

张绪振, 褚宏宪, 孔令号, 等. 莱州湾表层海水重金属分布特征及生态环境评价[J]. 海洋地质前沿, 2024, 40(11): 25-34.

ZHANG Xuzhen, CHU Hongxian, KONG Linghao, et al. Distribution and ecological environment assessment of heavy metals in surface seawater of Laizhou Bay[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(11): 25-34.

莱州湾表层海水重金属分布特征及生态环境评价

张绪振^{1,2}, 褚宏宪^{1,2}, 孔令号^{1,2*}, 曹立成³, 张德程^{1,2}, 李海波⁴, 徐华源⁵

(1 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 烟台 264000; 2 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 烟台 264000; 3 中国地质大学(武汉)湖北海洋地质资源重点实验室, 武汉 430074; 4 龙口市海洋发展和渔业局, 烟台 265199; 5 寿光市海洋渔业发展中心, 潍坊 262799)

摘要:于 2023 年 6 月在莱州湾海域采集 30 个站位的表层海水样品, 利用单因子指数法、潜在生态风险法以及主成分分析法评价了莱州湾海域表层海水重金属元素分布特征、污染程度及潜在生态风险。结果表明: 莱州湾海域表层海水中元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 的浓度平均值分别为 9.33、1.68、15.11、6.76、0.47、0.11、4.28 $\mu\text{g/L}$, 单因子污染指数平均值分别为 1.38、1.68、0.76、0.14、0.39、1.50、0.21, 潜在生态风险指数平均值分别为 6.92、8.16、0.76、0.27、11.77、60.15、2.11, 综合生态风险指数平均值为 89.84; 莱州湾海域海水水质均未超过国家三类海水水质标准, 除个别站点外莱州湾海域表层海水综合潜在生态风险等级为轻微; 重金属元素分布受海域水动力因素影响, Cu、Pb、Zn、Hg、Cd 在莱州湾东部环流影响下不断在海域中心富集, Cr、As 受莱州湾西部顺时针环流及中部东北向出流的影响成环带状分布。主成分及相关性分析表明, Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 之间的相关系数较小, 相互之间都不具有相似的污染水平或共同的污染来源; 重金属浓度与中国其他海域相比整体处于中等水平, 与 2020 年莱州湾海水重金属浓度相比, 整体呈现一定增长趋势, 且由沿岸向海域中心迁移富集。

关键词:莱州湾; 表层海水; 重金属; 分布特征; 生态评价

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2024.043

0 引言

海湾是人类活动影响尤为敏感区域, 特别是水动力条件较差的半封闭海湾, 重金属等环境污染物易于在海水中累积^[1], 重金属是有毒的污染物, 在水体中具有稳定、持久、不可生物降解的特性^[2-4], 海洋中的重金属尤其是可溶态重金属, 可通过生物富集作用^[5], 对海洋中的生物产生致死、阻化及致畸等毒害效应, 并最终通过食物链危害人体健康^[6], 因

此, 海水中重金属的含量与分布以及产生的毒性效应问题长期以来受到大量关注^[7]。莱州湾位于山东半岛北部、渤海南部, 西起黄河口, 东至龙口的砣矶岛高角, 主要发展石油化工、船舶运输以及水产养殖等产业, 历年渔获量和调查资料表明, 莱州湾是中国渔业生产力最高的海域之一, 是中国重要的渔场^[8-9]。莱州湾沿岸入海河流较多, 有胶莱河、泽河、黄河、清水河、胶河等, 与海水产生较强的水沙交互作用, 同时, 河流中的污染物在水沙之间发生迁移进入莱州湾水体当中^[10-11]。近年来, 随着山东沿海经济的不断发展, 莱州湾在经济发展的同时也存在水体污染的风险, 莱州湾海域的生态环境承受的压力也越来越大, 重金属污染成了当前的科学研究和社会关注的热点问题。

国内外针对海水的重金属污染研究较多, 国外学者的研究主要为区域之间的对比和环境评估。SHRIADAH 等^[12]于 2003 年报道了红海和埃及亚喀

收稿日期: 2024-02-19

资助项目: 中国地质调查局项目“莱州湾海岸带自然资源综合调查”(DD20230411)

第一作者: 张绪振(1992—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查与监测方面的研究工作。E-mail: zxz0381@163.com

* 通讯作者: 孔令号(1992—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿山生态环境及海岸带地质调查方面的研究工作。E-mail: 1245046910@qq.com

莱州湾海水中的微量重金属含量及分布特征,研究表明,海水重金属具有小范围的变化和区域的不规则性,且与其他金属相比,Fe、Cd 和 Pb 的浓度明显更高;AL-HASHIM 等^[13]对沙特阿拉伯东部 Al-Uqair 海岸线表层海水重金属进行了环境评估,表明重金属的来源混合了人为因素及自然因素,并且人为因素对 Cr、Zn、Cu、Hg、Pb、Sb 等的控制以及自然因素对 Sr、Fe、Al 的控制日益加强。国内学者对于海水重金属污染的研究主要集中在年际间^[14-16]、季度间^[17-20]的变化以及对污染状况^[3,21-23]进行评价。贺志鹏等^[14]对南黄海 1997—2004 年表层海水重金属年际间的变化趋势进行了研究,认为 8 年间南黄海表层海水重金属浓度变化趋势虽然多有不同,但均值符合国家一类海水水质标准,总体海水水质良好;孙业皎等^[20]对桑沟湾表层海水中重金属含量季节变化及污染进行分析,研究表明桑沟湾表层海水中重金属含量较低,整体上处于清洁水平,符合国家一类海水水质标准;公金文等^[21]对广东汕尾红海湾海域的重金属含量分布特征及污染状况进行评价,认为该海域的重金属污染物主要为 Cd、Hg 和 Pb,其中 Hg 的单元素生态风险指数最高。目前,对于莱州湾重金属的研究多集中于表层沉积物的重金属分布特征、来源及生态环境评价^[11,24-26],相关研究结果表明,2008—2016 年莱州湾表层沉积物重金属中 As、Hg 主要受人为活动影响,各重金

属的含量整体呈现增加趋势,分布特征则主要受陆源性输入与湾内潮流运动控制。秦华伟等^[27]研究了莱州湾海水重金属对浮游植物的影响,但并未深入分析表层海水重金属的分布特征。整体来看,前人针对莱州湾表层海水重金属分布及环境评价的研究较少。

