DOI：10.19789/j.1004-9398.2026.04.015　　**Open Access**
文献引用：张然，邹旭梅，张德怀，等.威海市近岸海域表层沉积物重金属环境质量评价及来源分析[J].首都师范大学学报（自然科学版），2026，47（4）：138-146. Zhang Ran，Zou Xumei，Zhang Dehuai，et al. Environmental quality assessment and source analysis of heavy metals in coastal surface sediment of Weihai City[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2026，47（4）：138-146.

威海市近岸海域表层沉积物重金属环境质量评价及来源分析

张　然[1]，邹旭梅[1]，张德怀[1]，褚琳琳[1]，李　扬[2]，王静云[1*]

（1. 山东省威海生态环境监测中心，山东 威海　264200；
2. 威海市生态环境监控中心，山东 威海　264200）

摘要：为了解威海近岸海域表层沉积物重金属含量特征，本研究通过电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）及催化热解冷原子吸收分光光度法测定威海近岸海域15个站位表层沉积物中Cr、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb的含量，并利用地累计指数法、潜在生态风险法和毒性效应预测等方法评价环境品质。结果表明：威海近岸海域表层沉积物中，Cr、Cu、Zn、As和Pb平均质量分数分别为64.1、26.4、81.2、8.1、和26.2 mg/kg，Cd和Hg为124.0和20.7 μg/kg，重金属平均污染程度由高到低排序为Zn、Cu、Pb、Cr、Hg、As、Cd，但整体污染水平属于轻微，生态环境较好；单一重金属生态风险由高到低排序为Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn；除15号站位为中等生态风险外，其余站位均为低生态风险；威海沿岸沉积物重金属生物毒性危害的概率较低。除自然源外，沿岸海域表层沉积物中Cu、Zn、Cd、Pb可能来源于直排海污水、船舶排放和近海养殖活动，而As主要源于附近工业生产活动，部分来源于直排海污水。

关键词：威海海域；表层沉积物；重金属；污染评价；生态风险；来源分析
中图分类号：P736；X820　　**文献标志码**：A

Environmental quality assessment and source analysis of heavy metals in coastal surface sediment of Weihai City

Zhang Ran[1]，Zou Xumei[1]，Zhang Dehuai[1]，Chu Linlin[1]，Li Yang[2]，Wang Jingyun[1*]

（1. Shandong Weihai Ecological Environment Monitoring Center，Weihai Shandong　264200；
2. Weihai Ecological Environment Monitoring Center，Weihai Shandong　264200）

Abstract：In order to understand the characteristics of heavy metal content in the surface sediments of the coastal waters of Weihai，this study determined the contents of Cr，Cu，Zn，As，Cd，Hg and Pb in the surface sediments of 15 stations in the coastal waters of Weihai by using inductively coupled plasma mass spectrometry（ICP-MS）and catalytic hot injection cold atomic absorption spectrometry. The environmental quality was evaluated by using the geoaccumulation index method，potential ecological risk method and toxicity effect prediction method. The average mass fraction of Cr，Cu，Zn，As，Pb in

收稿日期：2025-07-30
*通信作者：15163577270@163.com

the surface sediments of the coastal waters of Weihai were 64.1, 26.4, 81.2, 8.1 and 26.2 mg/kg, Cd and Hg were 124.0 and 20.7 μg/kg, respectively. The average pollution degree of heavy metals from high to low was Zn, Cu, Pb, Cr, Hg, As, Cd, but the overall pollution level was slight and the ecological environment was good. The order of ecological risk of single heavy metals was Hg, Cd, As, Cu, Pb, Cr, Zn. Except for station 15 which was of medium ecological risk, the other stations were of low ecological risk. The probability of heavy metal biological toxicity hazard in the coastal sediments of Weihai was low. Apart from natural sources, the Cu, Zn, Cd, and Pb present in the surface sediments of the coastal waters may derived from direct discharge of sewage, ship emissions and offshore aquaculture activities, while As mainly comes from nearby industrial production activities, and some of it also comes from the discharge of treated sewage.

