

尉浩然, 王占金, 孙菲菲, 等. 威海湾柱状沉积物重金属含量特征、污染风险评估及来源探讨[J]. 海洋地质前沿, 2025, 41(7): 32-42.

YU Haoran, WANG Zhanjin, SUN Feifei, et al. Heavy metal content, source, and pollution risk assessment in core sediments of Weihai Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2025, 41(7): 32-42.

# 威海湾柱状沉积物重金属含量特征、 污染风险评估及来源探讨

尉浩然<sup>1</sup>, 王占金<sup>2</sup>, 孙菲菲<sup>1</sup>, 尹砚军<sup>1\*</sup>, 朱龙海<sup>1,3</sup>, 胡日军<sup>1,3</sup>

(1 中国海洋大学海洋地球科学学院, 青岛 266100; 2 山东省生态环境规划研究院, 济南 250000;

3 中国海洋大学, 海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

**摘要:**根据威海湾 WHW-06 孔柱状沉积物样品 AMS<sup>14</sup>C 测年、粒度和重金属元素含量的测试结果, 分析了威海湾柱状沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Hg 7 种重金属元素含量的垂向分布特征; 采用富集系数 (EF)、地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 和潜在生态风险指数 (RI) 对沉积物重金属元素进行了风险评估; 结合相关性分析和主成分分析, 探讨了威海湾沉积物重金属元素的来源。结果表明, 威海湾柱状沉积物中 As、Cd、Hg 含量自下而上总体呈波动上升的趋势; Cr、Cu、Pb、Zn 含量自下而上总体呈先增加后减少的趋势, 与柱状沉积物平均粒径的变化趋势基本一致。富集系数 (EF) 评价表明, 柱状沉积物部分深度的 As 和 Hg 存在轻微富集; 地累积指数 ( $I_{geo}$ ) 评价表明, 柱状沉积物中 Hg 总体呈轻度污染状态, As、Cd 在部分深度呈轻度污染状态; 潜在生态风险指数 (RI) 表明, 重金属呈中风险等级的样品主要集中在柱状沉积物上部。相关性分析和主成分分析结果表明, 柱状沉积物中 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 元素主要为自然来源, As 和 Hg 元素含量的变化可能受人类活动的影响。经归一化校正后, 过去 200 a 以来重金属元素含量呈现急剧升高的趋势, 可能与工业革命以来人类活动排放污染物有关。

**关键词:**威海湾; 重金属含量; 柱状沉积物; 污染风险评估; 污染来源

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.010

## 0 引言

重金属是最为常见的污染物之一, 具有毒性、不可降解性和生物蓄积性等特点, 其引发的环境污染问题备受国内外学者关注<sup>[1-3]</sup>。自工业革命以来, 快速增长的工业活动加速了化石燃料和矿产资源的消耗, 产生的大量重金属污染物以废渣、废水及废气的形式被排放至环境中, 并通过河流输入、大气沉降、近海排污等方式进入海洋<sup>[4-7]</sup>, 最终经化学

吸附、物理沉淀过程进入海洋沉积物中蓄积。通过地表径流和近海排污输入的重金属主要沉积在河口、海湾、海岸等近海海域, 当其含量超过一定阈值后会对海洋生态系统产生威胁<sup>[8-10]</sup>。海湾是海岸带中人类开发活动集中的区域之一, 由于其具有水动力环境相对较弱、水体交换能力较差等特点, 也是海洋生态系统最为敏感和脆弱的区域。因此, 对海湾沉积物的重金属污染状况进行风险评估, 探讨其来源, 对于海湾环境治理、促进沿湾地区经济可持续发展具有指导意义<sup>[11-13]</sup>。

威海湾位于山东半岛东北部, 资源和环境优势明显, 该海域港口、养殖和旅游等海洋开发活动较为频繁。密集的人类活动导致威海湾附近海域出现了重金属污染问题, 杨立平等<sup>[14]</sup>对威海湾表层沉积物重金属污染程度的评价结果表明, 元素 Cd 对威海湾生态环境有潜在影响; WU 等<sup>[15]</sup>分析了威

收稿日期: 2024-01-08

资助项目: 国家自然科学基金(41776059)

第一作者: 尉浩然(1999—), 女, 在读硕士, 主要从事海洋沉积方面的研究工作. E-mail: yuhaoran990118@163.com

\* 通讯作者: 尹砚军(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事海洋沉积方面的研究工作. E-mail: yinyanjuan@ouc.edu.cn

海市沿海地区表层沉积物中重金属含量的空间分布特征和污染情况,发现元素 Cd 和 Hg 对威海湾西部的生态环境有潜在影响;朱颖涛等<sup>[16]</sup>对 5 000~8 500 cal a BP 威海湾柱状沉积物中的重金属污染状况进行了评价,结果表明,该时期元素 Cr 的含量存在轻微超标。目前,对晚全新世特别是工业革命以来,在自然与人类活动的双重影响下,威海湾重金属元素的含量及潜在风险的系统性研究较少。为进一步了解威海湾沉积物的重金属污染历史及其影响因素,本研究根据威海湾柱状沉积物重金属元素含量的测试结果,分析了晚全新世特别是工业革命以来,威海湾沉积物重金属元素的含量变化特征,采用富集系数(EF)、地累积指数( $I_{geo}$ )和潜在生态风险指数(RI)对海域重金属的生态风险进行评价,探讨其来源,为进一步认识威海湾重金属的污染历史提供参考,对于海湾污染治理和可持续发展具有指导意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样品采集

威海湾位于山东半岛东北部(图 1),海岸线长约 26 km,海域面积约 54 km<sup>2</sup>,平均水深约 7 m,属于半封闭型海湾。湾内有凤林河等季节性河流携带沉积物汇入;湾外分布有山东半岛泥质沉积区,沉积物主要来源于黄河入海沉积物<sup>[17-18]</sup>。

2021 年 9 月,中国海洋大学通过渔船(鲁威渔 60012)搭建的海上平台在威海湾钻取了 WHW-06 孔(地理位置为 37°28'N、122°11'E)柱状沉积物样