本文利用 2023 年在莱州湾海域采集的表层海水样品数据,采用单因子污染指数法及潜在生态风险法对该区域表层海水重金属污染状况进行评价,并通过相关性分析,探讨重金属元素的来源及成因上的联系,以期对莱州湾海域生态环境保护与治理提供基础数据和科学依据。

1 材料和方法

1.1 样品采集

2023 年 6 月在莱州湾海域开展航次调查,布设 30 个采样站位采集表层海水样(图 1)。样品采集过程中均使用有机玻璃作为采水器,采集水面下 0.2 m 处的海水样。为防止采集过程中样品污染,采样位置位于船首,于逆风向时进行样品采集,避免了采样船自身尾气及其他因素的影响。塑料样品瓶先用 HNO₃ 浸泡 24 h,后用去离子水进行清洗,采集海水样品时先将采水器海水清洗 2 遍,另利用

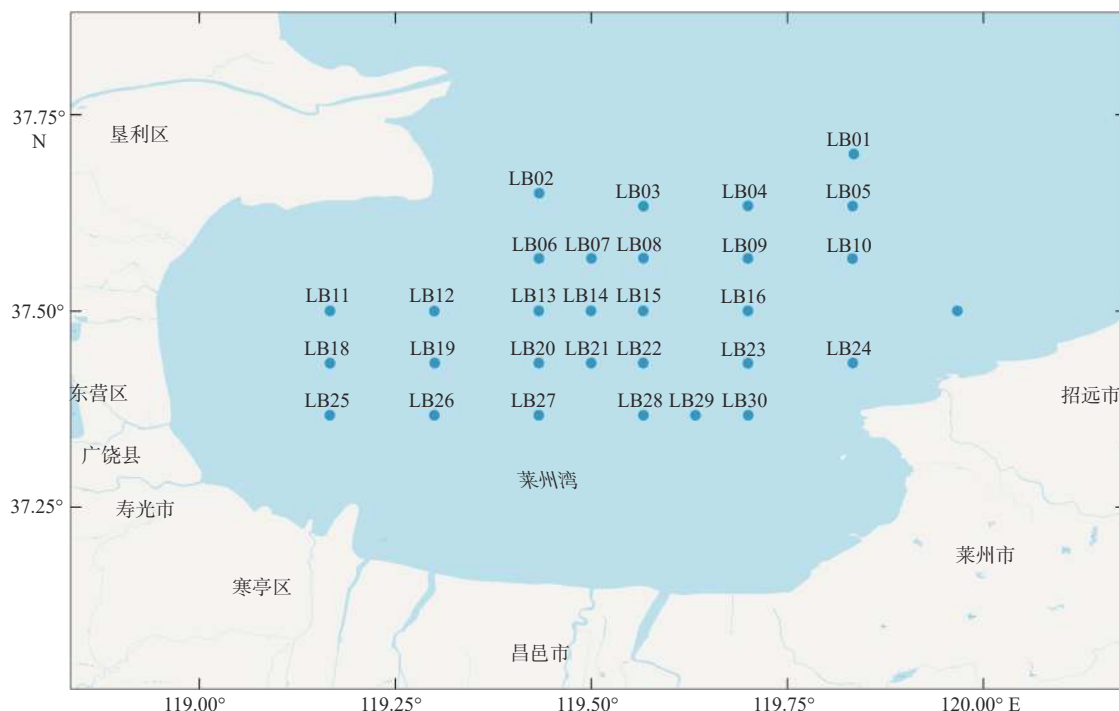


图 1 莱州湾采样站位分布

Fig.1 Location and distribution of sampling station in Laizhou Bay

0.45 μm 滤膜对海水样品进行过滤后盛入样瓶中。而后对于测试 Cu、Zn、Pb、Cd 的样品加入 HNO_3 试剂至 $\text{pH}<2$, 对测试 Cr、Hg、As 的样品加入 H_2SO_4 试剂至 $\text{pH}<2$, 海水样品均放入随船冰箱进行冷藏保存。所有表层海水样品的采集、存储、预处理均严格按照《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)^[28]、《海洋监测规范 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3—2007)^[29]、《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[30] 操作。

1.2 分析方法及评价标准

莱州湾表层海水样重金属均按照《海洋监测规范 第 4 部分: 海水分析》(GB 17378.4—2007)^[30] 进行检测分析。其中, Cu、Pb、Cd、Cr 利用无火焰原子吸收分光光度法, Zn 利用火焰原子吸收分光光度法, 采用安捷伦公司的 AA-240DUO 原子吸收分光光谱仪进行测定, 检出限分别为 1.1、0.03、0.01、0.4、3.1 $\mu\text{g/L}$ 。对于 Cu、Pb、Cd, 将海水样品 pH 值调节至 5~6, Zn 则调节至 3.5~4.0, 分别与吡咯烷二硫代氨甲酸铵 (APDC) 和二乙氨基二硫代甲酸钠 (DDTC-Na) 混合液螯合, 经甲基异丁酮 (MIBK)-环己烷混合溶液萃取分离后, 于各自的特征波长下用石墨炉原子吸收光谱法测定其吸收值。对于 Cr, 将海水样品 pH 值调节为 3.8 ± 0.2 , Cr 被高锰酸钾氧化后, 同二乙氨基二硫代甲酸钠螯合, 用甲基异丁酮萃取, 于 Cr 的特征吸收波长处测定原子吸收值。As、Hg 利用原子荧光法, 采用廊坊迪远仪器有限公司 XGY-1011A 原子荧光分光光度计进行测定, 检出限分别为 0.007、0.5 $\mu\text{g/L}$ 。对于 Hg, 海水样经硫酸-过硫酸钾消化, 加入还原剂硼氢化钾, 将汞离子还原成单质汞。以氩气为载气将汞蒸气带入原子荧光光度计的原子化器中, 以特种汞空心阴极灯为激发光源, 测定汞原子荧光强度。对于 As, 在酸性介质中, 五价砷经硫脲-抗坏血酸还原为三价砷, 后用硼氢化钾将三价砷转化为砷化氢气体, 由氩气作载气将其导入原子荧光光度计的原子化器进行原子化, 以 As 特种空心阴极灯作激发光源, 测定砷原子的荧光强度。所有测试样品均采用空白样品、平行样品和加标回收对数据质量进行控制。

