

雷雁翔, 张斌, 吴治国, 等. 长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与风险评价及来源分析[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 40-50.

LEI Yanxiang, ZHANG Bin, WU Zhiguo, et al. Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Changdao Island and their sources and pollution assessment[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(3): 40-50.

长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征 与风险评价及来源分析

雷雁翔^{1,2}, 张斌^{1,2}, 吴治国^{1,2}, 王小丹^{1,2}, 唐荣慧^{1,2}, 胡蕾^{1,2}, 张朋朋^{1,2}, 王恩强^{1,2}, 滕永波^{1,2*}

(1 山东省物化探勘查院, 济南 250013; 2 山东省地质勘查工程技术研究中心, 济南 250013)

摘要:通过对长岛北部海域 101 个站位表层沉积物进行取样, 研究了表层沉积物类型和粒度分布, 探讨了 As、Pb、Hg、Cr、Cd、Cu、Zn 和 Ni 等 8 种重金属元素的含量、分布特征及其相关性, 并采用潜在生态风险指数法、沉积物环境质量评价和地累积指数法对该海域重金属情况进行了风险评价。结果表明: 重金属元素主要在大钦岛南部、北隍城岛北部和小钦岛北部海域富集; 大部分重金属元素与平均粒径呈显著正相关; 沉积物类型受潮流及地形地貌等因素影响。风险评价结果表明: 研究区整体处于很低的风险环境, 潜在生态风险指数法显示仅部分站位中 Cd 和 Hg 处在中等生态风险; 内梅罗综合污染指数法显示 As 仅在小钦岛西北部海域为尚清洁环境, Cr 仅在各岛屿周边海域为尚清洁环境; 地累积指数法显示 Cd 仅在大钦岛西南部和北隍城岛西部海域处于轻微污染环境。来源分析表明: Cd、Hg、Cu、Zn、Hg、Ni 和 Cr 受养殖、排污等人类活动影响, As 仅受到岛屿及近岸土母质影响。

关键词:长岛; 表层沉积物; 重金属; 风险评价; 来源分析

中图分类号: P736; X131

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2022.115

0 引言

长岛北部海域位于渤海海峡, 渤海海峡是中国第二大海峡, 是黄、渤海重要的物质交换通道^[1-4], 水体交换能力较强, 对于沉积物的净化能力也相对较强^[5-6]。渤海海峡地区海底地形和水动力条件极其复杂, 水下沟槽、陡坎相间分布^[7], 形成了表层沉积物独特的地球化学特征^[8]。目前, 已有学者对渤海海峡周边海域进行相关研究, 如张剑等^[9]、蓝先洪等^[10]和乔淑卿等^[11]根据粒度特征分析了渤海和

黄海北部沉积环境和元素地球化学记录; 朱爱美等^[12]、张伟等^[13]和成海燕等^[8]研究了渤海及渤海海峡表层沉积物分布特征及地球化学特征; 王润梅等^[14]根据有机质特征探讨了环渤海沉积物有机质来源; 李龙强等^[15]对渤海中部及黄海北部表层沉积物进行了生态风险评价。

然而, 相较于渤海和北黄海, 渤海海峡尤其是长岛周边海域地球化学方面的研究较少, 并且近年来长岛周边海域开放式养殖用海、围海养殖用海面积逐年扩大, 导致现有研究无法全面探讨长岛海域重金属分布的控制因素。因此, 研究长岛海域表层沉积物重金属浓度及分布特征对于了解海洋牧场污染现状、人类活动强度、养殖过程、污染控制及环境管理等具有重要意义。

为此, 项目组于 2020 年 7—8 月在长岛海洋牧场海域完成表层沉积物取样 101 个站位, 对沉积物粒径结构、类型、沉积物中重金属浓度进行分析, 综合运用潜在生态风险法、地累积指数法和内梅罗综合污染指数法对研究区重金属污染状况进行评价,

收稿日期: 2022-04-18

资助项目: 山东省 2020 年度省级地质勘查项目“山东长岛海洋牧场示范区海底沉积物地球化学调查”(鲁勘字[2020]54号); 山东省 2021 年度省级地质勘查项目“山东省长岛海洋生态文明综合试验区海洋地质环境调查”(鲁勘字[2021]52号)。

作者简介: 雷雁翔(1994—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事海洋地质及地球化学方面的研究工作。E-mail: 479536119@qq.com

* 通讯作者: 滕永波(1969—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事地球化学与勘查方面的研究工作。E-mail: yongboteng@sina.com

并讨论不同评价结果差异及原因;通过相关性分析、聚类分析和主成分分析,揭示重金属元素之间来源及成因上的联系,以期为长岛海域养殖中生态环境保护和综合治理提供基础数据和科学依据。

1 研究区概况

长岛区位于渤海海峡胶东、辽东半岛之间,黄渤海交汇处,北邻辽东隆起,南连胶东隆起,处于胶辽隆起的接合部位(图 1)。研究区南部以庙岛为中心,呈环状分布,山脊分布大致与岛之长轴方向一

致;北部呈串珠状分布,似栈桥直伸海峡深处,但山脊线大多与岛之串连方向不一致^[16-17]。发育老铁山水道、登州水道等众多水道,海底地形条件复杂^[8],水深从南向北逐渐增大,平均水深 25 m。其中,蓬莱登州角和砣矶岛之间水深较浅,平均水深 20 m;砣矶岛至大钦岛水深逐渐加深,水深范围为 35~40 m;大钦岛和北隍城岛之间水深范围为 45~50 m^[7]。岛内第四纪沉积物在海拔 > 50 m 以残坡积物为主,海积平原主要以砾石、砂砾贝壳、细砂和粉砂等海积物组成^[18]。