Keywords: Weihai sea area; surface sediment; heavy metals; pollution assessment; ecological risk; source analysis

CLC: P736; X820　　**DC**: A

0　引　言

近岸海域是人类活动最密集的海洋区域,其高质量发展对生态环境、经济和社会文化均有深远影响。然而沿海海域水质受人类活动影响深远,作为污染物之一的重金属主要通过大气沉降、水体输入、生物媒介和直接排放等方式进入水体影响水质[1-2],重金属又通过扩散作用从沉积物重新进入海水,或通过食物链进入动植物体内,最终在人体内富集,危害人类健康[3]。因此,掌握近岸沉积物重金属污染数据是护航海洋经济发展的必要举措。威海市地处山东半岛最东端,北、东、南共3面被黄海环绕,海洋资源非常丰富,但是近年来随着近海旅游的兴起,近海养殖、渔业活动、造船业和港口业务等蓬勃发展,对海洋生态环境造成一定程度的破坏,为了探明威海市近岸海域沉积物重金属的污染情况,也为了实现威海市海洋经济的可持续发展,助力山东省美丽海湾建设,本文对威海近岸海域沉积物重金属的污染和来源情况进行调查研究,以期为后续发展与保护提供支撑。

目前针对山东半岛近岸海域沉积物重金属的研究,多集中在渤海东部及黄海北部海域沉积物中的重金属含量、存在形态、分布特征、来源和评价等方面[4-11]。其中李淑媛等[7]指出北黄海区域沉积物中Cu、Pb、Zn、Cd和Hg不存在污染,但是部分位置存在As的中度污染;尉浩然等[5]针对威海湾的研究则认为Hg、As、Cd存在轻度污染,且As和Hg主要来自人类活动。然而针对整个威海近岸海域来说,现有研究多聚焦局部区域,缺乏全海岸线系统调查,虽然在2013年有针对整个山东半岛沿岸海域沉积物重金属研究[12],但研究中涉及威海近岸海域仅有10个点位,点位相对较少。为了探究近些年近海人为活动增加带来的沉积物重金属含量变化,有必要更新威海近岸海域的沉积物重金属的数据,本文以威海近岸海域为研究区域,调查沉积物中Hg、Cd、Pb、Cu、As、Cr和Zn共7种常见重金属的含量和分布状况,采用多种方法评价生态影响,并借助多元统计法解析威海沿岸重金属来源,为沿岸海域生态环境治理提供依据。

1　材料与方法

1.1　试剂

优级纯37.0%HCl购于国药集团化学试剂有限公司;优级纯65.0%HNO_3购于Merck有限公司;优级纯$K_2Cr_2O_7$和分析纯石英砂均购于天津市科密欧化学试剂有限公司;1 mg/L Hg单元素溶液标准物质购于生态环境部环境发展中心环境标准样品研究所;10 mg/L Cu、Pb、Zn、Cr和Cd元素溶液标准物质购于美国安捷伦公司;土壤质量控制样品GBW07333购于国家海洋局第二海洋研究所,Cr、Cu、Zn、As和Pb的标准值分别为(107.0±4.0)、(29.1±1.1)、(114.0±6.0)、(7.6±0.5)和(29.0±0.6)mg/kg,Cd和Hg为(280.0±30.0)和(22.0±2.0)μg/kg。实验用水均为超纯水。

1.2　仪器

使用BUCHI公司生产的L-200冷冻干燥机冻干样品;使用绍兴市上虞沪江仪器厂生产的100目

非金属标准检验筛以筛分土壤样品;使用梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司生产的AG204型电子天平称土壤质量;使用上海屹尧仪器科技有限公司生产的TOPEX+微波消解仪消解土壤样品;使用美国安捷伦公司生产的7850型电感耦合等离子体质谱(inductively coupled plasma mass spectrometry,ICP-MS)分析沉积物中Cr、Cu、Zn、As、Cd和Pb含量;使用美国Teledyne Leeman Labs公司生产的Hgdra II型冷原子吸收分光光度计分析土壤Hg含量,干燥、分解、催化和汞齐化加热温度及时间参数分别为300 °C保持60 s、800 °C保持180 s、600 °C保持60 s和600 °C保持30 s,检测波长为253.7 nm。

1.3 样品的采集与分析测试

山东省威海生态环境监测中心参考GB 17378.3—2007《海洋监测规范 第3部分:样品采集、贮存与运输》[13]的要求,根据《2024年威海市海洋生态环境夏季监测实施方案》,结合威海近岸海域功能区划与主要人类活动分布,布设了15个站位。站位覆盖威海湾、乳山湾、荣成湾等重要海湾,兼顾港口区、养殖区、旅游区及工业排污口邻近海域,确保采样点具有空间代表性与污染源追踪能力。将站位编号为1~15,用箱式采样器采集表层沉积物,用木质料勺将沉积物装入聚乙烯袋中密封,冷冻保存。

取样品在室温下解冻后,冻干处理并研磨,使用100目尼龙筛过筛,待用。(1)称取约0.1 g沉积物,加一定体积37.0%HCl和65.0%HNO_3溶液微波消解,静置后取上清液,ICP-MS待测[14];(2)称取约0.1 g沉积物,至于镍舟中,通过热解,经金汞齐催化还原沉积物中的汞为汞蒸汽后,测定冷原子荧光吸光度[14]。样品分析过程中,每批样品均设置10%的平行样,平行样相对偏差均<20.0%。每批次样品均设置试剂空白和标准物质土壤质量控制样品测定。质控结果均符合HY/T 147.2—2013《海洋监测技术规程》[14]要求,确保数据准确可靠。