1.3 评价方法

本文采用单因子污染指数法^[31-33]和潜在生态风险法^[34]评价表层海水重金属污染情况和潜在生态风险评价。潜在生态风险法根据文献^[23,26,35]

将 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As、Hg 污染参数值分别设定为 5、5、1、2、30、10、40, 重金属的潜在生态风险指数 (E_r)、综合生态风险指数 (RI) 的具体评价指标参考^[1,3] 设定如下, 见表 1。

表 1 E_r 和 RI 与生态风险等级的对应关系

Table 1 Relationship among E_r (single potential ecological risk index), RI (overall potential risk index) and ecological risk level

E_r 范围	单项污染物生态风险分级	RI 范围	综合生态风险指数分级
$E_r < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_r < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_r < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_r < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_r \geq 320$	极强		

1.4 数据处理方法

采用 surfer23.0 软件进行平面分布图绘制, 利用 Excel 2016 软件进行数据分析, 使用 spss27.0 软件进行主成分及相关性分析。

2 结果与分析

2.1 重金属分布特征

利用单因子污染指数法 (P_i) 研究并统计了莱州湾表层海水中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg 7 种重金属元素的含量和分布特征, 统计结果见表 2。

研究区表层海水的 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 的浓度均值分别为 6.92、1.63、15.11、6.76、0.39、0.08、4.23 $\mu\text{g/L}$, 按照高低进行排序依次为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{Hg}$, 从均值看, Zn、Cr、Cd、As 未超过国家一类海水标准。从单因子污染指数平均值来看, 重金属元素污染系数值 $\text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cr}$, 其中, Pb、Hg、Cu 的均值均 > 1 , 表明该区表层海水中主要污染因子为 Pb、Hg、Cu 元素。Zn 元素在 LB14、LB16、LB18 站位和 Cd 元素在 LB15、LB18、LB21、LB22、LB29 站位的单因子污染指数也 > 1 。按照一类海水水质达标率分析, 除 Cr、As 完全达标外, Cu、Pb、Zn、Cd、Hg 均未达标, 达标率最高为 90.00%, 最低为 33.33%, 整体来看达标率较低, 莱州湾海域海水水质均未超过国家三类海水水质标准。

从图 2 可以看出, 海水中 Cu、Pb、Zn、Hg、Cd

表 2 表层海水中重金属含量
Table 2 Contents of heavy metals in surface seawater

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
范围/(μg/L)	1.30~19.2	0.05~5.14	7.80~42.60	4.15~9.16	0.00~2.88	0.00~0.387	2.70~6.90
平均值/(μg/L)	6.39	1.63	15.11	6.76	0.39	0.08	4.23
国家一类海水水质标准 ^[36] /(μg/L)	≤5.0	≤1.0	≤20	≤50	≤1.0	≤0.05	≤20
最小值/(μg/L)	0.00	0.05	0.39	0.08	0.00	0.00	0.13
P_i 最大值/(μg/L)	4.10	5.15	2.13	0.18	2.88	7.74	0.35
平均值/(μg/L)	1.38	1.68	0.76	0.14	0.39	1.50	0.21
一类海水水质达标率/%	33.33	33.33	90.00	100	83.33	56.67	100

