GONG Jing. Effects of heavy metals on human health[J]. Journal of Guyuan Teachers College, 2002, 23(6): 19-20.]
- [3] 陈雪娟,高放,王青,等.黄河三角洲湿地淡水修复区重金属分布特征及潜在风险[J].环境工程,2023,41(1): 232-239. [CHEN Xuejuan, GAO Fang, WANG Qing, et al. Distribution characteristics and potential risks of heavy metals in freshwater restored wetlands in the Yellow River Delta[J]. Environmental Engineering, 2023, 41(1): 232-239.]
- [4] Ding Z, Wu J, You A, et al. Effects of heavy metals on soil microbial community structure and diversity in the rice (*Oryza sativa* L. subsp. *japonica*, Food Crops Institute of Jiangsu Academy of Agricultural Sciences) rhizosphere[J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2017, 63(1): 75-83.
- [5] 宋颖,李华栋,时文博,等.黄河三角洲湿地重金属污染生态风险评价[J].环境保护科学,2018,44(5): 118-122. [SONG Ying, LI Huadong, SHI Wenbo, et al. Ecological risk assessment of heavy metal pollution in wetlands of the Yellow River Delta[J]. Environmental Protection Science, 2018, 44(5): 118-122.]
- [6] 贾少宁,申发,颜宁,等.黄河三角洲不同土地利用方式下土壤重金属分析评价[J].鲁东大学学报:自然科学版,2023,39(3): 193-202. [JIA Shaoning, SHEN Fa, YAN Ning, et al. Analysis and evaluation of soil heavy metals under different land use in the Yellow River Delta[J]. Journal of Ludong University (Natural Science Edition), 2023, 39(3): 193-202.]
- [7] 吴志勇,黄川友.湿地构成变化与湿地保护[J].环境科学与技术,2001(S2): 32-34. [WU Zhiyong, HUANG Chuanyou. Changes in wetland composition and wetland conservation[J]. Environmental Science and Technology, 2001(S2): 32-34.]
- [8] 杨清香,李小庆,于淼成,等.黄河三角洲实验区表层沉积物重金属

- 污染特征及防控策略[J]. *环境工程学报*, 2023, 17(7): 2424-2432. [YANG Qingxiang, LI Xiaoqing, YU Miaocheng, et al. Characteristics of heavy metal pollution in surface sediments of the Yellow River Delta Experimental Area and strategies for prevention and control[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2023, 17(7): 2424-2432.]
- [9] Yang H, Sun J, Xia J, et al. Distribution and Assessment of Cr, Pb, Ni and Cd in Topsoil of the Modern Yellow River Delta, China[J]. *Wetlands*, 2021, 41(2): 26.
- [10] 别君, 黄海军, 樊辉, 等. 现代黄河三角洲地面沉降及其原因分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 29-35. [BIE Jun, HUANG Navy, FAN Hui, et al. Ground subsidence in the modern Yellow River Delta and its causes[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 29-35.]
- [11] 薛春汀, 叶思源, 高茂生, 等. 现代黄河三角洲沉积物沉积年代的确定[J]. *海洋学报*, 2009, 31(1): 117-124. [XUE Chunting, YE Siyuan, GAO Maosheng, et al. Determination of sedimentary age of modern Yellow River Delta sediments[J]. *Journal of Oceanography*, 2009, 31(1): 117-124.]
- [12] 王奎峰, 李念春, 王薇. 黄河三角洲多年海岸线动态变迁特征及演化规律[J]. *应用海洋学学报*, 2018, 37(3): 330-338. [WANG Kueifeng, LI Nianchun, WANG Wei. Characteristics of multi-year coastline dynamics change and evolution law in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2018, 37(3): 330-338.]
- [13] 陈柯欣, 丛丕福, 曲丽梅, 等. 黄河三角洲湿地水文连通及驱动力分析[J]. *水文*, 2023, 43(3): 112-117. [CHEN Kexin, CONG Pifu, QU Limei, et al. Hydrological connectivity and driving force analysis of wetlands in the Yellow River Delta[J]. *Hydrology*, 2023, 43(3): 112-117.]