1.4 沉积物重金属污染评价方法

(1)地累计指数($I_{i,地}$)计算参考已发表文献[15]方法,i为Cr、Cu、Zn、As、Cd、Hg和Pb。本文综合参考了蓝先洪等[10]、光霞等[12]和徐冠球等[16]的研究,考虑到威海沿岸海域全部位于黄海北部,最终采用更接近本区域的渤海东部及黄海北部的调查结果作为背景值[10],Cr、Cu、Zn、As和Pb的背景值分别为58.9、20.1、65.5、9.9和23.0 mg/kg,Cd和Hg为150.0和20.0 μg/kg。依据$I_{i,地}$值的污染等级划分与文献[10,12]一致,包括无污染、轻污染、偏中污染、中污染、偏重污染、重污染和严重污染7个等级。

(2)潜在生态风险指数(I_r^i)和综合潜在生态风险系数(I_R)计算参考已发表文献[17]方法。依据I_r^i值的生态风险程度与文献[9,16-20]一致,包括I_r^i<40为轻微污染、40≤I_r^i<80为中等污染、80≤I_r^i<160为强污染、160≤I_r^i<320为很强污染和I_r^i≥320为极强污染。针对本研究对象,依据安文超等[21]的研究,I_R值的生态风险程度调整为I_R≤142.0为低危害,142.0≤I_R<284.0为中危害,284.0≤I_R<568.0为高危害,I_R≥568.0为重危害。

(3)毒性效应预测,参考徐冠球等[16]和Apitz等[22]的研究结果,预测重金属产生的生物毒性:当沉积物重金属含量小于下限值时,产生生物毒性概率<25%;若含量高于上限值时,产生生物毒性概率>75%。不同金属元素毒性预测限值列于表1。

表1 不同金属元素毒性预测限值[16] 单位:mg/kg

Table 1 predictive limit values for the toxicity of different metal elements unit:mg/kg

金属元素	下限	上限
Cr	78.3	268.5
Cu	38.2	214.6
Zn	16.1	54.3
As	16.1	54.3
Cd	1.1	5.8
Hg	0.2	0.7
Pb	53.0	296.0

1.5 数据处理方法

部分数据以$\bar{x}\pm s$表示。使用Microsoft Excel 2016和IBM SPSS statistics 29.0进行数据统计;使用Person相关性分析方法分析不同重金属来源的相关性;使用主成分分析(principal component analysis,PCA)方法对数据降维处理;使用KMO检验和Bartlett球形检验,并对因子载荷矩阵进行方差最大化正交旋转。P<0.05为差异有统计学意义;P<0.01为显著性差异。

2 实验结果

威海市近岸海域15个站位表层沉积物重金属含量详细结果列于表2。15个站位7种重金属质量

分数为1.3 μg/kg~150.0 mg/kg,其中:13号站位有6种重金属质量分数均最低,由低到高排序为Hg、Cd、As、Cu、Zn和Cr;15号站位(荣成湾)有5种重金属质量分数均最高,由高到低排序为Zn、Cu、Pb、As和Cd。Cr最大值出现在1号站位(海钓观光码头),为79.7 mg/kg,并且该点位As、Pb、Cd和Hg的含量也比较高;Hg最大值出现在乳山湾的14号站位,为39.0 μg/kg,与崔毅等[9]2003年调查的乳山湾夏季沉积物Hg(42.0 μg/kg)均值接近。

不同重金属统计分析结果列于表3。其中仅Cu在15号站位高于一类海洋沉积物质量标准[23],但未超过二类标准,其余各种金属元素均未超过一类标准。Cr变异系数最小,为18.0%;而Hg、Cd和Cu的变异系数均>50.0%。与2008—2009年渤海东部及黄海北部的调查结果[10]相比,此次Cr、Cu、Zn和Pb的平均质量分数分别增加了8.8%、31.3%、24.0%和13.9%,其中Cu、Zn、Pb含量增加可能与近年来船舶交通量增加、近海养殖规模扩大及沿岸工业发展有关,Cr含量略有上升可能受沿岸建筑与造船业影响。Hg几乎没变化,而Cd和As略有下降,相比下降了17.3%和18.2%。

表2　威海市近岸海域不同站位表层沉积物重金属质量分数

Table 2　location of sampling sites and heavy metal contents of surface sediments along coast of Weihai City