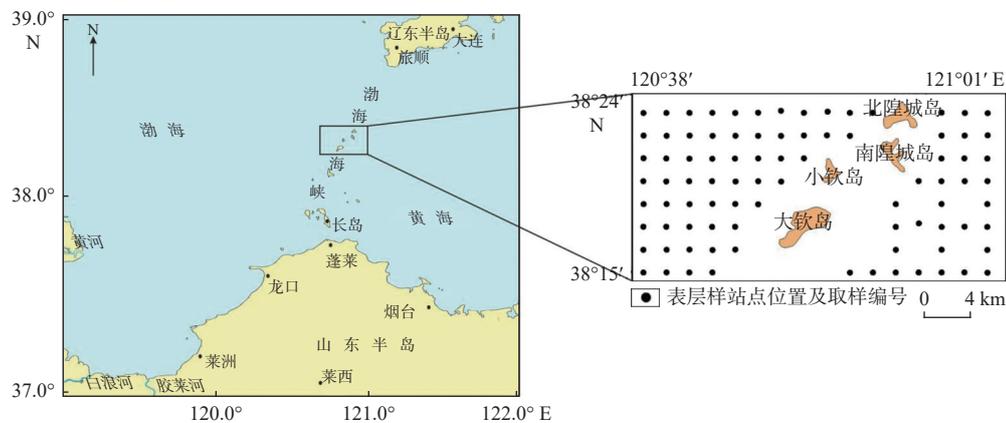


图 1 表层样取样位置图

Fig.1 Sampling stations for surface sediments in the study area

2 材料与方法

2.1 样品采集

在研究区范围(38°14'00"–38°24'00"N, 120°38'00"–121°01'00"E)内按照 1:200 000 比例尺网格化取样(图 1),点位坐标由中海达 H32 RNSS RTK 获取。使用箱式采样器采集海域表层沉积物,用木质勺取上层 0~5 cm 沉积物,装入干净的聚乙烯塑封袋中冷冻保存。样品采集过程中采集、保存、运输和样品预处理,均满足中国《海洋沉积物质量标准》^[19]、《海洋监测规范》^[20]和《海洋调查规范》^[21]的规定。

2.2 样品测试

表层沉积物样品的粒度和元素测试均由山东省物化探勘查院岩矿测试中心进行,粒度测试使用 BT-9300ST 激光粒度分布仪,该仪器的粒度分辨率为 0.1Φ,测量范围为 0.1~500 μm,重复测试误差

< 3%,满足实验要求。粒度划分标准采用 Krumbein 等比制 Φ 粒级标准^[22],沉积物的分类和定名采用 Folk 无砾沉积物分类法^[23]。

Perkin-Elmer model 2400 元素分析仪直接测定总碳(TC)。用 4 mol/L 的 HCl 去除无机碳(IC)后再测定有机碳(OC),IC 浓度为 TC 浓度减去 OC 浓度;Hg 和 As 元素使用 AFS-8230 型原子荧光光度计(DL:0.02 μg/L(As))测定;Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 Ni 元素是参照 DAI 等^[24]描述的方法,使用 NexION 2000 电感耦合等离子体质谱仪(0~260 amu > 1×10⁶ c/s/μg/L)测定。

2.3 分析和评价方法

2.3.1 潜在生态风险指数法(PERI)

1980 年由瑞典科学家 HAKANSO^[25]提出评价水体沉积物中重金属生态危害的方法,其特点不仅反映了每种污染物的影响,而且也揭示多种污染物的综合环境影响^[26-30]。其计算公式为:

$$RI = \sum_{i=1}^7 E_r^i = \sum_{i=1}^7 T_r^i \times C_f^i \quad (1)$$

$$C_f^i = C^i / C_n^i \quad (2)$$

式中: T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数 ($Zn=1 < Cr=2 < Cu=Ni=Pb=5 < As=10 < Cd=30 < Hg=40$ ^[31]);

C^i 和 C_n^i 分别为污染物 i 的实测浓度和地球化学标准值;

RI 为多种污染物的综合潜在生态风险指数;

E_r^i 为单个污染物 i 的潜在生态风险指数。

此处的参考标准 C_n^i 依据迟清华等^[32] 提出的背景值, Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As、Hg 和 Ni 分别为 22、20、64、57、0.09、9、36 和 27。土壤重金属生态危害程度划分标准列于表 1。

表 1 沉积物重金属潜在生态风险指数划分标准^[26]

Table 1 Criteria for classification of ecological hazards of heavy metals in surface sediments

项目	潜在生态风险指数				
	极强	很强	强	中等	轻微
E_r^i	≥ 320	160~320	80~160	40~80	< 40
RI		≥ 600	300~600	150~300	< 150

2.3.2 内梅罗综合污染指数法

沉积物环境质量评价采用沉积物重金属单因子污染指数法和内梅罗综合污染指数法^[33-34]。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i, P = \sqrt{(P_{\text{mean}}^2 + P_{\text{imax}}^2) / 2} \quad (3)$$

式中: P_i 为沉积物重金属的单因子污染指数;

C_i 为重金属含量的实测值;

S_i 为《海洋沉积物质量标准》^[19] 规定的一类重金属含量的限量值;

P 为沉积物内梅罗污染指数;

P_{mean} 为单项污染指数平均值;

P_{imax} 为单项污染指数最大值。

内梅罗污染指数评价标准为: $P \leq 0.7$ 为清洁, $0.7 < P \leq 1.0$ 为尚清洁(警戒线), $1.0 < P \leq 2.0$ 为轻度污染, $2.0 < P \leq 3.0$ 为中度污染, $P > 3.0$ 为重度污染^[34]。

2.3.3 地累积指数法

1969年 MÜLLER^[35] 提出地累积指数法, 用于研究沉积物中重金属污染程度的定量指标。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k \times B_n)] \quad (4)$$

式中: C_n 为重金属元素 n 元素的平均含量;

B_n 为迟清华等^[32] 提出重金属元素 n 的背景值;

k 为背景校正因子, 本次取值 1.5^[12,36-37]。

土壤重金属地累积指数级别标准见表 2。

表 2 地累积指数级别标准

Table 2 Pollution level criteria for index of geoaccumulation

I_{geo}	污染程度	污染级别
5	极强污染	VII
4~5	较强污染	VI
3~4	强污染	V
2~3	中强污染	IV
1~2	中度污染	III
0~1	轻微污染	II
< 0	未污染	I

3 结果

3.1 粒度分布特征

根据 Folk 沉积物命名原则, 研究区海底表层沉积物可以分为 7 类(图 2): 分别是 msG-泥质砂质砾、gmS-砾质泥质砂、gM-砾质泥、(g)mS-含砾泥质砂、S-砂、sZ-砂质粉砂、zS-粉砂质砂。其中砂质粉砂和粉砂质砂占研究区海域面积的 87.13%, 其余沉积物类型只有零星分布(图 3)。

图 3 所示, 研究区表层沉积物粒度分为 3 个部分: ①大钦岛周边及南部海域的砂质粉砂区, 占研究区面积的 17.82%, 平均粒径平均值为 5.45 Φ , 平均标准偏差为 2.12, 平均偏态为 0.21, 平均峰态为 0.85(表 3); ②含砾沉积物区主要集中在南隍城岛和北隍城岛周边海域为主, 并在其余各岛周边海域零星分布, 占研究区面积的 12.87%, 平均粒径平均值为 3.46 Φ , 平均标准偏差为 1.70, 平均偏态为 0.55, 平均峰态为 1.75(表 3); ③粉砂质砂区, 占研究区面积的 69.31%, 平均粒径平均值为 4.02 Φ , 平均标准偏差为 1.85, 平均偏态为 0.38, 平均峰态为 1.21(表 3)。研究区表层沉积物粒度呈现由南部向北部海域逐渐变粗的趋势, 即由无砾沉积物中砂质粉砂逐渐增粗至含砾沉积物中泥质砂质砾。

