

大亚湾海域重金属空间分布特征及其来源分析

黄丽霞, 杨小平*, 周志凯

惠州市海洋技术中心, 广东 惠州

收稿日期: 2025年12月9日; 录用日期: 2026年1月2日; 发布日期: 2026年1月12日

摘要

2023年秋季对大亚湾海水及表层沉积物中铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、锌(Zn)、汞(Hg)含量进行调查, 分析各重金属元素含量分布特征并进行质量评价, 同时采用皮尔逊相关系数(Pearson)、层次聚类(Hierarchical Clustering)等源解析模型分析大亚湾海域污染源。结果表明, 海水中6种元素平均含量由大到小分别为Zn > Cu > Pb > Cr > Hg, 沉积物平均含量由大到小分别为Zn > Pb > Cr > Cu > Cd > Hg; 2023年秋季海水重金属整体呈现沿岸高浓度、离海岸浓度低的特点, 表层沉积物整体呈现湾顶重金属含量较高、湾底浓度低的特点, 其中湾顶重金属主要来源于工业活动, 湾顶西侧还与交通运输业有关, 东部主要源于人类活动、船舶尾气等; 利用算术均值多因子指数法、地累积指数法和潜在生态风险指数检测出该海域目前处于清洁状态, 水质良好, 属于轻微潜在生态风险等级; Pearson分析与聚类分析结果表明OC与Cd、Zn、Hg具有较强的相关性, 主要污染来源相似。

关键词

大亚湾, 海水, 沉积物, 重金属, 空间分布

Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metals in the Daya Bay Waters and Analysis of Their Sources

Lixia Huang, Xiaoping Yang*, Zhikai Zhou

Huizhou Marine Technology Center, Huizhou Guangdong

Received: December 9, 2025; accepted: January 2, 2026; published: January 12, 2026

Abstract

In autumn 2023, the content of copper (Cu), lead (Pb), cadmium (Cd), chromium (Cr), zinc (Zn), and

*通讯作者。

mercury (Hg) in seawater and surface sediments of Daya Bay was investigated. The distribution characteristics of these heavy metals were analysed, and a quality assessment was conducted. Source analysis models such as Pearson correlation coefficients and hierarchical clustering were used to analyse pollution sources in the Daya Bay area. The results showed that the average concentrations of the six elements in seawater ranked from highest to lowest as Zn > Cu > Pb > Cr > Hg, while in sediments they ranked as Zn > Pb > Cr > Cu > Cd > Hg. In autumn 2023, heavy metals in seawater displayed higher concentrations near the coast and lower concentrations offshore. Surface sediments showed higher concentrations at the bay head and lower concentrations at the bay bottom. Heavy metals at the bay head mainly originated from industrial activities, with the west side also linked to transport activities. In eastern Daya Bay, pollution mainly arose from human activities and ship exhaust emissions. Arithmetic mean multi-factor index, geoaccumulation index, and potential ecological risk index assessments indicated that the area is currently clean, with good water quality, corresponding to a slight potential ecological risk level. Pearson correlation and cluster analyses demonstrated strong correlations between OC and Cd, Zn, and Hg, and the main sources of pollution are similar.

Keywords

Daya Bay, Seawater, Sediment, Heavy Metal, Spatial Distribution

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

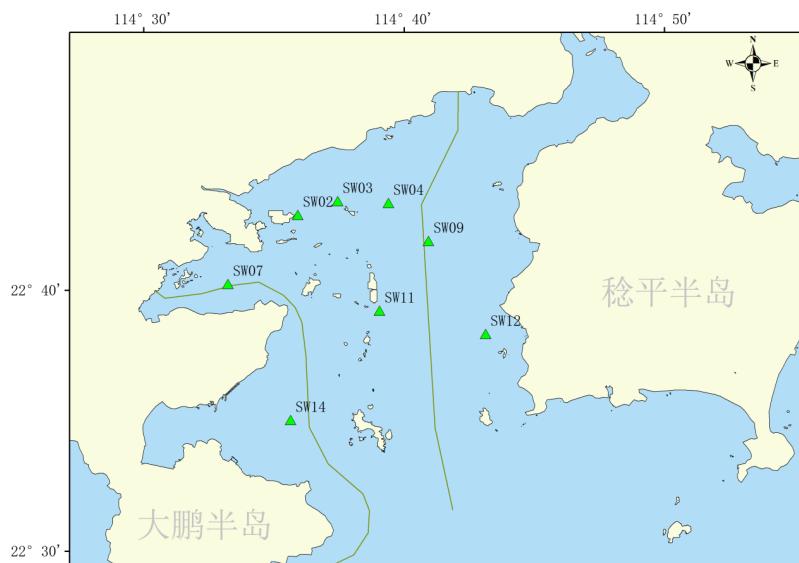
随着工业化和城市化进程的加速，重金属污染已成为全球海岸带生态环境面临的突出问题之一。重金属具有毒性强、难降解、易富集等特点，可通过水 - 沉积物 - 生物系统迁移转化^[1]，威胁生态系统安全与人类健康。大亚湾是半封闭式浅水海湾，是粤港澳大湾区重要的临海工业基地和生态敏感区，湾内有多个大型港口、石化基地、核电基地^[2]。近年来受石化、电子、船舶制造等产业发展影响，重金属污染风险日益凸显。而对大亚湾海水及沉积物中重金属含量、空间分布及其来源，是评估该海域环境质量、制定污染防控策略的科学基础。