站位	Cr/(mg·kg^{-1})	Cu/(mg·kg^{-1})	Zn/(mg·kg^{-1})	As/(mg·kg^{-1})	Cd/(μg·kg^{-1})	Hg/(μg·kg^{-1})	Pb/(mg·kg^{-1})
1	79.7	30.3	95.0	12.1	170.0	35.4	34.3
2	74.0	29.8	92.2	8.6	160.0	32.8	29.3
3	56.5	21.7	69.3	7.4	90.0	20.4	24.0
4	55.2	18.6	64.0	8.2	100.0	15.1	20.7
5	53.8	16.6	60.0	6.6	100.0	12.1	19.6
6	50.8	15.5	60.6	6.2	70.0	15.5	19.2
7	48.3	14.1	54.8	5.2	70.0	7.0	17.7
8	69.5	26.6	83.7	8.9	110.0	21.8	26.8
9	71.4	24.4	82.6	7.7	130.0	20.2	26.1
10	76.7	30.3	98.0	6.8	130.0	24.8	30.2
11	65.2	21.8	78.8	8.8	80.0	15.2	23.2
12	63.6	25.6	81.8	10.0	90.0	19.8	26.6
13	44.0	10.8	42.5	3.0	50.0	1.3	24.4
14	77.2	32.7	105.0	8.9	140.0	39.0	32.8
15	75.4	77.7	150.0	13.6	370.0	29.4	37.4
平均值	64.1	26.4	81.2	8.1	124.0	20.7	26.2

表3　威海市沿岸海域表层沉积物重金属统计结果

Table 3　statistical results of heavy metal content in surface sediments along the coast of Weihai City

重金属	本文结果				文献结果		
	质量分数/(mg·kg^{-1})	变异系数/%	一类标准/(mg·kg^{-1})	超一类标准率/%	[10]	[12]	[16]
Cr	64.1±11.8	18.0	≤80.0	0	58.9	27.7	64.8
Cu	26.4±15.7	59.0	≤35.0	6.7	20.1	16.5	24.5
Zn	81.2±25.9	32.0	≤150.0	0	65.5	28.2	55.9
As	8.1±2.6	32.0	≤20.0	0	9.9	5.7	16.8
Cd	124.0±76.1[a]	61.0	≤0.5	0	150.0[a]	160.0[a]	117.0[a]
Hg	20.7±10.4[a]	50.0	≤0.2	0	20.0[a]	50.0[a]	20.3[a]
Pb	26.2±5.8	22.0	≤60.0	0	23.0	15.0	15.8

注:[a]单位为μg/kg。

3 重金属污染评价

3.1 地累计指数法

不同重金属平均地累计指数计算结果列于表4。威海近岸海域7种重金属平均地累计指数为−1.03~−0.34,均<0。威海近岸海域沉积物不同重金属的平均污染程度由高到低排序为Zn、Cu、Pb、Cr、Hg、As、Cd。主要污染等级为无污染,其中部分站点重金属出现轻度污染,如:1号站位的Cu和Hg,污染程度分别为0.01和0.24;10号站位的Cu,污染程度为0.01;14号站位的Hg,污染程度为0.38;15号站位的Cu、Zn、Cd和Pb,污染程度分别为1.37、0.61、0.72和0.11。以上站位所列重金属污染程度均为轻污染,其余站位重金属均为无污染。

表4 重金属污染地累计指数法评价

Table 4 results of heavy metal pollution by the geoaccumulation index

重金属	平均地累计指数	样品百分数/%		
		无污染	轻污染	其他[b]
Cr	−0.49	100.0	0	0
Cu	−0.35	73.3	26.7	0
Zn	−0.34	86.7	13.3	0
As	−0.94	100.0	0	0
Cd	−1.03	93.3	6.7	0
Hg	−0.84	80.0	20.0	0
Pb	−0.43	93.3	6.7	0

注:[b]其余4种污染程度合计。

3.2 潜在生态风险

每个站位不同重金属单项生态风险指数与综合潜在生态风险指数结果列于表5。15个站位7种重金属的潜在生态风险指数为0.65~78.00,对应平均潜在生态风险指数为1.24~41.31,指数值从高到低排序为Hg、Cd、As、Cu、Pb、Cr、Zn。该结果与北黄海沉积物重金属调查结果[24]相似,略有不同的是威海沿岸海域表层沉积物中,Cu的生态风险要高于Pb。按照单项生态风险程度划分,Hg为中等污染,其他重金属均为轻微污染。详细数据表明:8个站点的Hg出现中等污染,对应平均潜在生态风险为中等污染;15号站位(荣成湾)的Cd出现中等污染,对应平均潜在生态风险为轻微污染。污染程度与