3.2 重金属空间分布特征

对研究区表层沉积物中 As、Pb、Hg、Cr、Cd、Cu、Zn 和 Ni 8 种重金属元素含量和分布特征进行统计(表 4)。由表 4 可以看出, 研究区表层沉积物中重金属含量相差较大, Hg 含量最低, 平均含量为 16.58 $\mu\text{g}/\text{kg}$, Cr 含量最高, 平均含量为 43.85 mg/kg , 两者相差接近 3 个数量级。按照重金属含量高低顺序为: $\text{Cr} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Ni} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 。Pb

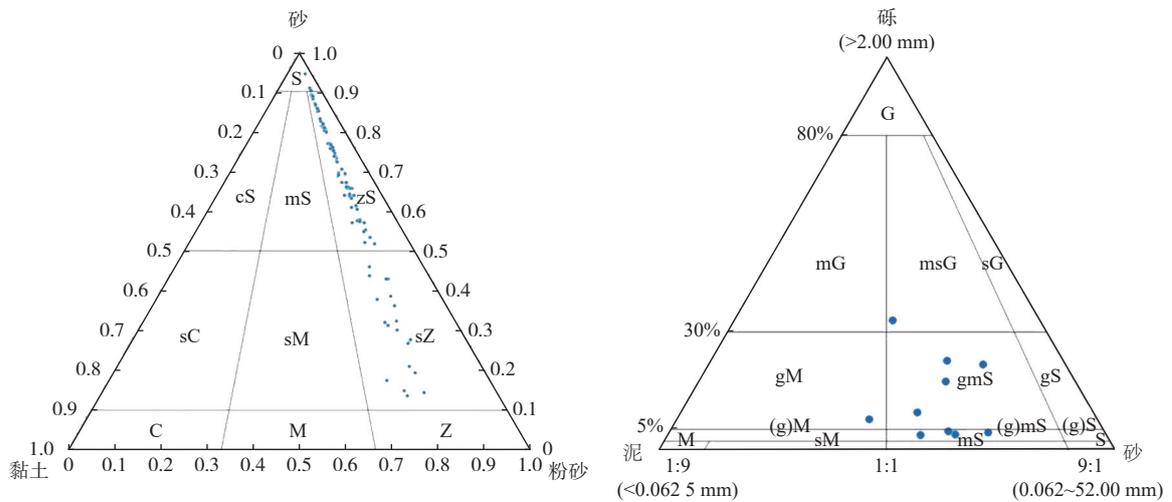


图 2 表层沉积物 Folk 图

Fig.2 The Folk triangle of surface sediments

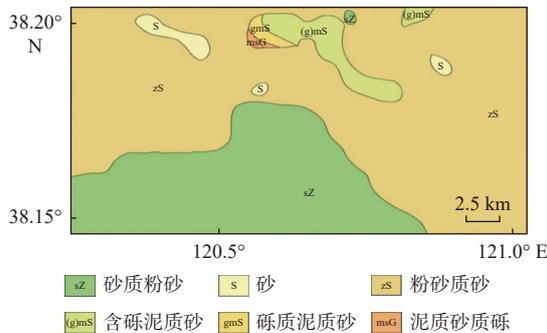


图 3 沉积物类型分布

Fig.3 Distribution of the surface sediment type

表 3 沉积物分区粒度参数

Table 3 Distribution of grain size parameters of the surface sediments in different areas

沉积分区		平均粒径/ Φ	标准偏差	偏态	峰态
砂质粉砂区	最大值	6.20	2.35	0.42	0.95
	最小值	4.71	1.95	0.03	0.77
	平均值	5.45	2.12	0.21	0.85
含砾沉积区	最大值	4.44	2.25	0.65	2.51
	最小值	2.42	1.08	0.38	0.80
	平均值	3.46	1.70	0.55	1.75
粉砂质砂区	最大值	5.38	2.38	0.61	2.29
	最小值	2.27	0.78	0.18	0.79
	平均值	4.02	1.85	0.38	1.21

变异系数最小, 为 7%(表 4), 表明研究区 Pb 含量比较均匀; As、Hg、Cr、Cd、Cu 和 Zn 变异系数介于 20%~40%(表 4); Ni 变异系数最大, 为 41%(表 4), 表明 Ni 数据离散程度高, 含量波动较大, 存在高值区, 可能受人类活动影响。

各重金属元素在研究区空间分布特征从图 4 中可以看出: Cr、Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 元素含量空

表 4 研究区表层沉积物重金属含量及参数

Table 4 Concentrations of heavy metals in surface sediments in the study area

元素	最大值/ (mg/kg)	最小值/ (mg/kg)	平均值/ (mg/kg)	标准差/ (mg/kg)	变异 系数/%
As	14.51	4.26	7	1.58	23
Pb	23.2	15.82	18.95	1.41	7
Hg	0.0407	0.0067	0.0166	0.0057	34
Cr	66.28	8.83	43.85	12.61	29
Cd	0.19	0.03	0.09	0.03	37
Cu	22.17	5.94	12.29	3.96	32
Zn	67.55	10.43	36.14	13	36
Ni	28.88	4.29	14.5	5.74	41

间分布类似, 高值区与低值区也大致吻合。总体上来看, 高值区分布在大钦岛南部海域、北隍城岛北部海域和小钦岛北部海域, 最高值分布在大钦岛南部海域, 高值区有向南延伸的趋势, 低值区分布在研究区东部海域及西北部海域, 呈现出从岛屿向两侧递减的趋势。As 元素高值区分布在小钦岛西北部海域, 而且高值区有向北延伸的趋势, 低值区分布在小钦岛东南部海域, 总体上呈现出由西部海域向东部海域递减的趋势。Hg 元素高值区分布在小钦岛东南部海域, 值得注意的是高值区特别靠近岛屿, 低值区分布在研究区东部海域和西北部海域, 总体上呈现出从岛屿向两侧递减的趋势。