品,长约 220 cm。本研究选取柱状沉积物上部 0~120 cm 的样品进行分析,以 1 cm 为间隔进行剖分,所有样品在分析前均进行冷冻保存。

### 1.2 测试方法

柱状沉积物上部 0~20 cm 按照 2 cm 间隔取样、20~120 cm 按照 4 cm 间隔取样,共取得 35 个样品,进行沉积物粒度与元素测试。

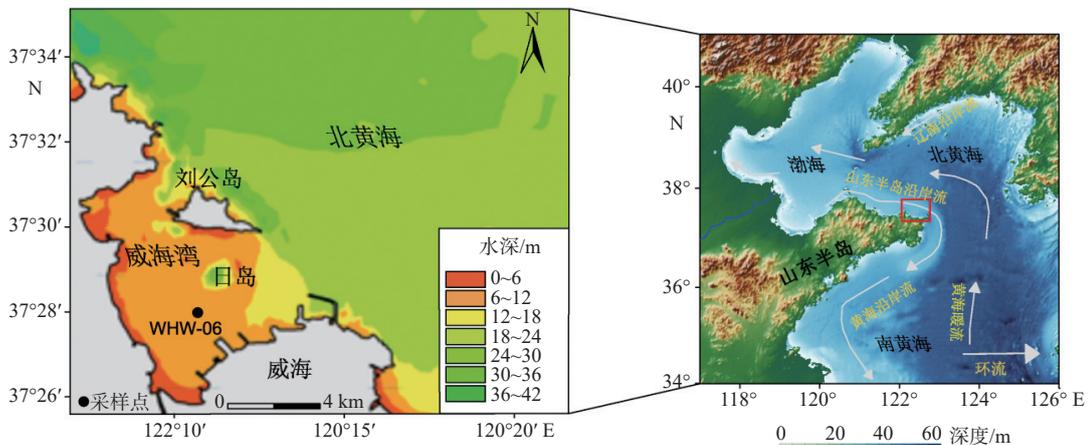
粒度和元素分析测试由中国海洋大学海洋地球化学与环境监测实验室完成。其中,粒度使用 Mastersizer 2000 型激光粒度仪进行测试,测试范围为 0.02~2 000 μm,粒径分辨率为 0.01Φ,重复实验的相对误差<3%。元素测试中,采用等离子质谱分析方法(ICP-MS)测定样品中元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Th 的含量;采用 AFS-920 型原子荧光光度计测定元素 As、Hg 的含量。元素含量的测定分别进行了平行样品和标准样品测试,结果显示相对误差<5%。

AMS<sup>14</sup>C 年代测试由美国 BETA 实验室完成,测试样品选取底栖有孔虫混合种洁净壳体。测试结果经过<sup>13</sup>C 分馏校正得到常规年龄,使用 BetaCal 4.20 软件对常规年龄经过树轮校正、全球海洋碳库校正得到日历年龄,设定表层样品年龄为 2021AD,其他位置样品的年代可使用线性内插法获得,年代测试及校正结果如表 1 所示。

### 1.3 评价方法

#### 1.3.1 富集系数

富集系数(EF)可以有效地表示区域环境内重金属元素的富集程度和污染状况<sup>[19]</sup>,其公式为:



环流系统改绘自文献 [20]

图 1 研究区及采样点位置

Fig.1 Location of the study area and sampling site

表1 WHW-06孔 AMS<sup>14</sup>C年代数据结果  
Table 1 AMS<sup>14</sup>C dating results of Core WHW-06

样品编号	深度/cm	测试材料	<sup>14</sup> C年龄/a BP	年代校正/cal a BP	日历年龄/cal a BP
WHW06-83	83~84	混合底栖有孔虫	2 310±30	1 906~1 592	1 749
WHW06-122	122~123	混合底栖有孔虫	2 840±30	2 619~2 261	2 440

$$EF = (C_i/C_{ref})/(B_i/B_{ref}) \quad (1)$$

式中:  $C_i$  为重金属元素  $i$  的实测含量;

$C_{ref}$  为参考元素的实测含量;

$B_i$  为重金属元素  $i$  的背景值;

$B_{ref}$  为参考元素的背景值。

ACEVEDO-FIGUEROA 等<sup>[19]</sup> 根据 EF 的大小将沉积物中重金属的富集程度划分为 7 个等级: EF < 1 为无富集; EF 介于 1~3 为轻微富集; EF 介于 3~5 为中度富集; EF 介于 5~10 为中重度富集; EF 介于 10~25 为重度富集; EF 介于 25~50 为严重富集; EF > 50 是极严重富集。

### 1.3.2 地累积指数

地累积指数( $I_{geo}$ )是评价水环境沉积物中重金属污染情况的定量指标,该方法综合考虑了地壳成岩过程中的背景值、重金属元素的背景值及人为干扰等多重因素<sup>[21]</sup>,其公式为:

$$I_{geo} = \text{Log}_2(C_i/(K \times B_i)) \quad (2)$$

式中:  $K$  为修正系数,通常取值为 1.5。

MÜLLER<sup>[21]</sup> 根据  $I_{geo}$  的大小将沉积物中重金属的污染程度划分为 7 个等级:  $I_{geo} \leq 0$  为无污染;  $I_{geo}$  介于 0~1 为轻度污染;  $I_{geo}$  介于 1~2 为偏中度污染;  $I_{geo}$  介于 2~3 为中度污染;  $I_{geo}$  介于 3~4 为偏重污染;  $I_{geo}$  介于 4~5 为重度污染;  $I_{geo} > 5$  为严重污染。

### 1.3.3 潜在生态风险指数

潜在生态风险指数(RI)由 HAKANSON<sup>[22]</sup> 提出,综合考虑了重金属元素的含量、毒性与区域影响值,弥补了地累积指数等方法只能单独反映某种重金属元素污染情况的不足,具有综合评价某地区多种重金属污染复合效应的优势<sup>[23]</sup>,其公式为:

$$C_f^i = C_i/B_i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (5)$$

式中:  $C_f^i$  为重金属元素  $i$  的污染系数;

$E_r^i$  为重金属元素  $i$  的潜在生态风险指数;

$T_r^i$  为重金属元素  $i$  的毒性响应系数,重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg 对应的毒性响应系

数分别为 10、30、2、5、5、1、40;

RI 为多种重金属元素综合作用的潜在生态风险指数。

$E_r^i$  和 RI 的评价标准如表 2 所示。

表2 潜在生态风险指标等级划分

Table 2 Classification of potential ecological risk

$E_r^i$	RI	潜在生态风险等级
<40	<150	低风险
40~80	150~300	中风险
80~160	300~600	较高风险
160~320	≥600	高风险
≥320		极高风险

评价沉积物中重金属的污染情况时,不同的背景值会显著影响沉积物的环境质量评价结果。如果以页岩和上地壳的重金属含量为背景值,由于不同地区的地质背景存在明显差异,污染评价的结果可能存在偏差<sup>[24]</sup>,因此,使用当地未受污染影响的局部背景值进行风险评估可能更为合适<sup>[25]</sup>。本文在进行重金属风险评估时,选择惰性元素 Al 作为参考元素,选用本地未受污染影响的深层沉积物,即威海湾 5 000~8 500 cal a BP 沉积物的重金属元素平均含量<sup>[16]</sup> 为背景值。

## 1.4 统计方法

使用 SPSS25.0 软件对 7 种重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg 和元素 Th 进行相关性分析和主成分分析(PCA)。使用 Pearson 相关系数来衡量变量之间的线性关系。在检验 KMO 值(Kaiser-Meyer-Olkin) > 0.5 后进行主成分分析,提取出的主成分需能解释 85% 及以上的数据。对于所有统计检验,使用 0.05 的概率表示统计学显著性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 重金属含量垂向分布特征

WHW-06 孔柱状沉积物重金属元素 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Hg 的平均含量及范围如表 3 所