本研究于 2023 年秋季在大亚湾海域采集海水与表层沉积物，重点分析铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、锌(Zn)、汞(Hg)等典型重金属元素含量、空间分布特征，采用算术均值多因子指数法开展水质评价，地积累指数法开展表层沉积物质量评价，潜在生态风险指数法开展对污染程度的分析。运用皮尔逊相关系数(Pearson)、层次聚类(Hierarchical Clustering)等源解析模型，识别该海域沉积物重金属污染源分类。本研究可为大亚湾海域重金属污染的精准管控、生态环境保护与修复提供科学依据，为后续惠州海洋生态修复工作提供一定指导意见。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

本文调查样品在惠州大亚湾海域进行样点布设，于 2023 年 9 月 22 日进行采集。本研究调查于 8 个站位点分别采集水样及表层沉积物，样品站位信息详见图 1。本次样品均按照标准规范 GB 17378-2007 进行采集、运输、存储。



注：本文地图均基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)4342 号标准地图制作。

Figure 1. Schematic diagram of sampling points in Daya Bay in autumn 2023

图 1. 大亚湾海域 2023 年秋季采样点位示意图

2.2. 调查及分析测试

本文调查项目包括海水与沉积物中 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg 的含量，参照《海洋监测规范》对样品进行前处理与含量测定，项目对应检测方法、分析仪器详见表 1。

Table 1. Investigation and analysis of Daya Bay in autumn 2023

表 1. 大亚湾海域 2023 年秋季调查与分析

调查对象	项目	分析方法	分析仪器	参照标准
	Cd、Pb、Cu、Cr	无火焰原子吸收分光光度法	AAS 原子吸收分光光度计	GB 17378.4-2007
海水	Zn	火焰原子吸收分光光度法	AAS 原子吸收分光光度计	GB 17378.4-2007
	Hg	原子荧光法	AAS 原子荧光分光光度计	GB 17378.4-2007
	Cr	无火焰原子吸收分光光度法	AAS 原子吸收分光光度计	GB 17378.5-2007
沉积物	Cd、Pb、Cu、Zn	火焰原子吸收分光光度法	AAS 原子吸收分光光度计	GB 17378.5-2007
	Hg	原子荧光法	AAS 原子荧光分光光度计	GB 17378.5-2007

2.3. 评价方法

2.3.1. 大亚湾海域 2023 年重金属数据分析及空间分布

对调查数据进行统计分析，利用 Arcgis 10.0 绘制空间分布图，对重金属组成与空间分布进行分析。

2.3.2. 大亚湾海域 2023 年重金属质量评价

1) 算术均值多因子指数法

为更全面客观对大亚湾海域重金属环境进行质量评价, 本文采用算术均值多因子指数法[3], 以第二类海水标准值作为评价标准值, 详见 GB 3097-1997《海水水质标准》[4]。

$$I = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{S_i}$$

式中 I 为算术均值多因子指数; I_i 为单因子标准指数; C_i 为第 i 种污染物的实测平均浓度, $\mu\text{g/L}$; S_i 为第 i 种污染物评价标准值, $\mu\text{g/L}$ 。参照文献[5], I 所对应的污染级别及水质情况见表 2。

Table 2. Grading standard for water quality evaluation of arithmetic mean multi-factor index

表 2. 算术均值多因子指数法水质评价分级标准

水质指数	污染级别	分级依据	水质状况
$I < 0.2$	清洁	多数项目未检出, 个别项目检出也在标准内	优良
$0.2 \leq I < 0.4$	尚清洁	检测值均在标准内, 个别接近标准	良好
$0.4 \leq I < 0.7$	轻污染	个别项目检出超过标准	一般
$0.7 \leq I < 1.0$	中度污染	有两个项目检出超过标准	差
$1.0 \leq I < 2.0$	重污染	相当一部分项目检出超过标准	较差
$I \geq 2.0$	严重污染	相当一部分项目检出超过标准几倍或几十倍	极差