3.3 重金属污染分析和评价结果

3.3.1 潜在生态风险指数法

从表 5 中可以看出, 单个元素潜在生态风险指数均值大小顺序为 Cd(30.71) > Hg(18.42) >

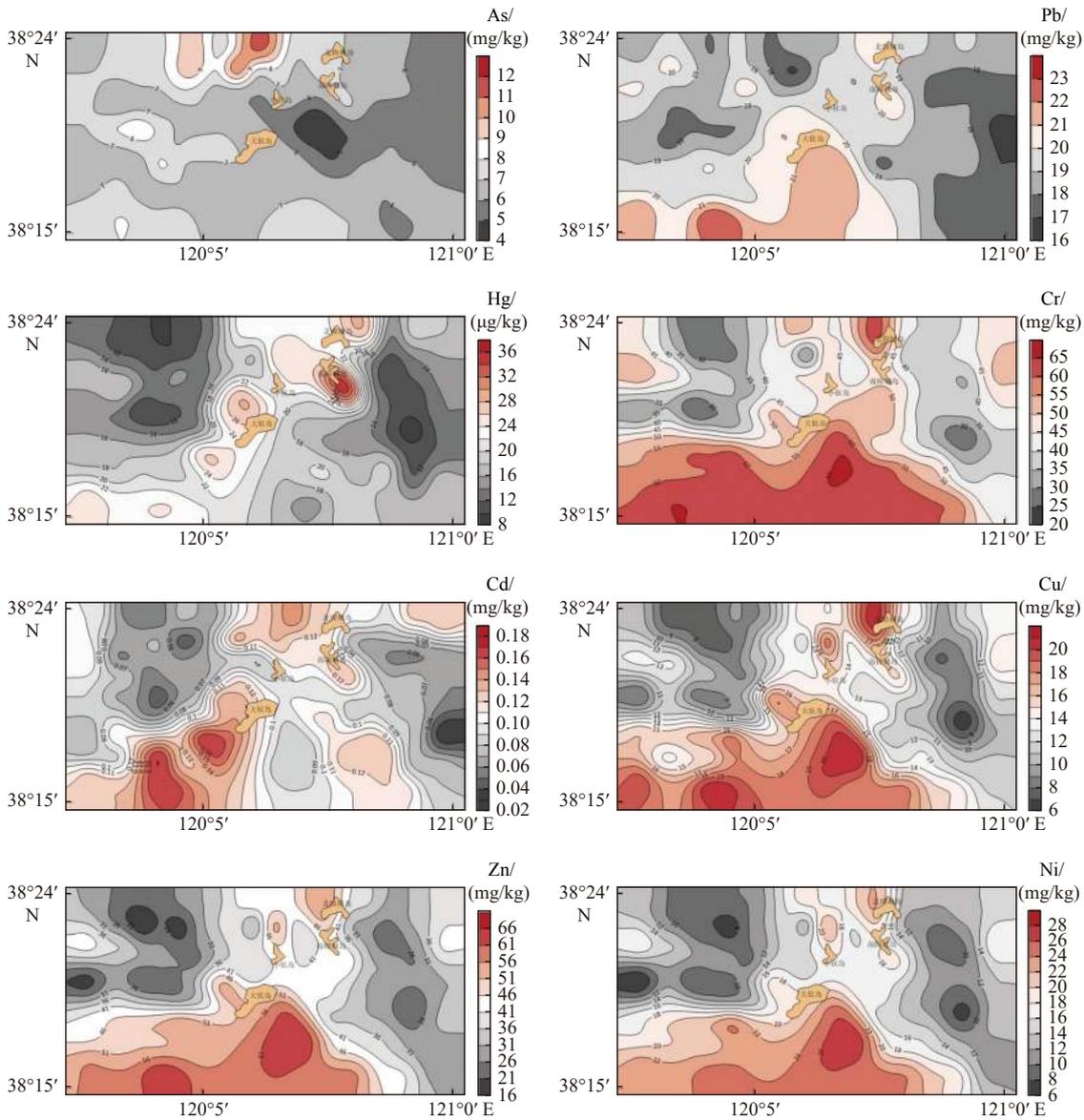


图4 研究区表层沉积物重金属含量空间分布特征

Fig.4 Spatial distribution of heavy metals in surface sediments of the study area

As (7.78) > Pb(4.74) > Cu(2.79) > Ni(2.69) > Cr (1.54) > Zn(0.56), 表明研究区整体处于轻微生态风险级别。Cr、Cu、Pb、Zn、As 和 Ni 潜在生态风险指数均 < 40 (表 5), 表明这些重金属元素都为轻微生态风险级别。Cd 和 Hg 中 E_i^p 范围分别为 9.69~64.04 和 7.44~45.22, 表明 Cd 和 Hg 有部分站位处

于中等生态风险级别, 其余站位处于轻微生态风险级别, 其中, 18 和 1 站位 Cd 和 Hg 处于中等生态风险级别。

根据表层样重金属评价结果, 重金属综合潜在生态风险指数为 36.66~111.15, 均值 66.27, 均 < 105, 表明研究区重金属污染处于轻微生态风险污染级别, 这主要是由于研究区中绝大多数站位重金属元素含量未超过背景值。如图 5 所示, 研究区重金属综合潜在生态风险 RI 分布特征与各重金属元素元素分布特征类似, 高值区分布在大钦岛南部海域和南-北隍城岛周边海域, 低值区分布在研究区东部海域及西北部海域。

表 5 表层沉积物重金属潜在生态风险指数

Table 5 Potential ecological risk coefficients of heavy metals in the surface sediments

	单个元素潜在生态风险指数(E_i^p)								RI
	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Ni	
最大值	2.33	5.04	5.80	1.06	64.04	45.22	16.12	5.35	111.15
最小值	0.31	1.35	3.96	0.16	9.69	7.44	4.73	0.80	36.66
平均值	1.54	2.79	4.74	0.56	30.71	18.42	7.78	2.69	66.27
标准偏差	0.44	0.90	0.35	0.20	11.46	6.33	1.76	1.06	17.95

3.3.2 内梅罗综合污染指数法

以《海洋沉积物质量标准》^[19] 规定的一类重金

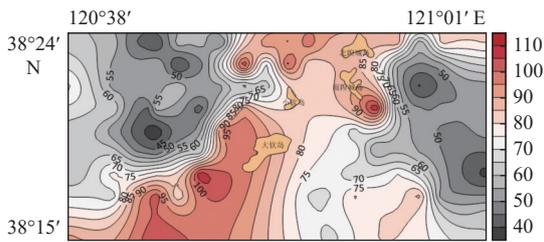


图 5 研究区重金属含量潜在生态风险分布特征

Fig.5 Spatial distribution of comprehensive potential ecological risk of heavy metals

属含量的限量值作为参比值, 对研究区内各个站位表层沉积物重金属元素单项污染指数和内梅罗污染指数进行计算统计(表 6)。内梅罗污染指数最大值为 0.65, 表明研究区整体处于清洁环境。

从表 6 中可以看出, 研究区中 Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 和 Ni 单项污染指数范围分别为 0.17~0.59、