示, 平均含量由大到小依次为:  $Zn > Cr > Cu > Pb > As > Cd > Hg$ 。重金属元素的垂向分布特征如图 2 所示, As、Cd、Hg 元素含量自下而上总体呈波动上升的变化趋势。Cr、Cu、Pb、Zn 元素含量在柱状样 28~20 cm 深度处存在峰值, 自下而上总体呈先

增加后减少的变化趋势; 并未表现出自下而上一直增加的趋势, 而是与沉积物平均粒径的变化趋势基本一致。说明除人类活动产生的重金属输入外, 沉积物粒度也是影响威海湾沉积物重金属含量的重要因素。

表 3 WHW-06 孔沉积物重金属元素含量及污染评价结果

Table 3 Heavy metal content and assessment of heavy metal pollution in Core WHW-06 sediments

	As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg
含量范围/( $\mu\text{g/g}$ )	5.63~21.46	0.10~0.16	69.20~85.50	21.93~33.98	19.69~28.50	66.98~99.36	0.01~0.03
平均含量/( $\mu\text{g/g}$ )	11.9	0.13	78.99	27.89	24.33	84.1	0.02
EF范围	0.38~1.35	0.49~0.82	0.42~0.64	0.35~0.63	0.39~0.68	0.38~0.68	0.65~1.26
EF平均值	0.78	0.61	0.49	0.45	0.48	0.49	0.92
$I_{\text{geo}}$ 范围	-0.98~0.95	-0.58~0.08	-0.77~-0.47	-1.04~-0.41	-0.21~-0.09	-0.91~-0.34	-0.15~0.82
$I_{\text{geo}}$ 平均值	-0.008	-0.254	-0.583	-0.707	-0.142	-0.592	0.314
$E_r^d$ 范围	7.61~29.04	30.17~47.44	1.76~2.17	3.64~5.64	3.98~5.77	0.80~1.18	54.03~105.91
$E_r^d$ 平均值	16.1	37.99	2.01	4.63	4.92	1	75.69

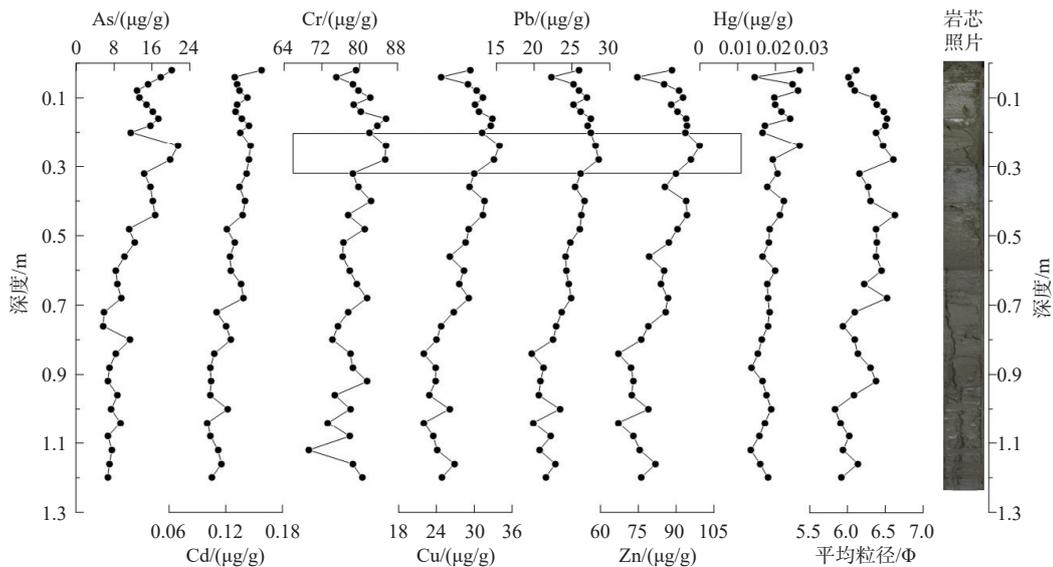


图 2 WHW-06 孔沉积物重金属元素含量及粒度垂向变化特征

Fig.2 Vertical variation of heavy metal content and particle size in Core WHW-06 sediments

## 2.2 重金属环境风险评估

### 2.2.1 富集系数

富集系数通常用于评估沉积物中的环境污染状况、区分重金属的自然来源和人为来源。根据 ACEVEDO-FIGUEROA 等<sup>[19]</sup>提出的标准,  $EF < 1$  表示重金属主要来自地壳或自然风化作用, 而  $EF > 1$  表示重金属元素可能是人为来源。WHW-06 孔柱状沉积物重金属富集系数计算结果如表 3、图 3a 所示, 不同深度的 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 元素的 EF 均  $< 1$ , 表现为无富集, 表明其主要来自于地壳或自

然风化产物; 沉积物中部分深度 As、Hg 元素的 EF 介于 1~3, 表现为轻微富集, 说明对应深度的 As 和 Hg 元素可能受到人为源输入的影响。

### 2.2.2 地累积指数

WHW-06 孔柱状沉积物中 As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Hg 元素的  $I_{\text{geo}}$  计算结果(表 3、图 3b)表明, Cr、Cu、Pb、Zn 的  $I_{\text{geo}}$  在所有深度中均  $< 0$ , 为无污染状态; As、Cd 的  $I_{\text{geo}}$  均值  $< 0$ , 但部分深度 As、Cd 的  $I_{\text{geo}}$  介于 0~1, 说明相应深度的 As、Cd 为轻度污染状态; Hg 的  $I_{\text{geo}}$  均值为 0.314, 多数样品中 Hg 的  $I_{\text{geo}}$  介于 0~1, 表明 Hg 元素呈总体轻度污染状态。