2) 地积累指数法

地积累指数在 20 世纪 60 年代由 Muller 提出, 用于评价水环境中沉积物重金属污染程度的定量指标, 其计算公式:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_i}{1.5 \times B_i} \right)$$

式中 C_i 是指检测所得沉积物重金属含量(mg/kg), B_i 是指所测重金属元素 i 的背景值, 1.5 是由多个来源的沉积物输入引起的成岩效应和富集的校正系数, 其评价级别[6]见表 3。

Table 3. Geoaccumulation index (I_{geo}) classification levels

表 3. 地积累指数评价级别

污染程度	清洁	轻度污染	偏中污染	中度污染	偏重污染	重度污染	严重污染
级数	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	≤ 0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	> 5

2.3.3. 重金属污染程度分析

由 Hakanson [7] 提出的潜在生态风险指数法, 可以体现某一环境下各类污染物的影响和综合影响。利用定量方法划分潜在生态风险程度, 对该领域污染物进行评估, 具有科学性、准确性、客观性。

$$E_r^i = T_r^i \times \frac{C_i}{C_n}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{C_n}$$

式中 T_r^i 为毒性系数, C_i 为实测值, C_n 为背景值。具体详见表 4, 生态危害划分标准见表 5。

Table 4. Background reference values and toxicity coefficients of heavy metals
表 4. 重金属的背景参照值及毒性系数

参数	铜	铅	镉	锌	铬	汞
Parameter	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Hg
Background reference value/(ug/L) [8]	10	5	5	50	100	0.20
Background reference value/(mg/kg) [9]	6.44	21.67	0.027	26.01	22.35	0.011
Toxicity coefficient [10]	5	5	30	1	2	40

Table 5. Classification standards for ecological hazards of heavy metals
表 5. 重金属生态危害划分标准

E_r^i	RI	生态危害程度
$E_r^i < 30$	$RI < 150$	轻微
$30 \leq E_r^i < 50$	$150 \leq RI < 300$	中等
$50 \leq E_r^i < 100$	$300 \leq RI < 600$	强
$100 \leq E_r^i < 150$	$RI \geq 600$	很强
$150 \geq E_r^i$		极强

2.4. 大亚湾海域污染源分析

为探究影响惠州大亚湾海域重金属污染物空间分布影响元素, 对 2023 年惠州大亚湾海域重金属数据进行相关性分析与聚类分析。

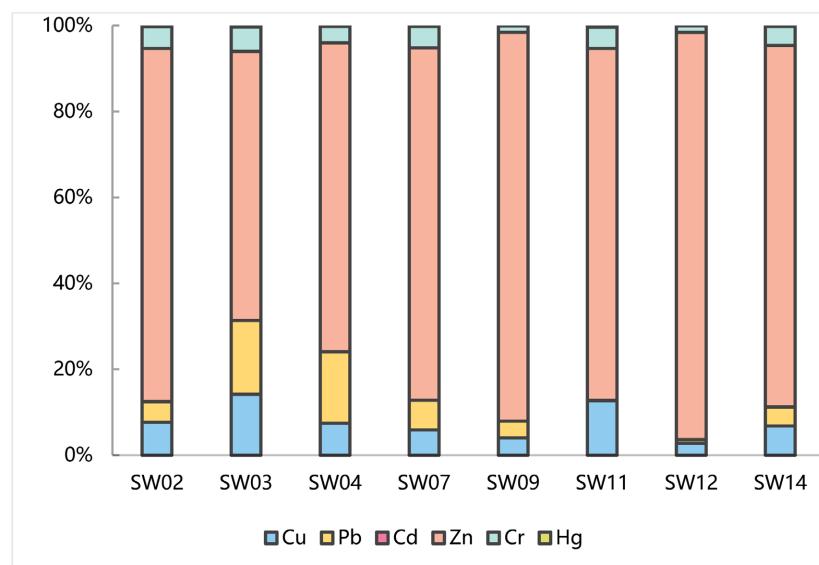
2.5. 数据处理

本文采用 Excel 2010 进行数据处理, SPSS 21.0 进行统计学分析, Origin 2022 和 Arcgis 10.0 进行绘图。

3. 结果与讨论

3.1. 大亚湾海域 2023 年秋季重金属空间分布特征

对 2023 年秋季大亚湾海域海水中重金属含量进行计算分析, 浓度组成见图 2, 浓度范围见表 6。海水各站位中重金属 Cd 未检出, Pb 的检出率为 87.5%, 各元素的平均含量由大到小分别为 Zn ($36.5 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ Cu ($2.5 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ Pb ($2.38 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ Cr ($1.4 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) $>$ Hg ($0.072 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$)。