- [14] 熊燕. 土壤质量和土壤重金属污染评价方法综述[J]. *贵阳学院学报: 自然科学版*, 2021, 16(3): 92-95. [XIONG Yan. Review of soil quality and soil heavy metal pollution evaluation methods[J]. *Journal of Guiyang College (Natural Science Edition)*, 2021, 16(3): 92-95.]
- [15] 刘晶, 滕彦国, 崔艳芳, 等. 土壤重金属污染生态风险评价方法综述[J]. *环境监测管理与技术*, 2007, 19(3): 6-11. [LIU Jing, TENG Yanguo, CUI Yanfang, et al. A review of ecological risk assessment methods for soil heavy metal pollution[J]. *Environmental Monitoring Management and Technology*, 2007, 19(3): 6-11.]
- [16] 刘德成, 李玉倩, 郑纯静, 等. 土壤重金属污染风险评价方法对比研究[J]. *河北农业科学*, 2020, 24(4): 89-95. [LIU Decheng, LI Yuqian, ZHENG Chunjing, et al. Comparative study of risk assessment methods for soil heavy metal pollution[J]. *Hebei Agricultural Science*, 2020, 24(4): 89-95.]
- [17] 田文, 顾延生, 丁俊傑. 江汉平原仙桃地区湿地沉积物重金属污染风险评价[J]. *安全与环境工程*, 2023, 30(4): 243-252. [TIAN Wen, GU Yansheng, DING Junjie. Risk assessment of heavy metal contamination in wetland sediments in Xiantao, Jianghan Plain[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2023, 30(4): 243-252.]
- [18] 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(2): 7-9. [TENG Yanguo, TOU Xiangguo, NI Shijun, et al. Evaluation of heavy metal contamination in sediments using the geoaccumulation index: Influence of selecting the geochemical background[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(2): 7-9.]
- [19] 李逸平, 王香莲, 金如意, 等. 鄱阳湖南矶山湿地沉积物重金属污染特征及潜在生态风险[J]. *环境污染与防治*, 2022, 44(11): 1491-1496, 1502. [LI Yiping, WANG Xianglian, JIN Ruyi, et al. Characteristics of heavy metal contamination and potential ecological risk in the sediments of Nanjishan Wetland, Poyang Lake[J]. *Environmental Pollution and Prevention*, 2022, 44(11): 1491-1496, 1502.]
- [20] 陈晨, 王兵, 王寒冰, 等. 山东东营市三角洲地区土壤重金属污染及生态风险评价[J]. *自然保护地*, 2023, 3(3): 94-102. [CHEN Chen, WANG Bing, WANG Hanbing, et al. Evaluation of soil heavy metal pollution and ecological risk in the delta area of Dongying City, Shandong Province[J]. *Nature Reserve*, 2023, 3(3): 94-102.]
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134. [WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geoprobess: principles and perspectives[J]. *Journal of Geography*, 2017, 72(1): 116-134.]
- [22] Cheng Q, Lou G, Huang W, et al. Assessment and potential sources of metals in the surface sediments of the Yellow River Delta, Eastern China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2017, 24(21): 17446-17454.
- [23] 国家环境保护局. GB15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995. [National Environmental Protection Bureau. GB15618-1995 Quality Standard for Soil Environment [S]. Beijing: China Standard Press, 1995.]
- [24] 涂春霖, 和成忠, 马一奇, 等. 珠江流域沉积物重金属污染特征、生态风险及来源解析[J]. *地学前缘*, 2024, 31(3): 410-419. [TU Chunlin, HE Chengzhong, MA Yiqi, et al. Characterization, ecological risk and source analysis of heavy metal contamination in sediments of the Pearl River Basin[J]. *Geological Frontiers*, 2024, 31(3): 410-419.]
- [25] 张明, 陈国光, 刘红樱, 等. 长江三角洲地区土壤重金属含量及其分异特征[J]. *土壤通报*, 2012, 43(5): 1098-1103. [ZHANG Ming, CHEN Guoguang, LIU Hongzhu, et al. Heavy metal contents of soils and their differentiation characteristics in the Yangtze River Delta region[J]. *Soil Bulletin*, 2012, 43(5): 1098-1103.]