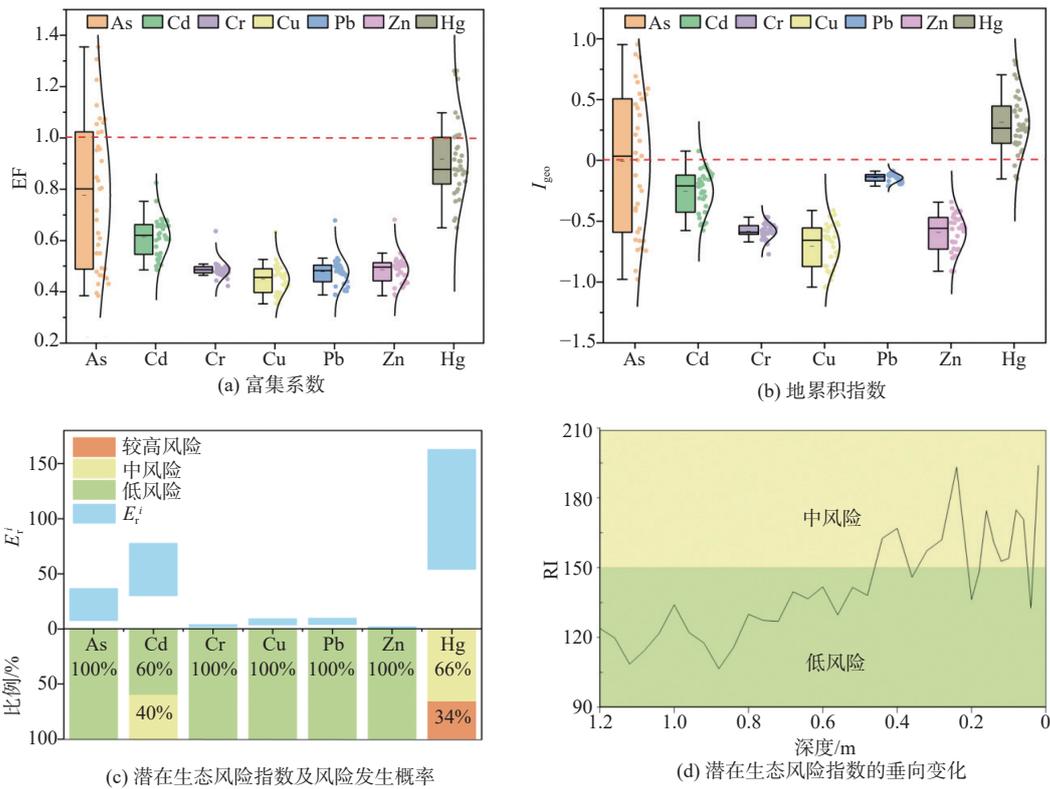


图3 WHW-06孔沉积物重金属污染评价结果

Fig.3 Assessment results of heavy metal pollution in Core WHW-06 sediments

2.2.3 潜在生态风险指数

WHW-06孔柱状沉积物潜在生态风险指数  $E_r^i$  的计算结果(表3、图3c)表明,该风险指数由高到低分别为  $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$ ,所有深度的As、Cr、Cu、Pb、Zn元素和柱状样60%的样品中Cd元素的  $E_r^i$  均  $< 40$ ,处于低风险状态;柱状样40%的样品中Cd和66%样品中Hg的  $E_r^i$  介于40~80,为中风险状态;柱状样34%的样品中Hg元素的  $E_r^i$  介于80~160,为较高风险状态。根据单项潜在生态风险指数来看,研究区历史时期内Cd和Hg元素存在一定的生态风险,尤其是Hg元素的潜在生态风险指数处于高值状态,应多加关注。柱状样综合潜在生态风险指数(RI)的范围为106.53~193.96,其中,66%样品的  $RI < 150$ ,表现为低风险,34%样品的RI介于150~300,表现为中风险,中风险等级的样品多集中于柱状沉积物的上部,如图3d所示。

2.3 重金属来源探讨

2.3.1 重金属的可能来源

火山活动、基岩风化侵蚀等自然作用产生的重金属含量相对较低,对生态系统的威胁相对较小。然而,晚全新世以来,人类活动对沉积环境的影响

可与自然作用相媲美<sup>[26]</sup>,尤其是工业革命以来,工农业废水排放、沿海工程建设和港池航道疏浚等人类活动不可避免地增加了沉积物重金属含量。为揭示研究区重金属含量的影响因素(自然或人为因素),对As、Cd、Cr、Cu、Pb、Zn、Hg和Th元素进行了相关性分析和主成分分析(PCA)。

相关性分析结果如图4所示,除了Hg、As元素外,大多数重金属元素之间都呈显著正相关,且与Th元素之间有较高的相关性,说明多数重金属元素存在同源性。Hg元素和Cd、Cr、Pb元素之间的相关系数  $< 0.5$ ,且与Th元素的相关系数为0.3;

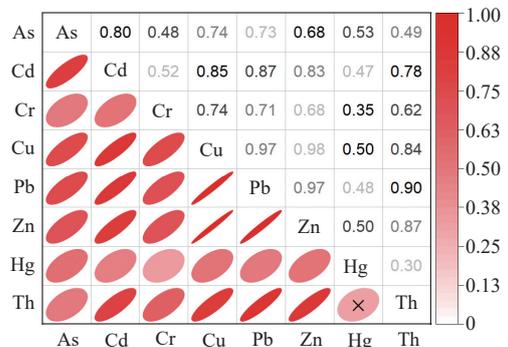


图4 WHW-06孔沉积物重金属元素与Th元素的相关性分析

Fig.4 Correlation between heavy metal elements and Th in Core WHW-06 sediments

As 元素同样与 Cr、Th 元素的相关性较低, 说明影响 As、Hg 元素含量的因素与其他元素之间存在差异。

为进一步确定影响研究区重金属含量的因素, 对 7 种重金属元素和 Th 元素进行了主成分分析。KMO 值为 0.814 (>0.5), Bartlett 检验对应 *P* 值为 0.000 (<0.05), 说明数据适合进行主成分分析。研究区柱状沉积物重金属元素提取出 2 个主成分, 可解释 84.80% 的方差(表 4)。

表 4 WHW-06 孔沉积物重金属元素主成分分析  
Table 4 Principal component analysis of heavy metal elements in Core WHW-06 sediments

元素	PC1	PC2
As	0.51	0.71
Cd	0.75	0.51
Cr	0.76	0.17
Cu	0.88	0.42
Pb	0.91	0.39
Zn	0.89	0.40
Hg	0.14	0.91
Th	0.93	0.13
方差百分比/%	58.35	26.45

第一主成分(PC1)占总方差的 58.35%, 其特点为 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 和 Th 元素的高载荷, 相关性分析结果也显示, 这些重金属元素均与 Th 呈显著正相关, 表明这 5 种重金属元素与 Th 元素有相似的来源。Th 作为亲石元素, 与铝硅酸盐有关, 主要集中在岩石圈, 在海洋沉积物中的含量和分布受到陆源物质组成的控制<sup>[27]</sup>, 因此, PC1 可能表示自然来源对研究区重金属的影响, 在 PC1 上高载荷的重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb、Zn 历史时期内主要来自地壳物质或自然过程。

第二主成分(PC2)占总方差的 26.45%, 其特点为 As 和 Hg 元素的高载荷, 两者与 Th 元素的相关性较低, 结合地累积指数分析, 沉积物中 As 和 Hg 元素存在轻度污染, PC2 可能代表人类活动的影响。As 元素除了自然来源, 也可能来自于农业生产中农药和海水养殖中磷肥的使用、矿石的冶炼、发电厂化石燃料的燃烧等人类活动<sup>[28]</sup>。研究区的 As 元素在 PC1 和 PC2 中均有较高的载荷, 说明 As 元素含量除了受自然过程影响外, 也受到工农业生产排放污染物的影响<sup>[28-29]</sup>。自然条件下 Hg 元素来源于地质活动、地球脱气等过程, 受采矿、燃烧化石燃料等人类活动的影响, 排放至大气中的 Hg 含量比自然

水平增加了 450%, 大气中的 Hg 通过沉降进入海洋, 进而造成海洋沉积物中 Hg 含量增加<sup>[30]</sup>。研究区 Hg 元素在 PC2 的载荷远大于 PC1 的载荷, 说明 Hg 含量主要受人类活动的影响。因此, As、Hg 元素在 PC2 上的高载荷说明其在历史时期内受人类活动的影响明显。