**Figure 2.** The composition of heavy metal concentrations in seawater of Daya Bay in the autumn of 2023**图 2. 大亚湾海域 2023 年秋季水质重金属浓度组成****Table 6.** Heavy metal contents in seawater and sediments of Daya Bay sea area in autumn 2023**表 6. 2023 年秋季大亚湾海域海水和沉积物中的重金属含量**

重金属	海水/(ug·L ⁻¹)			沉积物/(ug·g ⁻¹)		
	范围	平均值	标准差	范围	平均值	标准差
Cu	2.1~3.0	2.5	0.3	1~34	11	11
Pb	ND~6.65	2.38	2.02	41~72	60	11
Cd	ND	ND	ND	ND~0.13	0.06	0.04
Zn	12.6~93.1	36.5	26.8	59~127	92	21
Cr	0.8~1.8	1.4	0.4	29~55	46	8
Hg	0.067~0.078	0.072	0.004	0.022~0.050	0.034	0.009

注：“ND”表示未检出；海水 Pb 的未检出样品计算时取值为其检出限的 1/4，海水、沉积物 Cd 的未检出样品计算时取值为其检出限的 1/2。

由于镉元素未检出，故在此不进行讨论，只对其他 5 种元素绘制重金属浓度空间分布图，如图 3 所示。整体上看 2023 年秋季海水重金属呈现沿岸浓度高、离海岸浓度低的特点，结论同过去研究发现一致，大亚湾中心部比小湾的交换能力强[11]。而靠近石化区的海域，Cu、Pb、Cr、Hg 含量整体偏高，可能是由于该海域位于大亚湾石化工业区以及淡澳河入海处，陆源输入污染物质较多。Chen 等人[12]研究发现地表径流会影响我国沿海沉积物中 Cu、Pb、Cr 等元素含量累积。

对各元素进行分析，海水中 Cu、Pb 含量从大亚湾海域中部向四周方向递增，最低值位于大亚湾中部大甲岛海域，靠近石化区的站位 SW04 含量值最高，推测出现高值是由于附近存在石化企业，工业发展对 Cu、Pb 存在影响。Zn 从大亚湾海域中部向四周方向递增，靠近稔平半岛的巽寮湾海域含量相对较高，而附近存在鱼排码头及人工浴场，船体氧化和尾气沉降对锌含量会造成影响[13]。Cr 的含量高值区较为分散，其最高值出现在大亚湾湾顶西部，靠近小桂新码头，Cu、Pb 在此海域的浓度值也较高。可能是由

于此海域交通运输业发达,过往的船只船底携带防污漆含有Cu、Pb等金属[14],沿海汽车尾气携带重金属(Cr、Cu、Pb等)烟尘[15],从而造成其重金属含量相对较高。Hg含量分布较为均匀,各站位点平均浓度均低于国家二类海水标准浓度。