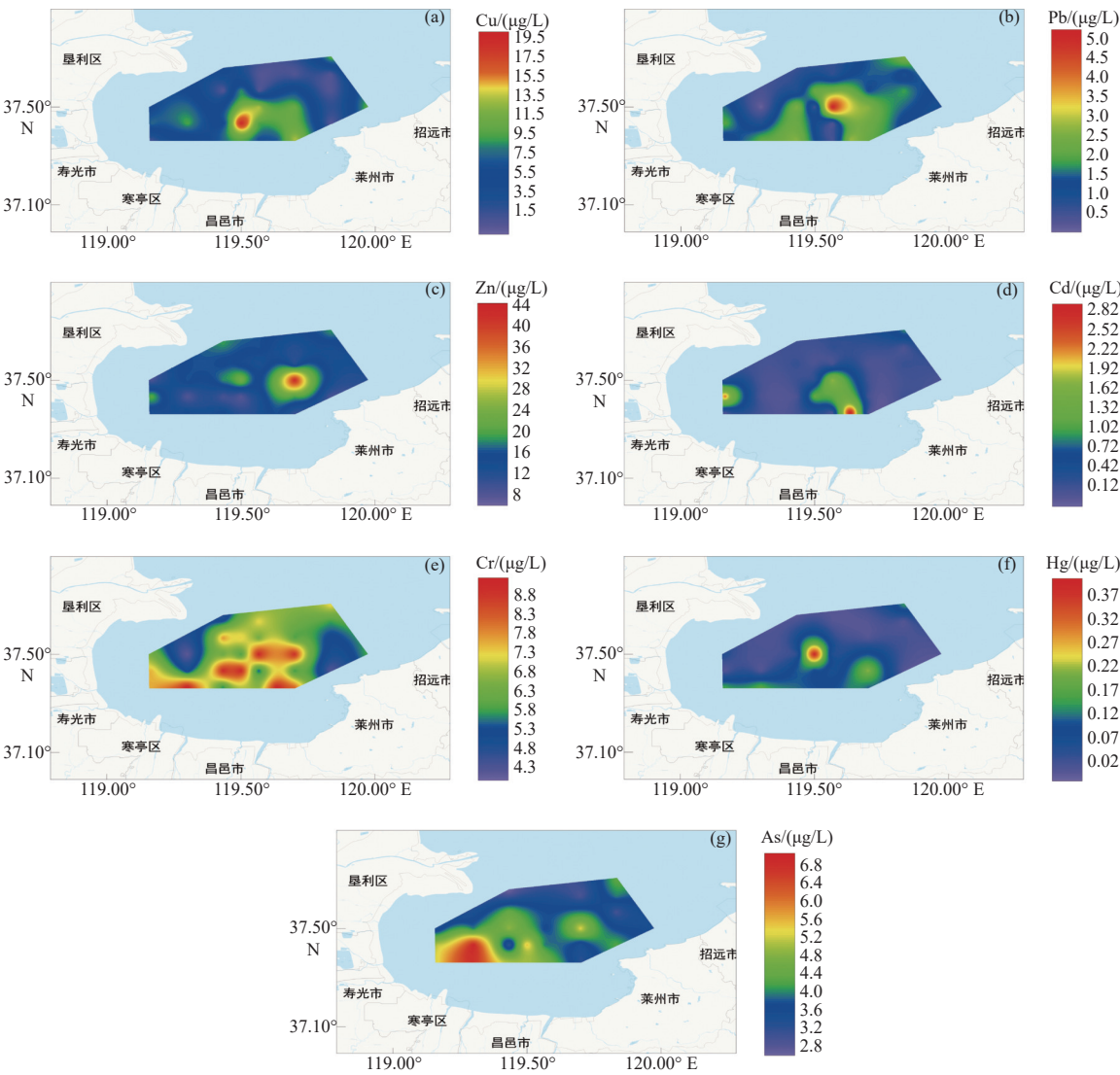


图 2 莱州湾海域表层重金属质量浓度分布

Fig.2 Distribution of mass concentrations of heavy metals in surface waters of Laizhou Bay

元素的含量超标分布特征较为相似,其最高值均出现在海域中心区域。Cu 元素含量值最高在 LB21,为 19.2 μg/L, LB3—6、LB8、LB10、LB24 站位低于检出限,除此外检测出的最低值为 1.30 μg/L,其余站位元素浓度值大部分徘徊在平均值附近,超标率达到

66.7%; Pb 元素最高值在 LB15,浓度值为 5.14 μg/L,最低值在 LB12,浓度值为 0.05 μg/L,除此之外,各断面的浓度平均值无较大差异,在平均值附近浮动,其超标率与 Cu 元素一致,达到 66.7%; Zn 元素最高值在 LB16,浓度值为 42.60 μg/L,最低值在 LB21,

浓度值为 $7.80 \mu\text{g/L}$, 除此之外, Zn 元素各站位的浓度值较为相似, 在平均值附近浮动, 该元素超标率仅为 10%; Hg 元素最高值在 LB14, 浓度值为 $0.387 \mu\text{g/L}$, 在 LB2—5、LB9、LB17—19、LB24 共计 9 个站位低于检出限, 除此外最低值在 LB12, 浓度值为 $0.014 \mu\text{g/L}$, 超标率为 43.33%。Cd 元素生物半衰期长, 并且生物富集作用显著, 是一种致癌物, 也是中国重点监控的污染排放元素之一^[21]。Cd 元素最高值在 LB29, 浓度值为 $2.88 \mu\text{g/L}$, 在 LB5、LB9、LB20、LB25、LB30 站位低于检出限, 除此外检出最低值为 $0.0062 \mu\text{g/L}$, 各站位与浓度平均值相差较大, 超标率为 16.67%。

Cr、As 元素的含量分布特征明显且较为相似。其中, Cr、As 的最高值站位分别为 LB14、LB26, 浓度值分别为 9.16 、 $6.70 \mu\text{g/L}$ 。Cr 的最低值在 LB12, 为 $4.15 \mu\text{g/L}$, As 的最低值在 LB2, 为 $2.70 \mu\text{g/L}$ 。Cr、As 元素最高值均未超过国家一类海水水质标准, 达标率为 100%。

莱州湾海域表层海水水动力结构较为复杂, 在

夏季海域西部区域表现为顺时针的环流, 而东部则表现为逆时针的环流, 中部表现为东北向的出流^[37]。根据重金属元素的分布特征结合莱州湾表层海水环流特征可以看出, Cu、Pb、Zn、Hg、Cd 元素受莱州湾沿岸河流入海携带影响较小, 考虑 Pb、Cd 与船舶尾气大气降尘相关^[20], Cu、Zn 主要与船舶的建造材料相关^[17], Hg 主要受养殖业的影响^[38]。这 5 种元素分布于莱州湾东部海域中心位置, 在莱州湾东部环流影响下不断在海域中心富集^[25]; 莱州湾西南部及中部区域河流较多, 主要包含支脉河、小清河、白浪河等, Cr、As 元素主要受河流入海的部分影响, 其中, Cr 元素最为明显, 在莱州湾西部顺时针环流及中部东北向出流的影响成环带状分布。

2.2 重金属潜在生态风险分析

通过潜在生态风险法评价对莱州湾表层海水 7 种重金属污染情况和潜在生态风险进行评价, 获得重金属元素潜在生态风险指数以及综合生态风险指数, 结果如表 3。

表 3 莱州湾重金属潜在生态风险指数

Table 3 Potential ecological risk coefficients of heavy metals in Laizhou Bay

		Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
E_r	最小值	0.00	0.25	0.39	0.17	0.00	0.00	1.33
	最大值	20.50	25.73	2.13	0.36	86.39	309.69	3.45
	平均值	6.92	8.16	0.76	0.27	11.77	60.15	2.11

从莱州湾重金属元素潜在生态风险指数 E_r 来看, 平均值按照高低排序依次为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Zn} > \text{Cr}$ 。Hg 的 E_r 值范围为 $0 \sim 309.69$, 平均值为 58.17, 最高值出现在 LB14, 该元素生态风险等级为中等, 说明 Hg 为莱州湾表层海水最主要的生态风险因子, 应当进一步控制 Hg 的输入, 防止生态风险加剧。此外, 元素 Cd 虽然均值 < 40 , 但其在 LB29 出现最大值并 > 80 。除 Hg、Cd 外, 其余元素的 E_r 值均 < 40 , 均值范围为 $0.27 \sim 8.39$, 表明这些元素生态风险等级较低, 均为轻微。

重金属综合生态风险指数 RI 值介于 $7.99 \sim 333.42$, 平均值为 89.84, 从平均值看综合潜在生态风险等级为轻微。LB14 站位 RI 值最高, 为 333.42, 其风险等级达到强级别; LB1、LB23、LB26、LB29 站位 RI 值 > 150 , 介于 $156.27 \sim 210.5$, 风险等级为中等; 其余站位均 < 150 , 风险等级为轻微。