### 2.3.2 山东半岛典型海湾重金属元素含量对比

WHW-06 孔柱状样不同深度的 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg 元素均符合《海洋沉积物质量标准》(GB 18668—2002)中的一类标准<sup>[31]</sup>, 部分深度的 As、Cr 元素含量超过一类标准但符合二类标准。为更好地了解威海湾沉积物的重金属元素含量水平, 将研究区沉积物的重金属含量与本地深层沉积物及山东半岛其他 9 个典型海湾的重金属含量进行了比较, 结果如表 5 所示。

山东半岛 10 个典型海湾沉积物中部分重金属元素的含量大致相当, 由于不同海湾人类开发活动的差异, 部分重金属元素的含量存在差异。比如: WHW-06 孔柱状样中的 As 含量与四十里湾、胶州湾的含量相当, Cd 含量与荣成湾的含量相当, Hg 含量与桑沟湾的含量相当, 其他重金属元素含量更接近 WH-05 孔柱状样(威海湾 5 000~8 500 cal a BP 的深层沉积物)的含量。值得注意的是, 10 个典型海湾中, WHW-06 孔柱状沉积物的 Cr 含量最高, 是胶州湾的 3.6 倍, 但和威海湾本地深层沉积物的 Cr 含量相比, 并无明显增加, 说明威海湾沉积物的 Cr 的背景含量高。莱州湾的 As、Hg 含量在 10 个海湾中含量最高, 可能与招远金矿和莱州金矿有关<sup>[32]</sup>; 乳山湾的 Cd 含量最高, 可能是受到沿岸养殖业和盐业的影响<sup>[33]</sup>; 靖海湾的 Cu、Zn 含量在 10 个海湾中最高, 可能来自于周边城市污水和海事活动<sup>[34]</sup>; 荣成湾的 Pb 含量最高, 可能来源于机动车和渔船燃料燃烧产生的大气 Pb 沉降<sup>[35]</sup>。

### 2.3.3 沉积记录中重金属对人类活动的响应

为减少自然过程引起的沉积物重金属元素含量的波动, 定量地描述人为活动对重金属的影响, 需对重金属含量进行归一化校正。归一化是利用参比因子对重金属元素总量进行校正的方法, 参比因子通常为沉积物中某种未被污染的或具有某种特殊意义的组分含量<sup>[41]</sup>。沉积物粒度是影响重金属元素含量最为显著的自然因素, 重金属元素通常表现出明显的粒度效应, 即细粒沉积物拥有更大的比表面积、表面电荷和有机质含量, 更容易吸附重金属<sup>[42]</sup>。ZHOU 等<sup>[43]</sup>提出了一种稳健且经济的归

表5 山东半岛典型海湾重金属含量特征值一览表  
Table 5 Heavy metal content in typical bays of Shandong Peninsula

位置		As	Cd	Cr	Cu	Pb	Zn	Hg	来源
WHW-06孔	范围	5.63~21.46	0.10~0.16	69.20~85.50	21.93~33.98	19.69~28.50	66.98~99.36	0.01~0.03	本研究
	平均值	11.9	0.13	78.99	27.89	24.33	84.1	0.02	
WH-05孔 背景值	范围	2.22~11.99	0.06~0.13	66.11~84.38	20.74~34.22	18.75~29.50	65.74~92.22	0.01~0.05	文献[16]
	平均值	7.39	0.1	78.78	30.12	24.71	84.03	0.01	
莱州湾	范围	4.10~22.90	0.04~0.20	14.50~63.90	1.20~47.20	3.20~34.20	29.60~81.50	0.01~0.38	文献[32]
	平均值	13.9	0.1	37.3	16.8	12.3	51.6	0.07	
乳山湾	范围	6.73~10.33	0.51~1.73	\	8.43~20.95	12.48~36.92	30.29~65.46	0.03~0.06	文献[33]
	平均值	8.44	0.98	\	12.86	19.87	47.76	0.04	
靖海湾	范围	4.93~9.60	0.39~0.66	45.61~62.17	24.28~75.35	13.69~29.35	81.84~162.19	0.03~0.05	文献[34]
	平均值	7.06	0.57	56.29	37.79	19.91	115.63	0.04	
荣成湾	范围	\	0.07~0.28	23.50~48.60	8.40~30.60	17.40~51.10	45.10~97.30	\	文献[35]
	平均值	\	0.15	33	19.2	34.1	64	\	
四十里湾	范围	7.01~23.56	0.01~0.04	4.07~32.52	1.36~5.02	13.77~26.36	1.92~16.88	0.00~0.02	文献[8,36]
	平均值	11.7	0.03	\	2.98	19.08	8.84	0.01	
胶州湾	范围	5.30~19.00	0.03~0.11	5.00~51.00	4.20~28.00	5.10~18.00	12.00~58.00	0.01~0.05	文献[29,37]
	平均值	11.15	0.06	22.14	11.99	10.31	31.3	0.03	
桑沟湾	范围	4.44~9.12	0.23~0.54	\	8.03~17.50	8.57~14.90	35.33~55.87	0.01~0.02	文献[38]
	平均值	6.13	0.41	\	12.86	11.82	46.43	0.02	
龙口湾	范围	\	0.26~0.50	\	18.16~77.33	14.22~24.13	18.16~159.37	\	文献[39]
	平均值	\	0.34	\	33.13	18.95	79.19	\	
丁字湾	范围	3.26~24.00	0.02~0.30	22.50~85.80	3.20~21.50	2.10~23.60	8.00~76.40	0.00~0.04	文献[40]
	平均值	8.38	0.08	60.96	11.49	15.31	46.42	0.02	
沉积物质量一类标准值		20	0.5	80	35	60	150	0.2	文献[31]
沉积物质量二类标准值		65	1.5	150	100	130	350	0.5	

注：“\”为无数据。

一化方法,用于校正海洋沉积物中重金属元素的总量,即用重金属元素的含量除以细粒度组分的含量,来降低自然过程对重金属元素含量的影响,以揭示人类活动的影响。 $<2\ \mu\text{m}$ 的细粒沉积物是源区向陆架海长距离输送中最活跃的组分,相较其他的粒径范围富含更多的重金属元素<sup>[44]</sup>。

本文选取沉积物中 $<2\ \mu\text{m}$ 的组分含量为参比因子,对重金属元素的含量进行归一化校正,并采用 Z-score 方法对校正后的数据进行标准化处理,得到重金属元素受人类活动影响的历史曲线。经归一化校正后,重金属元素含量的垂向变化曲线如图 5 所示,在 490~91 BC 数值较高,表明此时期受人类活动的影响较强,这个阶段大致对应战国至西汉中期,黄河流域的农耕区大幅度拓展<sup>[45]</sup>,农业发展、森林砍伐和金属使用等人类活动对环境的影响有所加剧。归一化后的重金属元素含量在 91 BC~1800 AD 较低且在较窄的范围内波动,在 1800 AD