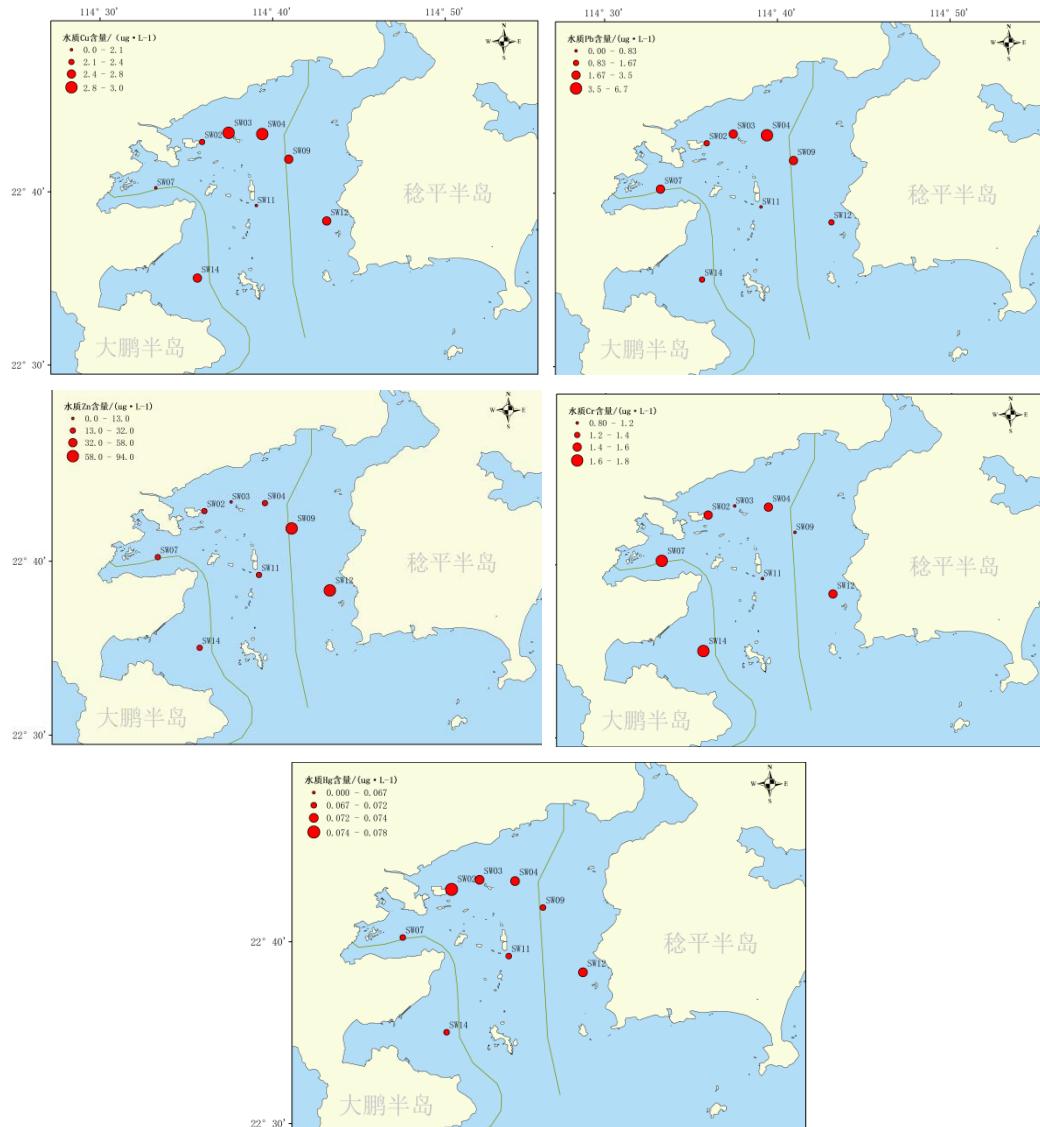


Figure 3. Spatial distribution of heavy metal content in Daya Bay sea area in autumn 2023
图 3. 大亚湾海域 2023 年秋季海水重金属含量空间分布图

对2023年秋季大亚湾海域表层沉积物中重金属含量进行计算分析,结果见表6、图4。沉积物重金属中Cd的检出率为50%,其他元素检出率为100%。平均含量由大到小分别为Zn(92 ug·g⁻¹)>Pb(60 ug·g⁻¹)>Cr(46 ug·g⁻¹)>Cu(11 ug·g⁻¹)>Cd(0.06 ug·g⁻¹)>Hg(0.034 ug·g⁻¹),依据GB 18668-2002《海洋沉积物标准》[16]评价,2023年秋季大亚湾海域表层沉积物均为第一类。对比此前学者研究得到的大亚湾沉积物重金属背景值,2023年秋季Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg分别约为1.77倍(Cu背景值6.44)、2.76倍(Pb背景值21.67)、2.06倍(Cd背景值0.027)、2.07倍(Cr背景值22.35)、3.54倍(Zn背景值26.01)、3.07倍(Hg背景值0.011),本研究中6种重金属均超过背景值,说明该海域明显受到人为活动影响。