图 3 为莱州湾表层海水重金属潜在综合生态风险等级在空间中的分布反映, 可以看出其分布特

征与重金属元素一致。高生态风险分布区域较为集中, 污染分布特征整体呈现由莱州湾西南沿岸向东南延伸, 在莱州湾海域中心区域集中, 83.33% 海域呈轻微污染, 高风险等级海域仅占 3.33%。

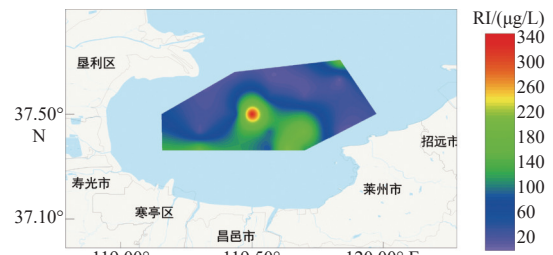


图 3 莱州湾重金属综合潜在生态风险空间分布

Fig.3 Spatial distribution of comprehensive potential ecological risk of heavy metals in Laizhou Bay

2.3 重金属的相关性分析

莱州湾海水受水体动力学和水体环境影响大, 重金属持久性不足, 易发生迁移转化, 因此, 水体中

的重金属来源显得比较复杂。通过重金属元素之间的相关性分析^[31]来表示重金属污染是否同源,如果水体中重金属之间表现出较高显著性,说明水平相似或由同一污染源扩散而来。

通过对莱州湾表层海水 7 种重金属元素进行 Pearson 相关性分析显示,仅 Pb 与 Cr 在双侧检验分析的显著性概率 <0.01 时具有相关性,其相关系数也较小,仅为 0.543,表明 Pb 与 Cr 的相关性比较弱;另外在显著性概率 <0.05 时,Cd 与 Cr、Pb 存在相关性,但相关系数均 <0.5 ,表明 Cd 与 Cr、Pb 的相关性也比较弱。从表 4 可以得出,莱州湾表层海水中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg 等元素之间并未表现出较强的相关性。

同时,利用主成分分析的方法,按特征值 ≥ 1 的标准提取获得 2 个主成分,其特征值与累计方差贡献见表 5。从表中可以看出,第 1 主成分与第 2 主成分特征值分别为 2.303、1.269,贡献率分别为 32.90%、18.13%,总累计贡献率为 51.03%,仅占全部数据的一半。第 1 主成分当中因子变量 Cr 的所占载荷最高为 0.795;第 2 主成分中因子变量 Hg 所占载荷较高为 0.616。通过计算重金属相关系数矩阵,分析得出各元素之间的相关性较小,均呈现弱相关性,即表明该 7 种元素之间均不具有相似的污染水平,或是元素之间具有共同污染来源的概率比较低。海水中的重金属来源较为复杂,在半封闭的莱州湾,由于人为因素其来源更为复杂。通过重金属元素的分布特征可以看出,莱州湾海域表层海水重金属来源受陆源和海域人为活动影响。Cr、As

受陆源影响为主,莱州湾沿岸有较多海水养殖场,养殖及农业活动会产生 Cr、As^[39],西南部及中部区域包含支脉河、小清河、白浪河等,分析主要受河流入海的部分影响,其中 Cr 元素最为明显,在莱州湾西部顺时针环流及中部东北向出流的影响成环带状分布。其余元素受海域人为活动影响为主。海水中 Pb 和 Cd 元素与海上交通活动密切相关^[40],Pb 元素是由于船舶的尾气排放经过大气降尘融入海水,Cd 元素则来源于船体的电镀防腐处理^[41]。Cu、Zn 是合金船舶的组成元素^[3],其来源与海域船只来往频繁相关。Hg 未与其他元素呈现显著相关性,其来源考虑主要受 2 方面影响:船舶的燃料不充分燃烧通过大气降尘进入水体造成^[16];受养殖业影响^[38],如海水养殖中的饲料和消毒剂的使用造成 Hg 富集。

2.4 不同海域表层重金属含量的比较

将本研究测得重金属含量与 2020 年莱州湾表层海水重金属含量及其他 6 个海域表层海水重金属含量数据对比分析(表 6)。由表中可以看出,除 Zn 外其余 6 种元素均值均略高于 2020 年均值,整体呈现一定增长趋势,在分布特征方面也有一定变化,Cu 由东南部向海域中心迁移富集,Pb 由西南部向海域东北部迁移富集,Cr、As、Zn、Cd 整体分布变化不大,Hg 则由西南部及东南部向海域北部中心迁移。与其他 6 个海域表层海水重金属含量相比,莱州湾表层海水重金属含量处于中高水平。其中,Cu 元素含量仅次于新村港,相比其他海域较高;

表 4 重金属元素相关性分析
Table 4 The relativity of heavy metals

元素	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
Cu	1						
Pb	0.183	1					
Zn	0.122	0.197	1				
Cr	0.215	0.543**	0.169	1			
Cd	0.248	0.388*	0.072	0.417*	1		
Hg	0.298	0.111	0.300	0.292	0.001	1	
As	0.139	-0.016	0.113	0.229	0.061	0.184	1

注:“**”在 0.01 级别(双尾),相关性显著;“*”在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

表 5 主成分分析主要计算结果
Table 5 The main results of calculation of principal component analysis (PCA)

项目	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Hg	As
第 1 主成分	2.303	32.90	32.90	0.534	0.690	0.435	0.795	0.601	0.505	0.324
第 2 主成分	1.269	18.13	51.03	0.201	-0.432	0.408	-0.181	-0.504	0.616	0.457

表 6 不同海域表层海水中重金属含量比较

Table 6 Comparison of heavy-metal concentrations in seawater of different sea areas

研究区域	采样时间	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	As	Hg
本研究	2023年6月	6.92	15.11	1.68	0.39	6.76	4.23	0.08
莱州湾 ^[27]	2020年8月	3	23	1.1	0.12	3.4	2.8	0.06
南黄海 ^[14]	1997—2003年	1.12	3.44	0.30	0.053	—	1.66	0.009
北部湾 ^[41]	2016年7月	8.68	26.24	2.07	0.14	—	0.58	0.057
大丰海域 ^[22]	2015年11月	3.07	11.76	0.57	0.07	—	1.43	0.03
滨海县海域 ^[42]	2019年	3.14	10.18	0.64	0.09	—	1.53	0.026
连云港 ^[43]	2017年9月	0.025	0.703	0.1	0.043	0.052	—	—
新村港 ^[1]	2014年	15.37	63.97	18.32	0.175	—	8.05	0.097