至今急剧上升,并保持较高水平,表明工业革命以来人类活动对环境的影响强烈。

将研究区的重金属含量归一化曲线和中国边缘海其他柱状样进行了比较,结果如图 6 所示,其中,38002、35009、31003 为使用  $4\ \mu\text{m}$  以下的组分含量为参比因子,对 Pb 元素进行归一化处理后得到的曲线<sup>[43]</sup>,B04 为使用比表面积为参比因子,对 Zn 元素进行归一化处理后得到的曲线<sup>[46]</sup>,ZK6 为使用 Al 元素的含量为参比因子,对 Hg 元素进行归一化处理后得到的曲线<sup>[47]</sup>。比较结果显示,虽然归一化选择的参比因子不同,但经校正的重金属元素含量在 1800 AD 后均呈现上升的趋势,表明工业革命之后,人为因素对重金属元素含量的影响越来越大。柱状沉积物 B04、31003、ZK6 距离长江口较近,高值区出现在 1920 AD 前,柱状沉积物 38002、35009、WHW-06 孔以黄河物质为主,高值区出现在 1920 AD 后,说明华北地区显著的重金属排放开

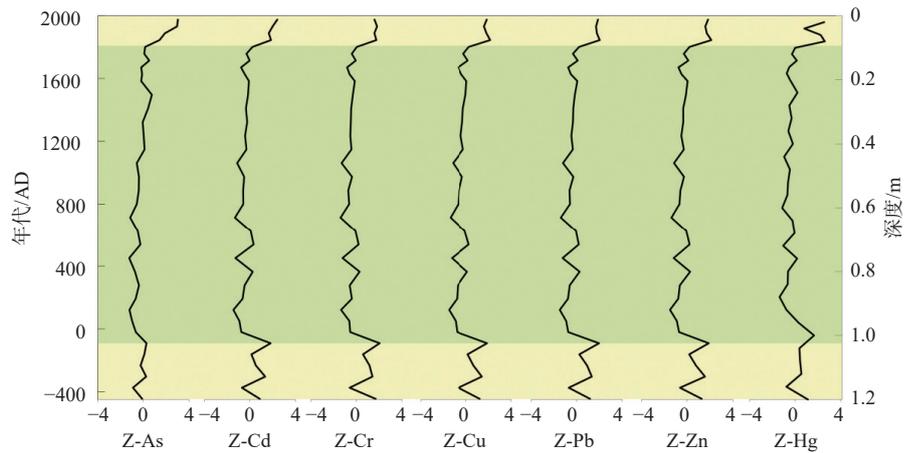


图 5 WHW-06 孔柱状样归一化后的重金属含量垂向分布

Fig.5 Normalized vertical distribution of heavy metals of Core WHW-06

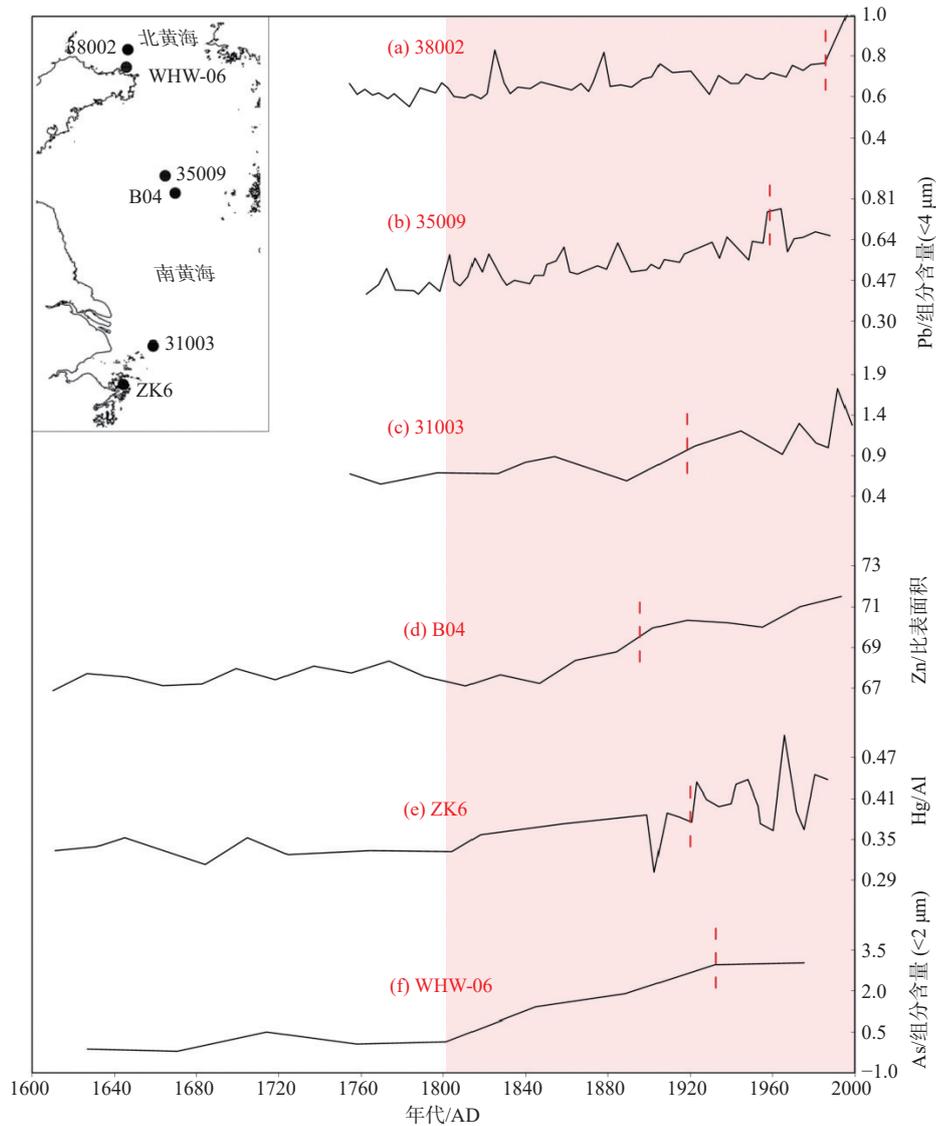


图 6 威海湾和中国边缘海代表性柱状样归一化后的重金属含量垂向分布

Fig.6 Normalized vertical distribution of heavy metals in Weihai Bay and China's marginal seas with representative core samples

始时间晚于华南地区, 这与中国近代工业的发展历史相一致<sup>[43]</sup>。

### 3 结论

(1) 威海湾柱状沉积物中重金属元素 As、Cd、Hg 总体呈自下而上波动上升的变化趋势, Cr、Cu、Pb、Zn 元素含量在 28~20 cm 深度存在一个峰值, 总体呈由下向上先增加后减少的变化趋势, 与平均粒径的变化趋势相似。