- [26] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 67-81. [DUAN Yunying, PEI Shaofeng, LIAO Mingjian, et al. Distribution characteristics, pollution assessment and source analysis of heavy metals in surface sediments of Laizhou Bay[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 67-81.]
- [27] 庞绪贵, 代杰瑞, 胡雪平, 等. 山东省土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 2018, 34(1): 39-43. [PANG Xugui, DAI Jieri, HU Xueping, et al. Soil geochemical background values in Shandong Province[J]. *Shandong Land Resources*, 2018, 34(1): 39-43.]
- [28] 庞绪贵, 代杰瑞, 陈磊, 等. 山东省17市土壤地球化学背景值[J]. *山东国土资源*, 2019, 35(1): 46-56. [PANG Xugui, DAI Jieri, CHEN Lei, et al. Soil geochemical background values of 17 cities in Shandong Province[J]. *Shandong Land Resources*, 2019, 35(1): 46-56.]
- [29] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys[C]. *Soil spatial variability*, 1985: 166-194.
- [30] 韦彩嫩, 牛红义, 吴群河, 等. 珠江(广州河段)表层沉积物中重金属

- 的粒度效应[J]. *环境科学与管理*, 2011, 36(10): 53-56, 46. [WEI Caineng, NIU Hongyi, WU Qunhe, et al. Particle size effects of heavy metals in surface sediments of the Pearl River (Guangzhou River Section)[J]. *Environmental Science and Management*, 2011, 36(10): 53-56, 46.]
- [31] 赵玉庭, 孙珊, 由丽萍, 等. 莱州湾沉积物粒度与重金属分布特征[J]. *海洋科学*, 2021, 45(3): 43-50. [ZHAO Yuting, SUN Shan, YU Liping, et al. Characteristics of sediment particle size and heavy metal distribution in Laizhou Bay[J]. *Marine Science*, 2021, 45(3): 43-50.]
- [32] 李伟迪, 崔云霞, 曾撑撑, 等. 太浦运河流域农田土壤重金属污染特征与来源解析[J]. *环境科学*, 2019, 40(11): 5073-5081. [LI Weidi, CUI Yunxia, ZENG Zandao, et al. Characteristics and sources of heavy metal pollution in farmland soils in the Taige Canal Basin[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11): 5073-5081.]
- [33] Shan C Q, Zhang Z W, Zhao D Y, et al. Heavy Metal Contamination in soils from a major planting base of winter Jujube in the Yellow River Delta, China[J]. *Processes*, 2022, 10(9): 1777.
- [34] 郑美洁, 郑冬梅, 辛愿, 等. 互花米草入侵对黄河三角洲湿地表层沉积物金属元素分布格局的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(10): 2368-2375. [ZHENG Meijie, ZHENG Dongmei, XIN Wang, et al. Impacts of *M. alterniflora* invasion on the distribution pattern of metal elements in surface sediments of the Yellow River Delta wetland[J]. *Journal of Ecology*, 2023, 42(10): 2368-2375.]
- [35] 张娜, 熊健, 李伟, 等. 巴嘎雪湿地土壤理化性质及其重金属风险评价[J]. *高原科学研究*, 2023, 7(2): 38-50. [ZHANG Na, XIONG Jian, LI Wei, et al. Physicochemical properties of soil and heavy metal risk assessment in Bagaxue wetland[J]. *Plateau Science Research*, 2023, 7(2): 38-50.]
- [36] Förstner U, Wittmann G T W. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1979.
- [37] El Azzi D, Probst J L, Teisserenc R, et al. Trace element and pesticide dynamics during a flood event in the save agricultural watershed: soil-river transfer pathways and controlling factors[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, 227(12): 1-19.
- [38] 马泉来, 万小强, 杨崇科, 等. 南太行典型区小流域土壤铅含量空间分异及影响因素分析[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(18): 226-233. [MA Quanlai, WAN Xiaoqiang, YANG Chongke, et al. Spatial differentiation of soil lead content in small watersheds in the South Taihang Typical Area and analysis of influencing factors[J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2023, 39(18): 226-233.]