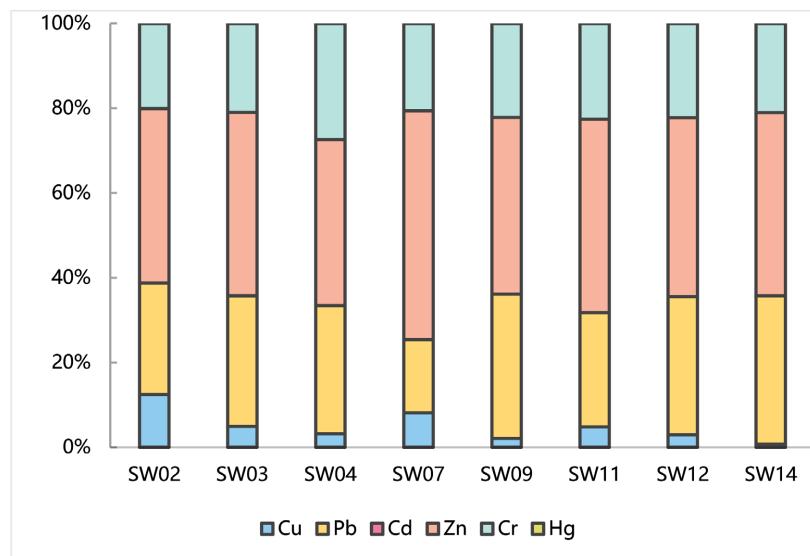
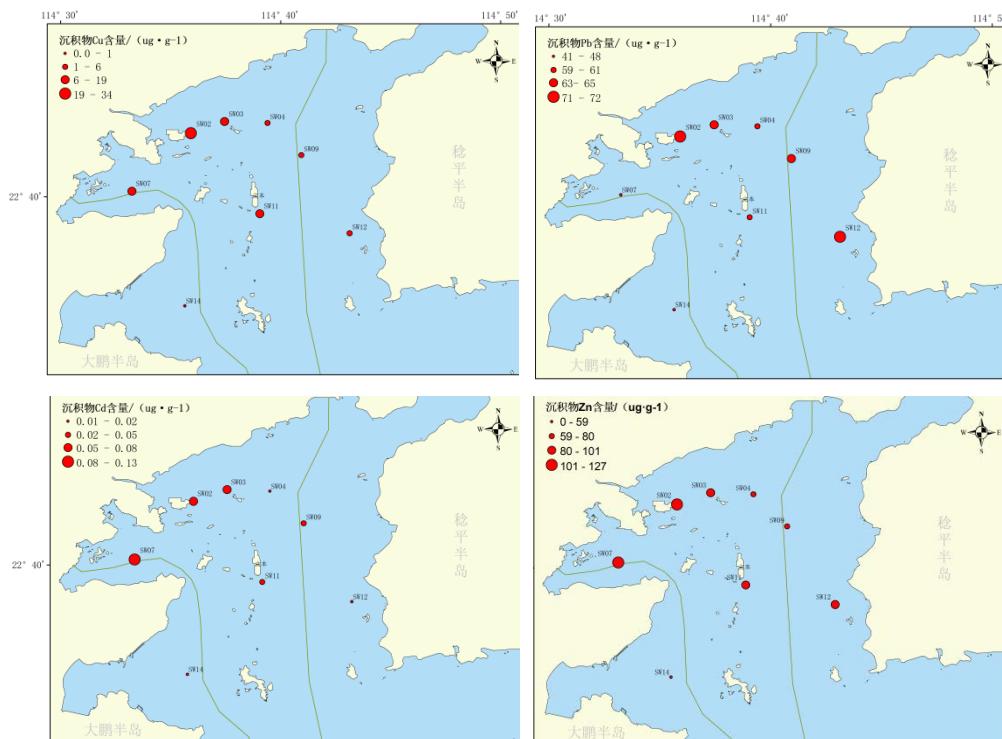


Figure 4. The composition of heavy metal concentrations in sediments of Daya Bay in the autumn of 2023
图 4. 大亚湾海域 2023 年秋季沉积物重金属浓度组成

绘制站位分布图, 如图 5 所示。整体看, 湾顶重金属含量较高, 这是由于大亚湾西南部海域靠近外海, 海水流速相较湾内快, 水体交换能力强, 污染物不易沉淀形成沉积物。而湾顶水文动力弱, 水体流速慢[10], 水体重金属更易于沉降形成沉积物, 使得湾顶表层沉积物重金属含量相较会更高。但元素间不同站位存在差异性, 如沉积物中 Cu、Cd 元素浓度含量自大亚湾海域东侧向西侧递增, 靠近石化区、核电区的 Cu、Cd 元素相对浓度较高。Pb 含量在大亚湾中部含量较低, 浓度自中部向两侧递增, 湾顶一侧靠近石化区, 另一侧则靠近巽寮湾风景区, 受到工业活动、人类活动影响较大。