(2) WHW-06 孔柱状沉积物所有取样深度的 Cd、Cu、Pb、Zn、Hg 元素均符合《海洋沉积物质量标准》(GB 18668—2002)中的一类标准, 部分深度处的 As、Cr 元素含量超过一类标准但符合二类标准。富集系数评价表明, 研究区沉积物中重金属元素总体处于无富集的状态, 部分深度 As、Hg 元素存在轻微富集。地累积指数评价表明, Hg 元素总体处于轻度污染状态, 部分深度 As、Cd 元素存在轻度污染; 单项潜在生态风险指数评价表明, Cd 和 Hg 元素为威海湾应优先控制的重金属风险元素; 综合潜在生态风险指数评价表明, 中风险等级的样品多集中在柱状沉积物的上部。

(3) 相关性分析和主成分分析结果表明, 威海湾沉积物重金属元素 Cd、Cr、Cu、Pb 和 Zn 主要为自然来源, 而 As 和 Hg 元素主要受人为源输入的影响。归一化后的重金属元素含量在过去 200 多年来呈急剧上升的趋势, 可能与工业革命以来人类活动排放污染物有关。

#### 参考文献:

- [1] ACHARY M S, PANIGRAHI S, SATPATHY K K, et al. Health risk assessment and seasonal distribution of dissolved trace metals in surface waters of Kalpakkam, southwest coast of Bay of Bengal[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 6: 96-108.
- [2] LI G G, HU B Q, BI J Q, et al. Heavy metals distribution and contamination in surface sediments of the coastal Shandong Peninsula (Yellow Sea)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 76(1): 420-426.
- [3] LYU J X, HU R J, WANG N, et al. Distribution and movement of heavy metals in sediments around the coastal areas under the influence of multiple factors: a case study from the junction of the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130352.
- [4] SERRANO O, MATEO M A, DUEÑAS-BOHÓRQUEZ A, et al. The *Posidonia oceanica* marine sedimentary record: a Holocene archive of heavy metal pollution[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(22): 4831-4840.
- [5] XU F J, LIU Z Q, CAO Y C, et al. Assessment of heavy metal contamination in urban river sediments in the Jiaozhou Bay catchment, Qingdao, China[J]. *Catena*, 2017, 150: 9-16.
- [6] ZHAO J R, CHU F Y, JIN X L, et al. The spatial multiscale variability of heavy metals based on factorial kriging analysis: a case study in the northeastern Beibu Gulf[J]. *Acta oceanologica Sinica*, 2015, 34(12): 137-146.
- [7] YANG L J, MA X C, LUAN Z D, et al. The spatial-temporal evolution of heavy metal accumulation in the offshore sediments along the Shandong Peninsula over the last 100 years: anthropogenic and natural impacts[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 289: 117894.
- [8] ZHAO M W, WANG E K, XIA P, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in the intertidal zone environments of typical sea areas in China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 138: 397-406.
- [9] 徐刚, 刘健, 孔祥淮, 等. 近海沉积物重金属污染源分析[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(11): 47-52.
- [9] XU G, LIU J, KONG X H, et al. Analysis of sources of heavy metal pollution in near-shore sediments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(11): 47-52.
- [10] 贾磊, 刘文涛, 唐得昊, 等. 三亚湾及周边海域表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(12): 22-31.
- [10] JIA L, LIU W T, TANG D H, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments in Sanya Bay and surrounding waters[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2020, 36(12): 22-31.
- [11] GU X, XIN M, WANG J, et al. Historical records of trace metals in two sediment cores of Jiaozhou Bay, North China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 175: 113400.
- [12] 何彦龙, 袁一鸣, 王腾, 等. 典型半封闭海湾生态敏感性评估方法研究: 以惠州市大亚湾海域为例[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2022, 17(3): 49-56.
- [12] HE Y L, YUAN Y M, WANG T, et al. Study on the evaluation method of ecological sensitivity of typical semi closed bay: a case study of Daya Bay[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2022, 17(3): 49-56.
- [13] 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.
- [13] DUAN Y Y, PEI S F, LIAO M W, et al. Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay and their sources and pollution assessment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2021, 41(6): 67-81.
- [14] 杨立平, 张学超, 李晓敏, 等. 威海湾沉积物重金属含量分布及其潜在生态危害评价[J]. *海洋科学*, 2010, 34(6): 39-43.
- [14] YANG L P, ZHANG X C, LI X M, et al. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Weihai Bay[J]. *Marine Sciences*, 2010, 34(6): 39-43.