表 6 表层沉积物重金属污染指数

Table 6 Heavy metal pollution index of the surface sediments

	单项污染指数(P_i)							内梅罗污染指数 P	
	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As		Ni
最大值	0.83	0.59	0.39	0.45	0.38	0.20	0.73	0.38	0.65
最小值	0.11	0.17	0.26	0.07	0.06	0.03	0.21	0.06	0.25
平均值	0.54	0.35	0.32	0.24	0.18	0.08	0.36	0.21	0.44
标准偏差	0.16	0.11	0.02	0.09	0.07	0.03	0.08	0.08	0.11

0.26~0.39、0.07~0.45、0.06~0.38、0.03~0.20 和 0.06~0.38, 均 < 0.7, 处于清洁环境。As 单项污染指数范围为 0.21~0.73(图 6), 在研究区海域以清洁环境为主, 仅在小钦岛西北部海域为尚清洁环境, 分布范围较小。Cr 单项污染指数范围为 0.11~0.83(图 6), 在各岛屿周边海域为尚清洁环境。

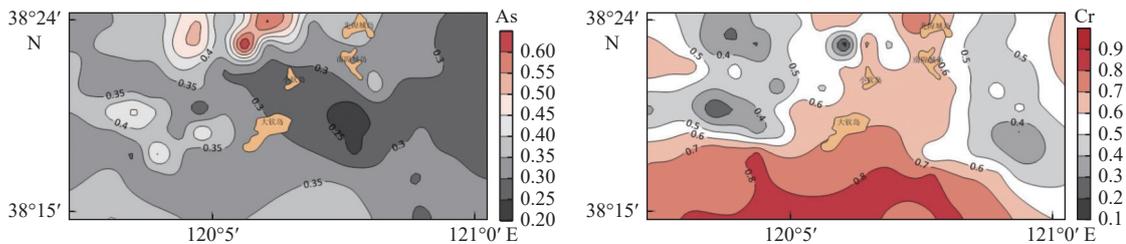


图 6 As、Cr 单项污染指数空间分布特征

Fig.6 Spatial distribution characteristics of single pollution index of As and Cr

3.3.3 地累积指数法

以迟清华等^[32]所提出的渤海表层沉积物的背景值作为参比值, 对研究区表层沉积物重金属元素地累积指数进行计算统计(表 7)。单个元素地累积指数均值大小顺序为 Pb(-0.67) > Cd(-0.68) > As(-0.99) > Cr(-1.06) > Cu(-1.51) > Zn(-1.53) > Ni(-1.62) > Hg(-1.80), 表明研究区整体处于未污染环境。

据表 7 所示, 研究区样品中 Cr、Cu、Pb、Zn、Hg、Ni 和 As 元素地累积指数范围分别为 -3.3~-0.37、-2.47~-0.57、-0.92~-0.37、-3.20~-0.51、-3.01~-0.41、-3.23~-0.49 和 -0.99~-0.02, 均处于未污

染环境。样品中 Cd 元素地累积指数范围分别在 -2.21~0.51, 有部分样品处于轻微污染环境, 如图 7 所示, Cd 在大钦岛西南部和北隍城岛西部海域处于轻微污染环境。

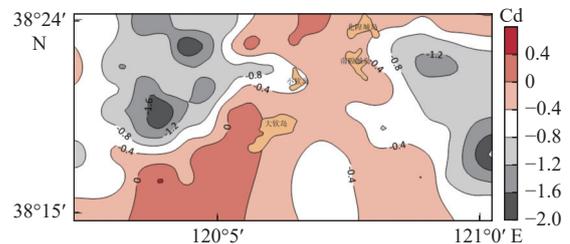


图 7 Cd 元素地累积指数空间分布特征

Fig.7 Spatial distribution characteristics of Cd geoaccumulation index

表 7 表层沉积物地累积指数

Table 7 Geoaccumulation index of heavy metals in the surface sediments

参数	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Ni
最大值	-0.37	-0.57	-0.37	-0.51	0.51	-0.41	-0.02	-0.49
I_{geo} 最小值	-3.3	-2.47	-0.92	-3.20	-2.21	-3.01	-1.66	-3.23
平均值	-1.06	-1.51	-0.67	-1.53	-0.68	-1.80	-0.99	-1.62

4 讨论

4.1 重金属含量分布影响因素分析

沉积物对重金属元素的吸附和迁移作用, 成为

重金属元素的主要载体, 并会随着沉积物通过海水作用运移至近海^[1]。沉积物粒度不同对重金属的吸附和迁移能力也不同, 导致重金属含量不同, 小粒径沉积物富含有机质, 重金属与有机质通过表面吸附、离子交换和螯合反映形成金属有机络合物, 进而对重金属迁移和生态毒性造成影响^[38], 而大粒径沉积物富含二氧化硅, 有机质含量较少, 对重金属的吸附和富集能力较弱^[39-40]。

从表 8 中可以看出, Cr、Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、

Ni、Fe₂O₃、Al₂O₃ 和有机质与平均粒径(Mz)之间呈中-高度正相关性($P < 0.01$), 如图 3 和图 4 所示, 重金属元素高值区分布在大钦岛南部海域、北隍城岛北部海域和小钦岛北部海域等沉积物以砂质粉砂为主的海域; As 元素与 Mz 之间未发现明显相关性, 这是由于 As 元素富集与沉积物中黏土含量有关^[41], 而研究区中沉积物黏土含量较低(图 3)。以上可以看出, 粒度是影响长岛海域表层沉积物重金属含量及分布的重要原因之一。

表 8 沉积物中各成分含量相关性分析

Table 8 Correlation analysis of components content in the sediments

	Mz	Cr	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Ni	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	有机质
Mz	1											
Cr	0.84**	1										
Cu	0.93**	0.86**	1									
Pb	0.46**	0.49**	0.54**	1								
Zn	0.94**	0.92**	0.94**	0.54**	1							
Cd	0.65**	0.53**	0.60**	0.36**	0.60**	1						
Hg	0.67**	0.59**	0.73**	0.48**	0.69**	0.60**	1					
As	-0.02	-0.05	0.06	0.10	0.04	0.08	0.08	1				
Ni	0.94**	0.92**	0.94**	0.52**	0.98**	0.59**	0.67**	0.04	1			
Fe ₂ O ₃	0.62**	0.78**	0.68**	0.39**	0.71**	0.37**	0.48**	0.11	0.72**	1		
Al ₂ O ₃	0.45**	0.92**	0.51**	0.35**	0.59**	0.10	0.21*	0.20*	0.60**	0.73**	1	
有机质	0.81**	0.78**	0.85**	0.51**	0.86**	0.63**	0.81**	0.06	0.83**	0.66**	0.41**	1