表5 威海近岸海域表层沉积物重金属潜在生态风险指数与综合潜在生态风险指数

Table 5 single potential ecological harm factors and risk indices of heavy metals in surface sediments along the coast of Weihai City

站位	潜在生态风险指数							综合潜在生态风险指数
	Cr	Cu	Zn	As	Cd	Hg	Pb	
1	2.71	7.54	1.45	12.26	34.00	70.80	7.46	136.2
2	2.51	7.41	1.41	8.66	32.00	65.60	6.37	124.0
3	1.92	5.40	1.06	7.50	18.00	40.80	5.22	79.9
4	1.87	4.63	0.98	8.35	20.00	30.20	4.50	70.5
5	1.83	4.13	0.92	6.71	20.00	24.20	4.26	62.0
6	1.72	3.86	0.93	6.23	14.00	31.00	4.17	61.9
7	1.64	3.51	0.84	5.22	14.00	14.00	3.85	43.0
8	2.36	6.62	1.28	9.02	22.00	43.60	5.83	90.7
9	2.42	6.07	1.26	7.82	26.00	40.40	5.67	89.7
10	2.60	7.54	1.50	6.90	26.00	49.60	6.57	100.7
11	2.21	5.42	1.20	8.93	16.00	30.40	5.04	69.2
12	2.16	6.37	1.25	10.13	18.00	39.60	5.78	83.3
13	1.49	2.69	0.65	3.04	10.00	2.60	5.30	25.8
14	2.62	8.13	1.60	8.99	28.00	78.00	7.13	134.5
15	2.56	19.33	2.29	13.78	74.00	58.80	8.12	178.9
平均值	2.18	6.58	1.24	8.24	24.80	41.31	5.68	90.0

Hg和Cd本身具有较高生物毒性有关[25],与光霞等[12]的评价结果一致。15个站位的综合潜在生态风险指数为25.8~178.9,对应平均值为90.0,整体为低危害。其中:1~14站位的综合潜在生态风险指数均<142.0,为低危害,但是1、2号(码头)和14号站位(乳山湾)综合风险指数也较高;15号站位对应值为178.9,为中危害。

3.3　重金属生物毒性效应预测

总体上,7种重金属平均质量分数均低于毒性阈值下限;按站位分析,15号站位的Cu质量分数为77.7 mg/kg,高于38.2 mg/kg的毒性下限值,产生生物毒性概率>25%,应予以重点关注;1号站点的Cr质量分数为79.7 mg/kg,略高于78.3 mg/kg的毒性下限值,其产生生物毒性的概率仍属于较低水平。为增强毒性效应评估的可靠性,本研究同时参考GB 18668—2002《海洋沉积物质量》[23]中的一类标准限值(35.0 mg/kg)进行交叉验证。结果显示,除15号站位的Cu略高于一类标准外,其余各站位重金属含量均未超出一类标准,与Apitz等[22]的毒性预测结果基本一致。

4　重金属来源分析

不同重金属元素相关性如表6所示。不同金属之间相关系数均>0.590,其中:Cr与Hg、Zn与Cd、Zn与Cu、Cu与Cd显著正相关(r=0.900、0.913、0.949、0.974,P<0.01),说明Hg和Cr可能为相同的来源,Cu、Cd、Zn可能为相同源;As与其他金属元素之间也显著正相关(r=0.722~0.787,P<0.01)。

主成分分析法验证结果列于表7。KMO检验统计量为0.575,>0.500,表明适合进行主成分分析。Bartlett球形检验给出显著性水平<0.01,对因子载荷矩阵进行方差最大化正交旋转。将7种金属分为3个主成分,结果显示累计解释总方差的96.3%。成分1贡献率为43.2%,Cu、Cd、Zn、Pb和As均有较大载荷(>0.5),载荷值分别为0.909、0.901、0.755和0.507。根据威海市生态环境质量报告书(2023)[26]统计结果显示,近5年重金属年均入海量为1.34 t/a,主要是Cu、Cd和Zn,其次是Pb和As,推测威海近岸海域表层沉积物中这些重金属污染可能来源于直排海污染源废水。海上旅游和海水近岸养殖属于威海特色产业,由此产生的船舶航行的污染[27]和海水养殖区的污染[28]也会加重此类重金属污染,本文推测其污染源为人为源。成分2贡献率为39.8%,略低于成分1,Cr、Hg、Pb和Zn的载荷较高(>0.5),分别为0.880、0.877、0.740和0.563。Hg质量分数的平均值与背景值相近,Cr和Pb的变异系数较低,且空间分布较均匀,因此推测其污染源为自然源。成分3贡献率为13.4%,仅As为主要贡献者,并且As的质量分数平均值明显高于2013年山东半岛的调查结果[12]。As主要来自农业生产和半导体生产[29],而根据《威海统计年鉴2024》[30]显示,威海市半导体产业属于支柱产业之一,推测此为As的主要来源,也是人为源。另外,Pb在成分1和2中的载荷因子分别为0.619和0.740,表明含量同时受人为源和自然源影响,且二者影响程度相当;Zn在成分1和2中的载荷因子分别为0.755和0.563,同样受2种源影响,且人为源的影响更多一些;As在成分1和3中载荷因子分别为0.507和0.727,均为人为源,既受到直排海污水的影响,也受到工业活动的影响,且工业生产影响较大。