- [15] WU Z, LIU L L, ZHANG X X, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments along the Weihai coast, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 190: 114885.
- [16] ZHU Y T, ZHU L H, LIU T, et al. Sediment grain size and heavy metal pollution characteristics in the mud deposit area offshore the Shandong Peninsula before 5 000 years[J]. *Earth and Environmental Science*, 2021, 621(1): 12084.
- [17] 郝榕荣, 杨怡红, 朱龙海, 等. 环境敏感因子在威海湾沉积环境中的应用比较 [J]. *沉积学报*, 2023, 41(3): 763-777.  
HAO R R, YANG Y H, ZHU L H, et al. Application of environmentally sensitive factors in bay sedimentary environments[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(3): 763-777.
- [18] 钟伟, 朱龙海, 吴建政, 等. 威海湾夏季上升流现象及其对悬浮体运输的影响 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2020, 40(5): 58-67.  
ZHONG W, ZHU L H, WU J Z, et al. Summer upwelling current in Weihai Bay and its contribution to transportation of suspended matters[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2020, 40(5): 58-67.
- [19] ACEVEDO-FIGUEROA D, JIMÉNEZ B D, RODRÍGUEZ-SIERRA C J. Trace metals in sediments of two estuarine lagoons from Puerto Rico[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 141(2): 336-342.
- [20] LIU J, SAITO Y, KONG X H, et al. Geochemical characteristics of sediment as indicators of post-glacial environmental changes off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2009, 29(7): 846-855.
- [21] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 3(2): 108-118.
- [22] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [23] 陈明, 蔡青云, 徐慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展 [J]. *生态环境报*, 2015, 24(6): 1069-1074.  
CHEN M, CAI Q Y, XU H, et al. Research progress of risk assessment of heavy metals pollution in water body sediments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(6): 1069-1074.
- [24] YOUNG M S, ISHIGA H, ROSER P B, et al. Geochemistry of sediments in three sectors of Trincomalee Bay, Sri Lanka: provenance, modifying factors and present environmental status[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(1): 204-217.
- [25] XU F J, HU B Q, DOU Y G, et al. Prehistoric heavy metal pollution on the continental shelf off Hainan Island, South China Sea: from natural to anthropogenic impacts around 4.0 kyr BP[J]. *The Holocene*, 2017, 28(3): 455-463.
- [26] LI A N, HAN Z Z, WU X, et al. How did the climate and human activities modulate the sedimentary evolution of the central Yellow Sea mud, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 235: 105299.
- [27] KRITSANANUWAT R, KUMAR S S, FUKUSHI M, et al. Distribution of rare earth elements, thorium and uranium in Gulf of Thailand's sediment[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 73(7): 3361-3374.
- [28] SHAH S B. Heavy Metals in Scleractinian Corals[M]. Berlin: Springer Briefs in Earth Sciences, 2021: 14.
- [29] 张栋华, 吕钊臻, 邵主峰, 等. 胶州湾沉积物柱状样重金属垂向分布特征及其控制因素 [J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 664-669.  
ZHANG D H, LYU Z Z, SHAO Z F, et al. The vertical distribution patterns of heavy metals in a sediment core of the Jiaozhou Bay and their controlling factors[J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(5): 664-669.
- [30] SUN X S, HU L M, SUN X, et al. Mercury burial in modern sedimentary systems of the East China marginal seas: the role of coastal oceans in global mercury cycling[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2023, 37(9): e2023GB007760.
- [31] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 18668—2002, 海洋沉积物质量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.  
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. GB 18668—2002 Marine Sediment Quality[S]. Beijing: China Standard Press, 2004.
- [32] WANG Y, LING M, LIU R H, et al. Distribution and source identification of trace metals in the sediment of Yellow River Estuary and the adjacent Laizhou Bay[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2017, 97: 62-70.
- [33] 崔毅, 辛福言, 马绍赛, 等. 乳山湾沉积物重金属污染及其生态危害评价 [J]. *中国水产科学*, 2005, 12(1): 83-90.  
CUI Y, XIN F Y, MA S S, et al. Pollution of heavy metals in sediments and its evaluation of potential ecological harm in Rushan Bay, Shandong Peninsula[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2005, 12(1): 83-90.
- [34] 徐林波, 高勤峰, 董双林, 等. 靖海湾重金属污染及铅稳定同位素溯源研究 [J]. *环境科学*, 2013, 34(2): 476-483.  
XU L B, GAO Q F, DONG S L, et al. Study on heavy metal contaminations and the sources of Pb pollution in Jinghai Bay using the stable isotope technique[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(2): 476-483.
- [35] HUANG L L, PU X M, PAN J F, et al. Heavy metal pollution status in surface sediments of Swan Lake lagoon and Rongcheng Bay in the northern Yellow Sea[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(9): 1957-1964.
- [36] WANG C C, PAN D W, HAN H T, et al. Distribution and contamination assessment of arsenic and mercury in surface sediments from the intertidal zone of Yantai Sishili Bay, China[J]. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2018, 24(8): 2024-2035.
- [37] WANG X C, FENG H, MA H Q. Assessment of metal contamination in surface sediments of Jiaozhou Bay, Qingdao, China[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2007, 35(1): 62-70.
- [38] 蒋增杰, 方建光, 张继红, 等. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价 [J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 301-305.

- JIANG Z J, FANG J G, ZHANG J H, et al. Distribution features and evaluation on potential ecological risk of heavy metals in surface sediments of Sungan Bay[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1): 301-305.
- [39] 任鹏. 龙口湾海区沉积环境研究 [D]. 青岛: 青岛大学, 2016: 42.
- REN P. Study on sedimentary environment of Longkou Bay[D]. Qingdao: Qingdao University, 2016: 42.
- [40] 顾效源, 孔祥淮, 王伟, 等. 山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价 [J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(3): 13-21.
- GU X Y, KONG X H, WANG W, et al. Distribution and environment assessment of heavy metals in the sediments of Dingzi Bay, Shandong Province[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2019, 35(3): 13-21.
- [41] 刘素美, 张经. 沉积物中重金属的归一化问题: 以 Al 为例 [J]. *东海海洋*, 1998, 16(3): 49-56.
- LIU S M, ZHANG J. Normalization of heavy metals to aluminum in marine sediments[J]. *Donghai Marine Science*, 1998, 16(3): 49-56.
- [42] TANSEL B, RAFIUDDIN S. Heavy metal content in relation to particle size and organic content of surficial sediments in Miami River and transport potential[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2016, 31(4): 324-329.
- [43] ZHOU X, SUN L G, LIU Y, et al. Detection and calibration of anthropogenic lead emission in coastal sediments of China during the past 250 years[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22(20): 16164-16172.
- [44] YANG Z K, SUI H L, ZHANG Y A, et al. Reconstruction, assessment, and calibration of potential toxic elements (PTEs) in a 3 500-year-long sedimentary record off the northern coast of Shandong Peninsula, China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 312: 120075.
- [45] 蒋佳. 两汉气候变化与农业的发展 [D]. 长沙: 湖南大学, 2016: 17-20.
- JIANG J. Climate change and agricultural development in Han Dynasty[D]. Changsha: Hunan University, 2016: 17-20.
- [46] 郁通. 黄、东海陆架沉积物中重金属污染的长期记录与评价 [D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014: 43.
- YU T. Long-term record and evaluation of heavy metal pollution in the sediments of the Yellow Sea and the East China Sea continental shelf[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2014: 43.
- [47] 何中发, 杨守业, 赵宝成, 等. 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 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(2): 21-30.
- HE Z F, YANG S Y, ZHAO B C, et al. Changes in heavy metal elements in the sediments from Changjiang Estuary and their environmental responses in recent 1500 years[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(2): 21-30.

## Heavy metal content, source, and pollution risk assessment in core sediments of Weihai Bay

YU Haoran<sup>1</sup>, WANG Zhanjin<sup>2</sup>, SUN Feifei<sup>1</sup>, YIN Yanjun<sup>1\*</sup>, ZHU Longhai<sup>1,3</sup>, HU Rijun<sup>1,3</sup>

(1 College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2 Shandong Academy for Environmental Planning, Jinan 250101, China; 3 Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

**Abstract:** The vertical distribution characteristics of As, Cd, Cr, Cu, Pb, Zn and Hg in the core sediments of Weihai Bay were analyzed based on the results of AMS<sup>14</sup>C dating, particle sizes, and heavy metal content of WHW-06 core sediment samples in Weihai Bay. Enrichment factor (EF), geoaccumulation index ( $I_{geo}$ ), and potential ecological risk index (RI) were used to assess the risk of heavy metal pollution. Combined with correlation analysis and principal component analysis, the sources of the heavy metals were discussed. Results show that from bottom to top of the core section, the content of As, Cd, and Hg showed an overall upward trend, and the contents of Cr, Cu, Pb, and Zn increased first and then decreased, which is consistent with the variation trend of the average particle size. EF evaluation showed that As and Hg were slightly enriched at some depths. Index  $I_{geo}$  revealed slight Hg pollution in the core, and occasional As and Cd pollution at some depths. Index RI indicated a medium risk level of heavy metal pollution in mainly the upper part of the core. In addition, correlation analysis and principal component analysis presented that Cd, Cr, Cu, Pb, and Zn were mainly from the natural sources, and the changes in As and Hg contents may be affected by human activities. After data normalization, the heavy metal contents displayed a rapid upward trend in the past 200 years, which may be related to the pollutants from human activities since the industrial revolution.

**Key words:** Weihai Bay; heavy metal content; core sediments; pollution risk assessment; pollution source