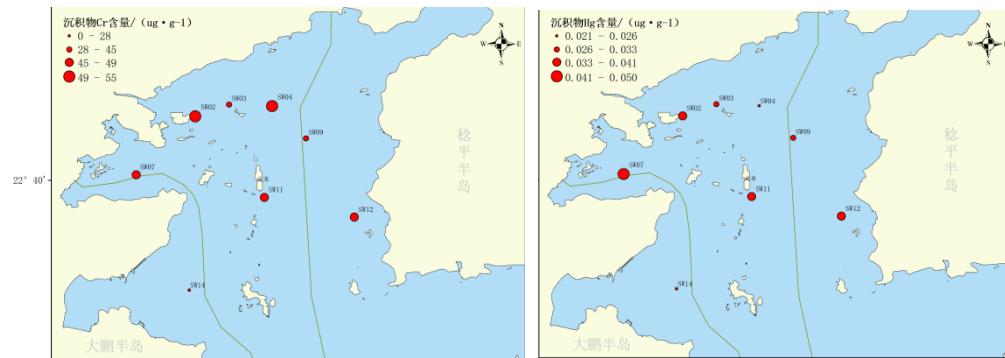


Figure 5. Spatial distribution of heavy metal content in sediments of Daya Bay sea area in autumn 2023
图 5. 大亚湾海域 2023 年秋季沉积物重金属含量空间分布图

3.2. 大亚湾海域重金属污染评价

3.2.1. 算术均值多因子指数法

对 2023 年秋季大亚湾海域海水中重金属含量进行计算, 详见表 7。本研究中该海域 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg 元素计算所得指数均小于 1, 算术均值型多因子指数范围为 0.001~0.730, 平均指数值为 0.305, 小于 0.4, 表明该海域尚清洁, 水质良好。与 2015 年谢文琦等人[17]调查结果相比, 8 年来该海域清洁度未发生变化, 且水质有向好趋势。

3.2.2. 地积累指数法

对本研究所得沉积物重金属数据进行计算, 详见表 7。研究调查中 6 种重金属的地累积指数平均值排序为 $\text{Pb} (-0.81) > \text{Zn} (-1.51) > \text{Cr} (-1.55) > \text{Cu} (-2.72) > \text{Hg} (-3.47) > \text{Cd} (-4.34)$, 地累积指数均小于 0, 表明 2023 年秋季大亚湾海域表层沉积物处于清洁状态, 未受到重金属污染。

Table 7. Parameters of heavy metal index in seawater and sediment of Daya Bay in autumn 2023
表 7. 2023 年秋季大亚湾水质与沉积物重金属指数参数

重金属	算术均值多因子指数		沉积物的地累积指数	
	范围	平均值	范围	平均值
Cu	0.207~0.296	0.253	-6.229~-1.146	-2.72
Pb	ND~1.329	0.475	-1.371~-0.546	-0.81
Cd	ND	ND	-9.221~-4.143	-4.34
Zn	0.252~1.863	0.730	-2.157~-1.045	-1.51
Cr	0.008~0.018	0.014	-2.240~-1.298	-1.55
Hg	0.335~0.390	0.359	-4.106~-2.921	-3.47

3.3. 大亚湾 2023 年秋季重金属潜在生态危害风险程度

对大亚湾海域各重金属进行计算，得到大亚湾海域各重金属的潜在危害系数 E。对各站位多种重金属进行计算，得到各站位综合潜在生态指数 RI。RI 值越高，说明该站位点的潜在生态风险越大，需要关注的程度越高。由表 8、图 6 可以看出，各站位均为轻微生态危害程度，潜在危害小。

大亚湾海域海水中 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg 这 6 种重金属潜在生态风险指数平均值排序为 Pb(4.27)>

Cd (1.67) > Cr (1.53) > Cu (1.14) > Zn (0.53) > Hg (0.41), 各类重金属潜在生态风险指数均小于 40, 属于轻微潜在生态风险等级。各调查站位的重金属总潜在生态风险指数为 14.87~23.47, 平均值为 18.80, 均远小于 150, 因此大亚湾海水重金属总潜在生态风险处于较低水平。

大亚湾海域表层沉积物中 Cu 、 Pb 、 Cd 、 Cr 、 Zn 、 Hg 六种重金属潜在生态风险指数平均值排序为 Hg (14.37) > Pb (2.38) > Cu (1.27) > Zn (0.73) > Cd (0.03) = Cr (0.03), 各类重金属潜在生态风险指数均小于 40, 属于轻微潜在生态风险等级。各调查站位的重金属总潜在生态风险指数为 9.35~19.10, 平均值为 14.04, 均远小于 150, 因此大亚湾表层沉积物重金属总潜在生态风险处于较低水平。

Table 8. The degree of ecological hazards of various heavy metals in the Daya Bay sea area
表 8. 大亚湾海域各重金属的生态危害程度