表6　威海近岸海域表层沉积物中重金属间相关系数

Table 6　correlation coefficients between heavy metals in surface sediments along the coast of Weihai City

重金属元素	Hg	Cd	Pb	Cu	As	Cr	Zn
Hg	1.000						
Cd	0.597	1.000					
Pb	0.807^{c}	0.777^{c}	1.000				
Cu	0.596	0.974^{c}	0.796^{c}	1.000			
As	0.733^{c}	0.774^{c}	0.722^{c}	0.787^{c}	1.000		
Cr	0.900^{c}	0.623	0.849^{c}	0.635^{d}	0.740^{c}	1.000	
Zn	0.782^{c}	0.913^{c}	0.876^{c}	0.949^{c}	0.835^{c}	0.833^{c}	1.000

注:^{c} P<0.01;^{d} P<0.05。

表7 威海近岸海域沉积物中重金属主成分分析结果

Table 7 result of principal component analysis of heavy metals in sediments along the coast of Weihai

主成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	载荷因子						
				Hg	Cd	Pb	Cu	As	Cr	Zn
成分1	3.021	43.151	43.151	0.259	0.901	0.619	0.909	0.507	0.328	0.755
成分2	2.786	39.797	82.948	0.877	0.294	0.740	0.306	0.443	0.880	0.563
成分3	0.935	13.358	96.306	0.319	0.271	0.066	0.270	0.727	0.258	0.295

5 结束语

本文分析了2024年威海市15个站位近岸海域表层沉积物7种重金属的含量和来源。与先前研究结果相比[10],Cr、Cu、Zn和Pb含量有明显增长,Cd和As含量降低,Hg含量变化不大。地累计指数法评价显示7种重金属的整体污染水平属于轻微,生态环境较好。重金属潜在生态风险评价表明Hg为中等污染,其余为轻微污染;乳山湾的Hg含量较高,建议环保部门开展乳山河沿岸涉Hg企业排查,推动含Hg废物规范处置,并加强沉积物Hg形态分析与生物有效性评估。综合潜在生态风险评价表明仅15号站位为中危害,其余均为低危害;15号站位Cu高于毒性效应阈值下限,有轻微概率产生生物毒性,建议对15号等重点站位周边养殖区实施饲料与渔药使用登记制度,并加强船舶含油污水与生活污水接收设施建设与监管,同时针对综合生态风险指数可能成为中风险的港湾(1、2号站位),建立重点海湾沉积物重金属年度监测与预警机制。威海近岸海域Cu、Zn、Cd、Pb主要来源于直排海污水、船舶航行和近海养殖,As除以上来源外,主要受到工业活动影响,建议对电子制造等涉As行业执行更严格的排放标准与在线监测。本文进行了威海市近岸海域沉积物重金属的一次全面普查,并尝试对来源进行了初步分析,但是受限于监测的点位数量较少,主成分分析结果对来源的表征存在缺陷,后续还需增加采样点位,或者对相同点位进行连续多年的持续监测,以期在未来对威海近岸海域的重金属含量和来源进行有效管控。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] 吕剑,骆永明,章海波.中国海岸带污染问题与防治措施[J].中国科学院院刊,2016,31(10):1175-1181. DOI:10.16418/j.issn.1000-3045.2016.10.006.
LÜ Jian, Luo Yongming, Zhang Haibo. Coastal zone pollution and its prevention and treatment measures in China[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016,31(10):1175-1181.

[2] 贾振邦,霍文毅,赵智杰,等.应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染[J].北京大学学报(自然科学版),2000,36(6):808-812. DOI:10.13209/j.0479-8023.2000.118.
Jia Zhenbang, Huo Wenyi, Zhao Zhijie, et al. Secondary phase enrichment factor for evaluation of heavy metal pollution of sediment in the Chai River[J]. Acta Scicentiarum Naturalum Universitis Pekinesis, 2000, 36(6):808-812.