** 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

长岛海域表层沉积物粒度分布特征主要受潮流^[13,36,42-43]和波浪^[13]影响, 进而影响着重金属元素的分布。含砾沉积物主要分布于南-北隍城岛周边海域, 这是因为研究区海域涨潮潮流自西向东流, 且流速不断增加^[13], 形成冲刷槽和侵蚀洼地, 但由于受到小钦岛、南隍城岛和北隍城岛阻挡作用, 近岸流速小于离岸流速, 造成含砾沉积物在小钦岛、南-北隍城岛西部沉积, 而靠近北隍城岛和南隍城岛附近沉积细粒沉积物。南隍城岛东部、小-大钦岛西部海域由于海水深度大, 潮流流速大, 且波浪作用较小^[13], 沉积较粗沉积物。在砂质粉砂区和粉砂质砂区中, 水深较浅, 潮流作用较弱, 海底地形地貌主要受到波浪作用控制, 海底地貌以堆积平原及水下堆积岸坡为主, 沉积细粒沉积物。如图 4 所示, 大部分重金属元素高值区位于砂质粉砂区(图 3、表 3), 尤其是 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 元素, 其分布与研究区地形地貌、海域沉积物分布规律和潮流流向及强弱。由于沉积物类型影响着重金属元素分布及其含量密切相关。因此, 研究区重金属元素

分布及含量受地形地貌、潮流等因素控制。

4.2 重金属来源分析

4.2.1 相关性分析

大部分重金属元素含量空间分布基本相似, 尤其是 Cr、Cd、Cu、Zn、Pb 和 Ni 元素。高值区分布在大钦岛南部海域、北隍城岛北部海域和小钦岛北部海域, 低值区分布在研究区东部海域及西北部海域, 总体上呈现出从岛屿和南部海域向两侧递减的趋势。近年来, 研究区海域近海养殖面积由岛屿向东西部海域逐年扩大, 重金属分布位置可能受到潮流^[13]和近海养殖污染的影响, 导致近岸重金属含量增加。

为了探讨各种重金属之间的联系及其来源, 通过统计方法对沉积物中重金属元素、Fe₂O₃、Al₂O₃ 和有机质进行了相关性分析(表 8)。如表 8 所示, As 与其他重金属元素未发现明显相关性($r < 0.2$), 说明 As 元素的来源与其他元素无关。其余重金属元素之间存在着显著相关性, 比如 Cr、Cu、Zn 和

Ni 相互之间的相关系数很高 ($r > 0.86$), 说明 Cr、Cu、Zn 和 Ni 在潜在来源和内在联系存在高度一致性。而段云莹等^[44] 和张思洋等^[45] 分别在莱州湾和锦州湾得到数据中 Cr 与其他重金属未发现明显相关性; 韩志轩等人^[46] 在珠三角海域中发现 Cr、Cu、Zn 和 Ni 含量及分布受到珠三角地区冲积平原土母质的影响相同, 说明 Cr、Cu、Zn 和 Ni 在长岛海域受到岛屿及近岸土母质影响较大。

通常情况下认为, 地壳成分中含有大量的 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 ^[47], 研究区重金属元素除 Pb、Cd 和 As 外, 其余重金属元素与 Fe_2O_3 和 Al_2O_3 呈现中度以上相关性, 因为地壳自然风化过程中可能产生 Cu、Zn 和 Ni^[44,48]。大部分重金属元素与有机质呈显著相关, 尤其是与 Cr、Cu、Zn、Hg 和 Ni 的相关系数更为显著 ($r > 0.78, P < 0.01$) (表 8), 表明有机质含量影响大部分重金属元素含量及空间分布特征。结合前人研究^[49-50] 结果, 人为微量金属通常吸附在有机质中, 为此我们推测 Pb 和 Hg 除了受到地壳自然风化影响, 还受到人为因素的影响; Cr、Cu、Zn 和 Ni 主要受到地壳自然风化影响, 受到人为因素影响较小。

4.2.2 聚类分析

对重金属元素与有机质进行了聚类分析, 图 8 中可以看出, 聚类分析图共分为 2 簇, 簇 1 为 Cd、有机质、As、Cu、Ni、Pb 和 Hg, 簇 2 为 Cr 和 Zn。簇 1 比较复杂, 其中 Cd、As 和有机质聚类较为显著, 通常认为海洋养殖等人类活动会产生 Cd 和 As^[36,51], 且变异程度较大(表 4)。前人研究认为^[47-48,52] 人类活动通常影响重金属变异系数, 结合相关性分析来看, Cd 和 As 可能主要受到人类活动影响, 受到地壳自然风化影响小。Cu、Ni、Pb 和 Hg 聚类也较为显著, 通常认为生活污水等人类活动会产生 Cu 和

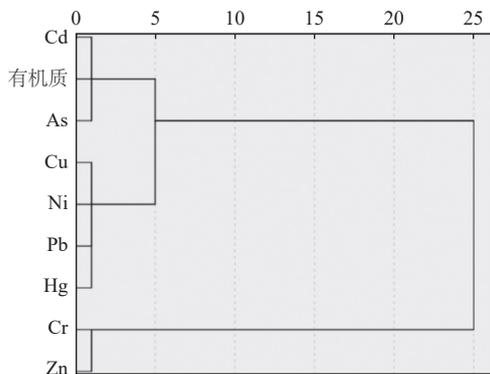


图 8 有机质与重金属元素聚类分析图

Fig.8 Dendrogram of cluster analysis between heavy metals and TOC

Hg 等, 并且除 Pb 外, 变异系数较高(表 4), 推测 Cu、Ni 和 Hg 受到人类活动影响, 而 Pb 受人类活动较小。簇 2 中, 仅有 Cr 和 Zn, 说明 Cr 和 Zn 来源与其他重金属存在区别, 且 Cr 和 Zn 与除 As 外重金属元素相关性较为显著, 存在一定同源性, 但 Cr 和 Zn 在长岛海域受到岛屿及近岸土母质影响较大, 受人类影响较小。

4.2.3 主成分分析

为了更好地解析研究区表层重金属的污染来源, 我们采用了 R 型因子分析。从表 9 中可以看出, 相关系数矩阵的前 2 个特征值分别为 5.14 和 1.04, 方差贡献率分别为 64.29% 和 12.95%, 累积方差贡献率为 77.24%。应用主成分 1 和主成分 2 数据信息, 可解释研究区重金属元素来源。

表 9 研究区表层沉积物重金属元素主成分特征值和贡献值
Table 9 Eigenvalues and contribution rates of main components of heavy metal elements in surface sediments of the study area