注:“—”表示无相关数据。

Zn 元素相对处于中等水平; Pb 元素含量与北部湾相差不大, 但除新村港外要高于其他海域; Cd 元素含量均大于其他海域; Cr 元素数据较少, 与北部湾、连云港相比含量处于较高水平; As 元素相对处于中等水平; Hg 作为主要污染因子, 与其他海域相比水平大致相当。

3 结论

(1) 莱州湾海域表层海水重金属平均含量依次为 $Zn > Cu > Cr > As > Pb > Cd > Hg$, 利用单因子污染指数法研究表明, 重金属元素污染排序为 $Pb > Hg > Cu > Zn > Cd > As > Cr$, 最主要的污染因子为 Pb、Hg、Cu, 莱州湾海域海水中 Cr、As 未超一类水质标准, 其余元素未超过国家三类水质标准。

(2) 与 2020 年海水重金属浓度相比, 整体呈现一定增长趋势, 除 Zn 外其余 6 种元素均值均略高于 2020 年均值, 分布特征发生了一定变化, Cu 由东南部向海域中心迁移富集, Pb 由西南部向海域东北部迁移富集, Cr、As、Zn、Cd 整体分布变化不大, Hg 则由西南部及东南部向海域北部中心迁移。

(3) 相关性分析及主成分分析结果表明: Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg、As 之间的相关系数较小, 未表现出较强的相关性, 即相互之间都不具有相似的污染水平或共同的污染来源, 元素之间共同来源概率较低, 有可能受沿岸城市工业废水或生活污水及莱州湾海域船只尾气、合金材料等有关因素的综合影响, 在莱州湾环流的影响下不断富集。

(4) 潜在生态风险法分析结果表明: 单项潜在生态风险指数 E_r 平均值按照高低排序依次为 $Hg > Cd > Pb > Cu > As > Zn > Cr$, 表明 Hg 为莱州湾表层海水最主要的生态风险因子, 应当进一步控

制 Hg 的输入, 防止生态风险加剧; 综合生态风险指数 RI 值介于 7.99~333.42, 平均值为 89.84, 除个别站点外, 莱州湾海域表层海水综合潜在生态风险等级为轻微。

参考文献:

- [1] 巩慧敏, 刘永, 肖雅元, 等. 近海海水和表层沉积物重金属污染与生态风险评价: 以海南新村港为例 [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(4): 700-708.
GONG Huimin, LIU Yong, XIAO Yayuan, et al. Assessment on heavy metals pollution and potential ecological risk of seawater and surface sediments in coastal waters: a case study in Xincun Lagoon[J]. Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(4): 700-708.
- [2] ZHANG A G, WANG L L, ZHAO S L, et al. Heavy metals in seawater and sediments from the northern Liaodong Bay of China: levels, distribution and potential risks[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2017, 11: 32-42.
- [3] 赵明杰, 孙志佳, 闫兴国, 等. 广东吴川近岸海域表层海水重金属含量及生态风险分析 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(1): 70-76.
ZHAO Mingjie, SUN Zhijia, YAN Xingguo, et al. Analysis of heavy metal content and ecological risk in surface seawater of Wuchuan coastal area, Guangdong Province[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2023, 39(1): 70-76.
- [4] 徐亚岩, 柏育材, 纪炜炜, 等. 中国近海沉积物中重金属的变化特征和生态风险评估 [J]. 海洋渔业, 2019, 41(6): 712-724.
XU Yayan, BAI Yucai, JI Weiwei, et al. Variation characteristics and evaluation of potential ecological risk of heavy metals in sediments of the coastal waters of China[J]. *Marine Fisheries*, 2019, 41(6): 712-724.
- [5] 黄宏, 王霄, 罗予杉, 等. 大型海藻对重金属富集作用、影响因素及应用 [J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(5): 1158-1167.
HUANG Hong, WANG Xiao, LUO Yushan, et al. Enrichment, influencing factors and applications of heavy metals by macroalgae[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2022, 31(5): 1158-