[3] Davutluoglu O I, Seckin G, Ersu C B, et al. Heavy metal content and distribution in surface sediments of the Seyhan River, Turkey[J]. Journal of Environmental Management, 2011, 92(9):2250-2259. DOI:10.1016/j.jenvman.2011.04.013.

[4] 陈宗团,徐立,洪华生.河口沉积物-水界面重金属生物地球化学研究进展[J].地球科学进展,1997,12(5):434-439. DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.1997.05.0434.
Chen Zongtuan, Xu Li, Hong Huasheng. Biogeochemical processes of heavy metals at the sediment-water interface of estuary: a review[J]. Advances in Earth Science, 1997, 12(5):434-439.

[5] 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. DOI:10.16028/j.1009-2722.2024.010.
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.

[6] 林霖,苗晓明,韩宗珠,等.渤海中部海域黏土粒级沉积物中重金属的变化及其对160年来人类活动的指示[J].海洋环境科学,2022,41(1):99-105. DOI:10.13634/j.cnki.mes.2022.01.008.
Lin Lin, Miao Xiaoming, Han Zongzhu, et al. Changes in heavy metals in clay-grain sediments in the Bohai Sea and their indication of human activity over the past 160 years[J]. Marine Environmental Science, 2022, 41(1): 99-105.

[7] 李淑媛,苗丰民,刘国贤.北黄海沉积物中重金属分布及环境背景值[J].黄渤海海洋,1994,12(3):20-24.
Li Shuyuan, Miao Fengmin, Liu Guoxian. The distribution and environmental background values of the heaavy metals in the sediment of the north Huanghai sea [J]. Advances in Marine Science, 1994, 12(3): 20-24.

[8] 周嘉源,刘珊珊,张晓波.山东半岛南部海域沉积物中重金属元素研究现状[J].海洋地质前沿,2016,32(6):39-42,49. DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.06006.
Zhou Jiayuan, Liu Shanshan, Zhang Xiaobo. Research status of heavy metal elements in the sediments off south Shandong peninsula [J]. Marine Geology Frontiers, 2016,32(6):39-42,49.

[9] 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. DOI:10.3321/j.issn:1005-8737.2005.01.015.
Cui Yi, Xin Fuyan, Ma Shaosai, 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.

[10] 蓝先洪,蜜蓓蓓,李日辉,等.渤海东部和黄海北部沉积物中重金属分布特征[J].中国环境科学,2014,34(10):2660-2668.
Lan Xianhong, Mi Beibei, Li Rihui, et al. Distribution of heavy metals in surface sediments in the eastern Bohai Sea and the northern Yellow Sea [J]. China Environmental Science, 2014, 34(10): 2660-2668.

[11] 佘运勇,王剑,王艳华,等.南黄海海洋表层沉积物中重金属的分布特征及潜在生态风险评价[J].海洋环境科学,2011,30(5):631-635. DOI:10.3969/j.issn.1007-6336.2011.05.006.
She Yunyong, Wang Jian, Wang Yanhua, et al. Distribution and potential ecological risk assessment on heavy metals in surface sediments of the South Yellow Sea[J]. Marine Environmental Science, 2011, 30(5): 631-635.

[12] 光霞,褚忠信,苗安洋,等.山东半岛近岸海底表层沉积物重金属含量及污染评价[J].海洋湖沼通报(中英文),2024,46(5):139-145. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.05.017.
Guang Xia, Chu Zhongxin, Miao Anyang, et al. Heavy metals in the surface sediment of the coastal waters along the Shandong peninsula and their pollution evaluation [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(5): 139-145.

[13] GB 17378.3—2007 海洋监测规范 第3部分:样品采集、贮存与运输[S].
GB 17378.3—2007 The specification for marine monitoring: part 3: sample collection storage and transportation[S].

[14] HY/T 147.2—2013 海洋监测技术规程 第2部分:沉积物[S].
HY/T 147.2—2013 Code of practice for marine monitoring technology: part 2: sediment[S].

[15] Müller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geo Journal, 1969, 2(3): 108-118.

[16] 徐冠球,何荣,石海明,等.天津渤海湾近岸海域表层沉积物重金属环境质量评价及来源分析[J].海洋环境科学,2023,42(3):459-465,492. DOI:10.13634/j.cnki.mes.2023.03.020.
Xu Guanqiu, He Rong, Shi Haiming, et al. Environmental quality assessment and source analysis of heavy metals in coastal surface sediment of Bohai Bay along Tianjin city, China [J]. Marine Environmental Science, 2023, 42(3): 459-465, 492.

[17] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control.a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001. DOI: 10.1016/0043-1354(80)90143-8.