主成分因子	特征值	初始特征值方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	5.14	64.29	64.29
2	1.04	12.95	77.24
3	0.70	8.69	85.93
4	0.64	7.93	93.86
5	0.30	3.74	97.61
6	0.12	1.52	99.12
7	0.05	0.65	99.78
8	0.02	0.23	100.00

主成分 1(PC1)解释了总方差的 64.29%, Cr (0.90)、Cu(0.95)、Zn(0.96)、Hg(0.80)、Ni(0.96) 在 PC1 上具有及较高的载荷(表 10)。而且, 除 As 外其余重金属元素之间存在显著相关性(表 8), 存在同源性。根据潜在生态风险指数法, Cd 和 Hg 有部分站位处于中等生态风险级别; 根据内梅罗综合

表 10 表层沉积物重金属元素主成分旋转载荷矩阵

Table 10 Rotation load matrix of principal components of heavy metal elements in the surface sediments

重金属	PC1	PC2
Cr	0.90	-0.18
Cu	0.95	-0.03
Pb	0.63	0.16
Zn	0.96	-0.07
Cd	0.72	0.11
Hg	0.80	0.11
As	0.06	0.97
Ni	0.96	-0.08

污染指数法, Cr 在各岛屿周边海域为尚清洁环境。根据地累积指数法, Cd 在大钦岛西南部和北隍城岛西部海域处于轻微污染环境。综上说明, Cd、Hg、Cu、Zn 和 Cr 主要受到岛屿及近岸土母质影响较大, 受养殖、排污等人类活动影响较小。

主成分 2(PC2) 解释了总方差的 12.95%, As (0.97) 在 PC1 上具有及较高的载荷(表 10)。As 元素平均含量低于渤海的背景值, 且 As 仅与 Al_2O_3 存在相关性(表 8), 说明 As 元素与黏土和阳离子交换量等土壤性质有高度的相关性, 表明其受到土壤母质的影响^[53]。因此, PC2 是仅受到自然因素影响的组分。

4.3 评价方法结果对比

对研究区表层沉积物进行潜在生态风险指数法、内梅罗综合污染指数法和地累积指数法风险评估, 结果表明长岛北四岛海域表层沉积物整体风险程度低。然而, 由于各种方法的适用范围、背景值等因素的不同, 造成各方法间存在差别与联系^[34,44]。比如, 潜在生态风险指数法引入毒性系数做校正, 通过实测值、背景值和毒性系数的横向比较; 内梅罗综合污染指数法通过实测值和标准值做横向比较; 地累积指数法通过实测值与背景值做横向比较。

整体来看, 各评估方法对各元素风险程度排序略有差别。潜在生态风险指数法反映: Cd 和 Hg 有部分站位处于中等生态风险级别, 其余站位处于轻微生态风险级别; 内梅罗综合污染指数法显示 As 仅在小钦岛西北部海域为尚清洁环境, Cr 在各岛屿周边海域为尚清洁环境; 地累积指数法反映: Cd 在大钦岛西南部和北隍城岛西部海域处于轻微污染环境。

联系性在于 3 种方法均表明研究区整体处于很低的风险环境, 且各评估方法对部分元素风险程度排序存在相同点, 表明各方法间存在一定的可比性^[34]。

5 结论

(1) 研究区海底表层沉积物可以分为泥质砂质砾、砾质泥质砂、砾质泥、含砾泥质砂、砂、粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂质砂。其中砂质粉砂和粉砂质砂占研究区海域面积的 87.13%。

(2) 研究区表层沉积物重金属含量由高到低依次为 $Cr > Zn > Pb > Ni > Cu > As > Cd > Hg$ 。总体

特征是: 高值区分布在大钦岛南部海域、北隍城岛北部海域和小钦岛北部海域, 低值区分布在东部海域及西北部海域。

(3) 通过相关性、聚类分析和主成分分析结果表明, Cd、Hg、Cu、Zn 和 Cr 存在显著相关性, Cd、Hg、Cu、Zn 和 Cr 主要受到岛屿及近岸土母质影响较大, 受养殖、排污等人类活动影响较小; As 仅受到岛屿及近岸土母质影响。

(4) 通过对研究区表层沉积物评估结果表明, 研究区整体处于很低的风险环境; 潜在生态风险指数法反映, Cd 和 Hg 有部分站位处于中等生态风险级别; 内梅罗综合污染指数法反映, As 仅在小钦岛西北部海域为尚清洁环境, Cr 仅在各岛屿周边海域为尚清洁环境; 地累积指数法反映, Cd 仅在大钦岛西南部和北隍城岛西部海域处于轻微污染环境。

参考文献:

- [1] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [2] 陈义兰, 吴永亭, 刘晓瑜, 等. 渤海海底地形特征[J]. 海洋科学进展, 2013, 31(1): 75-82.
- [3] 侯方辉, 王保军, 孙建伟, 等. 渤海海峡跨海通道新构造运动特征及其工程地质意义[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(5): 25-30.
- [4] 史慧杰, 赵铁虎, 褚宏宪, 等. 海域高分辨率24道地震采集技术在渤海海峡跨海通道项目中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(10): 47-56.
- [5] 刘卓, 杨纪明. 日本海洋牧场研究现状及其进展[J]. 水产学报, 2019, 43(9): 1870-1880.
- [6] 唐启升. 渔业资源增殖、海洋牧场、增殖渔业及其发展定位[J]. 中国水产, 2019(5): 28-29.
- [7] 陆凯, 褚宏宪, 孙军, 等. 渤海海峡跨海通道地区海洋地质调查研究进展[J]. 地质通报, 2021, 40(Z1): 287-297.
- [8] 成海燕, 姜胜辉, 张超, 等. 渤海海峡表层沉积物地球化学特征[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(8): 19-28.
- [9] 张剑, 李日辉, 王中波, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的粒度特征及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(5): 1-12.
- [10] 蓝先洪, 李日辉, 张志珣, 等. 渤海东部与黄海北部表层沉积物的元素地球化学记录[J]. 地球学报, 2015, 36(6): 718-728.
- [11] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报(中文版), 2010, 32(4): 139-147.
- [12] 朱爱美, 张辉, 崔菁菁, 等. 渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 134-144.
- [13] 张伟. 渤海海峡南部海域地貌特征及控制因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- [14] 王润梅, 唐建辉, 黄国培, 等. 环渤海地区河口及海洋表层沉积物有机质特征和来源[J]. 海洋与湖泊, 2015, 46(3): 497-507.
- [15] 李龙强, 胡泓, 吕向梨, 等. 渤海中部和黄海北部表层沉积物