- 1167.
- [6] 毛天宇, 戴明新, 彭士涛, 等. 近 10 年渤海湾重金属 (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg) 污染时空变化趋势分析 [J]. *天津大学学报*, 2009, 42(9): 817-825.
- MAO Tianyu, DAI Mingxin, PENG Shitao, et al. Temporal-spatial variation trend analysis of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg) in Bohai Bay in 10 years[J]. *Journal of Tianjin University*, 2009, 42(9): 817-825.
- [7] 田丰歌, 倪志鑫, 黄彬彬, 等. 大亚湾海水、表层沉积物中重金属含量及其分布特征 [J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 462-474.
- TIAN Fengge, NI Zhixin, HUANG Binbin, et al. Distribution characters of heavy metals in seawater and surface sediments in Daya Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(3): 462-474.
- [8] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 渤海莱州湾沉积物 REE 与重金属污染特征及物源判别 [J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(10): 8-24.
- DUAN Yunying, PEI Shaofeng, LIAO Mingwen, et al. Characteristics of REE and heavy metals in the surficial sediments of Laizhou Bay, Bohai sea and their implications for provenance[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2021, 37(10): 8-24.
- [9] 张洪亮, 杨建强, 崔文林. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响 [J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 11-14.
- ZHANG Hongliang, YANG Jianqiang, CUI Wenlin. Status of salinity changes and the effect on marine environments and ecosystem in Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(1): 11-14.
- [10] 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1676-1684.
- ZHANG Lei, QIN Yanwen, Zheng Binghui, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1676-1684.
- [11] 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响 [J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 63-72.
- HU Ningjing, SHI Xuefa, LIU Jihua, et al. Distributions and impacts of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(1): 63-72.
- [12] SHRIADAH M A, OKBAH M A, EL-DEEK M S. Trace metals in the water columns of the Red Sea and the Gulf of Aqaba, Egypt[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2004, 153(1/4): 115-124.
- [13] AL-HASHIM M H, EL-SOROGY A S, ALSHEHRI F, et al. Environmental assessment of surface seawater in Al-Uqair coastline, eastern Saudi Arabia[J]. *Water (Basel)*, 2022, 14(21): 3423.
- [14] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素 [J]. *环境科学*, 2008, 29(5): 1153-1162.
- HE Zhipeng, SONG Jinming, ZHANG Naixing, et al. Variation characteristics and controlling factors of heavy metals in the South Yellow Sea surface seawaters[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(5): 1153-1162.
- [15] 杨文超, 黄道建, 陈继鑫, 等. 大亚湾海域 2009—2018 年重金属时空分布及污染评价 [J]. *华南师范大学学报 (自然科学版)*, 2020, 52(5): 65-75.
- YANG Wenchao, HUANG Daojian, CHEN Jixin, et al. Pollution assessment and temporal-spatial distribution of heavy metals in seawater of Daya Bay during 2009-2018[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2020, 52(5): 65-75.
- [16] 莫小荣, 管超毅, 罗良娟, 等. 近年钦州沿海海水、沉积物及牡蛎重金属污染分析和评价 [J]. *南方农业学报*, 2019, 50(3): 554-561.
- MO Xiaorong, GUAN Chaoyi, LUO Liangjuan, et al. Analysis and evaluation of heavy metals pollution in seawater, sediments and oysters of Qinzhou coastal area in recent years[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2019, 50(3): 554-561.
- [17] 罗万次, 苏搏, 刘熊, 等. 广西北仑河口红树林保护区表层海水溶解态重金属时空分布及其影响因素 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(6): 668-675.
- LUO Wanci, SU Bo, LIU Xiong, et al. Spatial and temporal distributions and influence factors of the dissolved heavy metals in surface water in the mangrove reserve at the Beilun River Estuary in Guangxi[J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(6): 668-675.
- [18] 林红梅, 王伟力, 林彩, 等. 钦州湾及其邻近海域重金属的时空变化特征和影响因素 [J]. *应用海洋学学报*, 2020, 39(4): 490-500.
- LIN Hongmei, WANG Weili, LIN Cai, et al. Temporal and spatial variations of heavy metals and influencing factors in Qinzhou Bay and its adjacent waters in 2013-2014[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39(4): 490-500.
- [19] 宋永刚, 吴金浩, 邵泽伟, 等. 辽东湾近岸表层海水重金属污染分析与评价 [J]. *渔业科学进展*, 2016, 37(3): 14-19.
- SONG Yonggang, WU Jinhao, SHAO Zewei, et al. Evaluation of heavy metal pollution in the offshore surface seawater of the Liaodong Bay[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2016, 37(3): 14-19.
- [20] 孙业皎, 黄翠玲, 隋琪, 等. 桑沟湾表层海水中重金属含量季节变化及污染分析 [J]. *海洋环境科学*, 2021, 40(5): 752-759.
- SUN Yejiao, HUANG Cuiling, SUI Qi, et al. Concentration variation and pollution assessment of heavy metals in surface seawater of Sanggou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2021, 40(5): 752-759.
- [21] 公金文, 陈发荣, 郑立, 等. 红海湾表层海水重金属含量与污染评价 [J]. *海洋科学进展*, 2021, 39(4): 570-580.
- GONG Jinwen, CHEN Farong, ZHENG Li, et al. The concentrations and pollution assessment of heavy metal in surface seawater in Honghai Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2021, 39(4): 570-580.
- [22] 艾洋漓, 徐敏, 丁言者, 等. 大丰近岸海域水质污染特征及来源 [J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 2019, 42(4): 153-161.

- AI Yangyi, XU Min, DING Yanzhe, et al. Characteristics and sources of water pollution in the coastal waters of Dafeng, Jiangsu Province, China[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2019, 42(4): 153-161.
- [23] 刘宪斌,朱浩然,郭夏青,等.河北黄骅近岸海域表层海水重金属污染特征及生态风险评价[J].安全与环境学报,2020,20(2):747-755.
- LIU Xianbin, ZHU Haoran, GUO Xiaqing, et al. On situation of heavy metal contaminant residents in seawater along Huanghua coast area and potential ecological risk assessment, Cangzhou, Hebei[J]. Journal of Safety and Environment, 2020, 20(2): 747-755.
- [24] 罗先香,张蕊,杨建强,等.莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J].生态环境学报,2010,19(2):262-269.
- LUO Xianxiang, ZHANG Rui, YANG Jianqiang, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 262-269.
- [25] 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.
- ZHENG Yimin, GAO Maosheng, LIU Sen, et al. Distribution patterns and ecological assessment on heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 354-360.
- [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 Mingwen, 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.
- [27] 秦华伟,陶慧敏,张娟,等.营养盐和重金属等环境因子对莱州湾浮游植物的影响[J].海洋湖沼通报,2023,45(5):134-141.
- QIN Huawei, TAO Huimin, ZHANG Juan, et al. Effects of multiple environmental factors such as nutrients and heavy metals on phytoplankton in Laizhou Bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2023, 45(5): 134-141.
- [28] 自然资源部. GB/T 12763.11—2007, 海洋调查规范: 第 11 部分: 海洋工程地质调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Ministry of Natural Resources. GB/T 12763.11—2007, Specifications for oceanographic survey-Part 11: marine engineering geological investigation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [29] 国家海洋局. GB 17378.3—2007, 海洋监测规范: 第 3 部分: 样品采集、贮存与运输[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- State Oceanic Administration. GB 17378.3—2007, The specification for marine monitoring-Part 3: sample collection, storage and transportation[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [30] 国家海洋局. GB 17378.4—2007 海洋监测规范: 第 4 部分: 海水分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- State Oceanic Administration. GB 17378.4—2007, The specification for marine monitoring-Part 4: seawater analysis[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [31] 孙钦帮,高范,王阳,等.广东红海湾海域表层水环境中重金属含量特征及污染评价[J].海洋环境科学,2018,37(5):685-690.
- SUN Qinqiang, GAO Fan, WANG Yang, et al. The content and pollution evaluation of heavy metals in the surface seawater in Honghai Bay[J]. Marine Environmental Science, 2018, 37(5): 685-690.
- [32] 贺仕昌,蔚广鑫,王德鸿,等.七连屿海域表层海水及沉积物重金属环境质量评估[J].应用海洋学学报,2020,39(2):246-252.
- HE Shichang, YU Guangxin, WANG Dehong, et al. Environmental quality assessment of heavy metals in the surface water and sediments around Qilianyu Island[J]. Journal of Applied Oceanography, 2020, 39(2): 246-252.
- [33] 张思洋,于大涛,张戈.锦州湾三河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.
- ZHANG Siyang, YU Datao, ZHANG Ge. Distribution of heavy metals at the junction of Lianshan, Wuli and Cishan estuaries, Jinzhou Bay and their contamination evaluation[J]. Marine Geology Frontiers, 2020, 36(6): 20-25.
- [34] 张栋,郑晓玲,何鹰,等.渤海南部表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J].环境污染与防治,2011,33(9):8-10,24.
- ZHANG Dong, ZHENG Xiaoling, HE Ying, et al. Pollution and risk assessment of heavy metals in surface sediment of south Bohai[J]. Environmental Pollution & Control, 2011, 33(9): 8-10, 24.
- [35] 周笑白,梅鹏蔚,彭露露,等.渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J].生态环境学报,2015,24(3):452-456.
- ZHOU Xiaobai, MEI Pengyu, PENG Lulu, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 452-456.
- [36] 国家环境保护局,国家海洋局. GB 3097—1997, 海水水质标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998.
- State Environmental Protection Administration, State Oceanic Administration. GB 3097—1997, Sea water quality standard[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1998.
- [37] 林道荣,吴文凡,刘子洲,等.莱州湾夏季环流垂向结构及其影响机制的研究[J].海洋科学,2023,47(5):54-65.
- LIN Daorong, WU Wenfan, LIU Zizhou, et al. Vertical structure of summer circulation in Laizhou Bay and its influencing mechanism[J]. Marine Sciences, 2023, 47(5): 54-65.
- [38] 彭修强,项立辉,郭娜,等.南黄海南部海域表层沉积物重金属来源解析及风险评价[J].环境科学学报,2015,35(11):3628-3638.
- PENG Xiuqiang, XIANG Lihui, Guo Na, et al. Sources identification and hazardous risk delineation of heavy metals contamination in surface sediments in the southern of the South Yellow

- Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11): 3628-3638.
- [39] 杨华. 南海北部珊瑚生长区重金属分布特征及评价 [D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- YANG Hua. Distribution and evaluation of heavy metals in coral growing regions of the northern South China Sea[D]. Nan Ning: Guangxi University, 2017.
- [40] GOPINATH A, NAIR S M, KUMAR N C, et al. A baseline study of trace metals in a coral reef sedimentary environment, Lakshadweep Archipelago[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 59(6): 1245-1266.
- [41] 曾维特, 张东强, 刘兵, 等. 海南岛北部海湾表层海水重金属分布特征、主控因素及污染评价 [J]. *热带海洋学报*, 2023, 42(6): 1-12.
- ZENG Weite, ZHANG Dongqiang, LIU Bing, et al. Distribution, main controlling factors and pollution assessment of heavy metals in surface seawater of the northern bay of Hainan Island, South China[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023, 42(6): 1-12.
- [42] 裘奕斐, 王静, 徐敏. 江苏滨海县近岸海域海水、沉积物和生物体重金属分布及健康风险评估 [J]. *南京师大学报 (自然科学版)*, 2021, 44(1): 71-78.
- QIU Yifei, WANG Jing, XU Min. Distribution and health risk assessment of heavy metals in seawater, sediments and organisms in coastal areas of Binhai in Jiangsu Province[J]. *Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 44(1): 71-78.
- [43] 许星鸿, 姚海洋, 孟霄, 等. 连云港附近海域海水、表层沉积物和水产品的重金属污染及生态风险评估 [J]. *海洋湖沼通报*, 2019(5): 110-116.
- XU Xinghong, YAO Haiyang, MENG Xiao, et al. Evaluation on heavy metals pollution and potential ecological risk in seawater, surface sediment and marine organisms in Lianyungang sea areas[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2019(5): 110-116.

Distribution and ecological environment assessment of heavy metals in surface seawater of Laizhou Bay

ZHANG Xuzhen^{1,2}, CHU Hongxian^{1,2}, KONG Linghao^{1,2*}, CAO Licheng³,
ZHANG Decheng^{1,2}, LI Haibo⁴, XU Huayuan⁵

(1 Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264000, China; 2 Ministry of Natural Resources Observation and Research Station of Land-Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Yantai 264000, China; 3 Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China; 4 Longkou Marine Development and Fisheries Bureau, Yantai 265199, China; 5 Shouguang Marine Fisheries Development Center, Weifang 262799, China)

Abstract: In June 2023, surface seawater samples from 30 stations were collected in Laizhou Bay, and the degree, distribution, and potential ecological risks of heavy metal pollution in surface seawater in Laizhou Bay were evaluated by single factor index method, potential ecological risk method, and principal component analysis method. Results show that the average values of Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg, and As in the surface seawater of Laizhou Bay sea area were 9.33, 1.68, 15.11, 6.76, 0.47, 0.11, 4.28 $\mu\text{g/L}$, and the average values of the single-factor pollution indices were 1.38, 1.68, 0.76, 0.14, 0.39, 1.50, 0.21, the average value of potential ecological risk index was 6.92, 8.16, 0.76, 0.27, 11.77, 60.15, 2.11, respectively; and the average value of the comprehensive ecological risk index was 89.84. The quality of seawater in the sea area of Laizhou Bay did not exceed the national standard for Type III seawater quality. Except for some stations, the potential ecological risk of seawater is slight; the distribution of heavy metal elements is affected by the hydrodynamic factors in the sea area. Cu, Pb, Zn, Hg, Cd elements are constantly enriched in the center of the sea area under the influence of the circulation in the eastern part of the Laizhou Bay, and Cr, As elements are distributed in a ring band under the influence of the clockwise circulation in the western part of the Laizhou Bay and the northeasterly flow in the central part of the bay. The principal component and correlation analyses showed that the correlation coefficients among Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg, and As were small, and none of them had similar pollution levels or common pollution sources. The concentration of heavy metals is at a medium level compared with those of other sea areas in China. Compared with the concentration of seawater in Laizhou Bay in 2020, the overall trend shows a certain increase, and they migrate and accumulate from the coast to the center of the sea.

Key words: Laizhou Bay; surface seawater; heavy metal; distribution characteristics; ecological assessment