[18] 李杰,祁士华,王向琴,等.海南小海沉积物中的重金属分布特征及潜在生态风险评价[J].安全与环境工程,2008,15(2):18-22. DOI:10.3969/j.issn.1671-1556.2008.02.005.
Li Jie, Qi Shihua, Wang Xiangqin, et al. Distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from Xiaohai Bay, Hainan, China[J]. Safety and Environmental Engineering, 2008, 15(2): 18-22.

[19] 田文娟,程继雄,郭丽,等.黄石某区域湖泊沉积物重金属污染特征及生态风险评价[J].环境保护科学,2024,50(4):157-162. DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-

6216.202307002.
Tian Wenjuan, Cheng Jixiong, Guo Li, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediments from region lakes of Yellowstone [J]. Environmental Protection Science, 2024, 50(4): 157-162.

[20] 杨耀芳,曹维,朱志清,等.杭州湾海域表层沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J].海洋开发与管理,2013,30(1):51-58. DOI:10.20016/j.cnki.hykfygl.2013.01.011.
Yang Yaofang, Cao Wei, Zhu Zhiqing, et al. Accumulation of heavy metal pollutants in surface sediments of Hangzhou Bay and its potential ecological risk assessment [J]. Ocean Development and Management,2013,30(1):51-58.

[21] 安文超,孙立娥,马立科,等.某典型工业聚集区遗留地土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].湖南师范大学自然科学学报,2022,45(5):108-116.
An Wenchao, Sun Li'e, Ma Like, et al. Assessment of heavy metals and human health risk in surface soils in a legacy land of typical industrial agglomeration area[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2022,45(5):108-116.

[22] Apitz S E, Barbanti A, Giulio B A, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(5):326-341. DOI:10.1065/jss2007.08.246.

[23] GB 18668—2002海洋沉积物质量[S].
GB 18668—2002 Marine sediment quality[S].

[24] 杜俊涛,陈洪涛,田琳.北黄海表层沉积物中重金属含量及其污染评价[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2010,40(增刊1):167-172,178. DOI:10.16441/j.cnki.hdxb.2010.s1.027.
Du Juntao, Chen Hongtao, Tian Lin. Heavy metals in the surface sediments of the north Yellow Sea and its ecological risk[J]. Periodical of Ocean University of China,2010,40(S1):167-172,178.

[25] Huang W, Cao L, Ye Z J, et al. Antioxidative responses and bioaccumulation in Japanese flounder larvae and juveniles under chronic mercury exposure [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part C (Toxicology & Pharmacology), 2010, 152(1): 99-106. DOI:10.1016/j.cbpc.2010.03.005.

[26] 山东省威海生态环境监测中心.威海市环境质量报告书(2023)[R].威海:山东省威海生态环境监测中心,2023.
Shandong Weihai Ecological Environment Monitoring Center. Weihai ECO-environmental quality report(2023)[R]. Weihai: Shandong Weihai Ecological Environment Monitoring Center.

[27] 徐颖.苏南地区航道底泥重金属污染评价和处置对策[J].环境保护科学,2001,27(5):33-34,37. DOI:10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2001.05.014.
Xu Ying. Evaluation and measures on heavy metal pollution in bed mud from the south region channels in Jiangsu Province[J]. Environmental Protection Science, 2001,27(5):33-34,37.

[28] 李妃,陶建斌,夏璐瑶,等.浙江洞头列岛养殖区海水和沉积物中重金属污染及潜在生态风险评价[J].海洋湖沼通报,2024,46(3):114-120. DOI:10.13984/j.cnki.cn37-1141.2024.03.014.
Li Fei, Tao Jianbin, Xia Luyao, et al. Contamination and assessment of potential ecological risk of heavy metals in sea water and sediment from aquaculture areas of Dongtou islands, Zhejiang [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2024, 46(3): 114-120.

[29] Park D, Yang H, Jeong J, et al. A comprehensive review of arsenic levels in the semiconductor manufacturing industry[J]. The Annals of Occupational Hygiene, 2010, 54(8):869-879. DOI:10.1093/annhyg/meq051.

[30] 威海市统计局,国家统计局威海调查队.威海统计年鉴2024[EB/OL].(2024-12-31)[2025-06-06].https://www.weihai.gov.cn/art/2024/12/31/art_74406_5160566.html.
Weihai Municipal Bureau of Statistics, Weihai Survey Team of the National Bureau of Statistics. Weihai statistical yearbook 2024 [EB/OL].(2024-12-31)[2025-06-06]. https://www. weihai. gov. cn/art/2024/12/31/art_74406_5160566.html.

(责任编辑:王 媛)