- 重金属含量及生态风险评价[J]. *海洋湖沼通报*, 2020(1): 84-92.
- [16] 刘建华, 王庆, 仲少云, 等. 渤海海峡老铁山水道动力地貌及演变研究[J]. *海洋通报*, 2008, 27(1): 70-76.
- [17] 王庆, 仲少云, 刘建华, 等. 山东庙岛海峡的峡道动力地貌[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(2): 17-24.
- [18] 崔震. 北长山岛海水入侵特征及风险评价研究[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2015.
- [19] 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.
- [20] 国家质量技术监督局. GB 17378—1998 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [21] 国家技术监督局. GB/T 12763—1991 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1991.
- [22] KRUMBEIN W C, SLOSS L L. Stratigraphy and Sedimentation[M]. 2nd ed. San Francisco: W H Freeman, 1963.
- [23] FOLK R L, WARD W C. Brazos River Bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3-27.
- [24] DAI J C, SONG J M, LI X G, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 656-667.
- [25] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [26] 马舒欣, 乔永民, 唐梦瑶, 等. 广州市主要湖泊沉积物重金属污染与生态风险评价[J]. *生态与环境学报*, 2019, 35(5): 600-607.
- [27] 种衍飞, 郝义, 臧浩, 等. 日照市海岸带沉积物重金属元素分布特征研究[J]. *山东国土资源*, 2020, 36(1): 13-21.
- [28] 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(3): 354-360.
- [29] 徐艳东, 魏潇, 杨建敏, 等. 山东近岸海域表层沉积物7种重金属污染特征和生态风险评估研究[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 651-658.
- [30] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 33-37.
- [31] 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [32] 迟清华, 鄢明才. 应用地球化学-元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [33] 国家环境保护总局. HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京: 中国环境出版社, 2004.
- [34] 于林松, 施泽明, 胡尊芳, 等. 基于土壤地球化学分区的耕地土壤重金属潜在生态风险评价: 以郯城县某镇大比例尺调查区为例[J]. *生态与环境学报*, 2020(3): 34-41.
- [35] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *GeoJournal*, 1969, 2(3): 109-118.
- [36] XU G, LIU J, PEI S F, et al. Sediment properties and trace metal pollution assessment in surface sediments of the Laizhou Bay, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(15): 11634-11647.
- [37] 赵玉庭, 董晓晓, 王立明, 等. 海洋沉积物重金属生态风险评价方法比较及实例验证: 以莱州湾为例[J]. *海洋通报*, 2019, 38(3): 353-360.
- [38] 戴纪翠, 高晓薇, 倪晋仁, 等. 深圳近海海域沉积物重金属污染状况评价[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(1): 85-90.
- [39] LIU X B, LI D L, SONG G S. Assessment of heavy metal levels in surface sediments of estuaries and adjacent coastal areas in China[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2017, 11(1): 85-94.
- [40] FENG H, JIANG H Y, GAO W, et al. Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1185-1197.
- [41] 刘丽华. 福建省西南近岸海域表层沉积物重金属污染特征与风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2022, 41(2): 200-207.
- [42] 赵保仁, 庄国文, 曹德明, 等. 渤海的环流、潮余流及其对沉积物分布的影响[J]. *海洋与湖沼*, 1995, 26(5): 466-473.
- [43] 计建强. 莱州湾水动力模式及沉积动力模式的构建及模拟[D]. 宁波: 宁波大学, 2016.
- [44] 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.
- [45] 张思洋, 于大涛, 张戈. 锦州湾三河口入海口重金属分布特征及污染评价[J]. *海洋地质前沿*, 2020, 36(6): 20-25.
- [46] 韩志轩, 王学求, 迟清华, 等. 珠江三角洲冲积平原土壤重金属元素含量和来源解析[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3455-3463.
- [47] ZHOU G H, SUN B B, ZENG D M, et al. Vertical distribution of trace elements in the sediment cores from major rivers in east China and its implication on geochemical background and anthropogenic effects[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 139: 53-67.
- [48] 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等. 莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(4): 520-528.
- [49] EL BILALI L, RASMUSSEN P E, HALL G E M, et al. Role of sediment composition in trace metal distribution in lake sediments[J]. *Applied Geochemistry*, 2002, 17(9): 1171-1181.
- [50] HOODA P S, ALLOWAY B J. Cadmium and lead sorption behaviour of selected English and Indian soils[J]. *Geoderma*, 1998, 84(1/3): 121-134.
- [51] LI C L, KANG S C, ZHANG Q G. Elemental composition of Tibetan Plateau top soils and its effect on evaluating atmospheric pollution transport[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(8/9): 2261-2265.
- [52] CELO V, BABI D, BARAJ B. An assessment of heavy metal pollution in the sediments along the Albanian coast[J]. *Water Air and Soil Pollution*, 1999, 111(1/4): 235-250.
- [53] 王翠秀. 莱州湾南岸土壤重金属空间分布及来源解析[D]. 济南: 山东师范大学, 2021.

Spatial distribution of heavy metals in the surface sediments of Changdao Island and their sources and pollution assessment

LEI Yanxiang^{1,2}, ZHANG Bin^{1,2}, WU Zhiguo^{1,2}, WANG Xiaodan^{1,2}, TANG Ronghui^{1,2}, HU Lei^{1,2},
ZHANG Pengpeng^{1,2}, WANG Enqiang^{1,2}, TENG Yongbo^{1,2*}

(1 Shandong Geophysical and Geochemical Exploration Institute, Ji'nan 250013, China;

2 Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Ji'nan 250013, China)

Abstract: A survey was conducted in July-August 2020 to evaluate the risk of heavy metals in the northern waters of Changdao, surface sediments from 101 sites were sampled, the types and particle size distributions of the surface sediments were studied, and the content, distribution characteristics, and correlations of 8 types of heavy metal elements were explored, including AS, PB, HG, CR, CD, CU, Zn, and Ni. The potential ecological risk index method, sediment environmental quality assessment, and geoaccumulation index method were used. Results show that heavy metal elements were mainly enriched in the waters of the southern part of Daqin Island, the northern part of Beihuangcheng Island, and the northern part of Xiaoqin Island. Most heavy metal elements were significantly positively correlated with the average particle size; sediment types were affected by tidal currents and topography. The results of risk assessment show that the study area was in a very low risk environment as a whole, and the potential ecological risk index method reflects that Cd and Hg in only some stations were at medium ecological risk; the sediment environmental quality assessment reflects that Cr, Cu and Zn were not in the natural background environment only in some sites; the geoaccumulation index method reflects that only some Cd sites were in a slightly polluted environment. The source analysis shows that the concentrations of Cd, Hg, Cu, Zn, Hg, Ni, and Cr were affected by human activities such as aquaculture and sewage discharge, while that of As was only affected by natural soils in nearby islands and nearshores.

Key words: Changdao Island; surface sediments; heavy metals; risk assessment; source analysis