元素	海水中 E_r^i	生态危害程度	沉积物中 E_r^i	生态危害程度
Cu	1.27	轻微	1.14	轻微
Pb	2.38	轻微	4.27	轻微
Cd	0.03	轻微	1.67	轻微
Zn	0.73	轻微	0.53	轻微
Cr	0.03	轻微	1.53	轻微
Hg	14.37	轻微	0.41	轻微

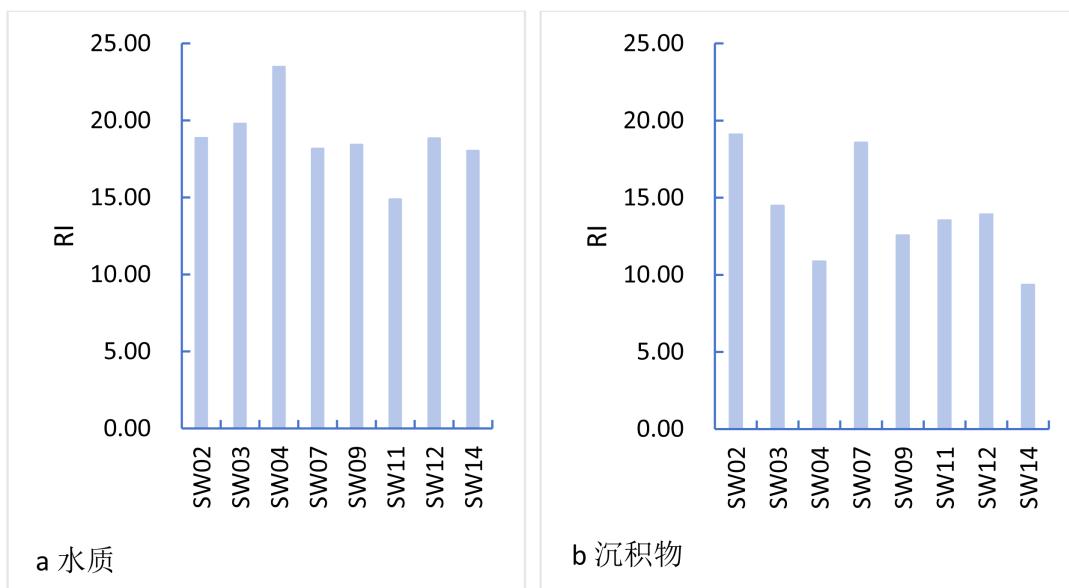
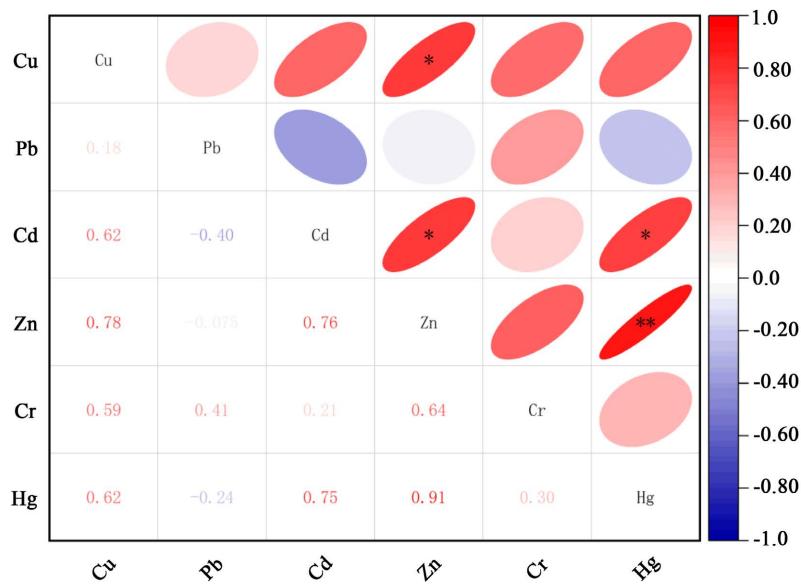


Figure 6. The potential ecological hazard index of each station point in Daya Bay sea area in the autumn of 2023
图 6. 大亚湾海域 2023 年秋季各站位点潜在生态危害指数

3.4. 大亚湾海域重金属污染源分析

3.4.1. Pearson 分析

对沉积物重金属含量进行相关性分析, 结果见图 7。沉积物中 Zn 与 Cu 、 Cd 呈显著正相关, Hg 与 Cd 呈显著正相关、与 Zn 呈极显著正相关, 其余元素相关性不显著。



注: *代表 $p < 0.05$, **代表 $p < 0.01$ 。

Figure 7. The correlation among heavy metals in the surface sediments of Daya Bay
图 7. 大亚湾海域表层沉积物中重金属之间的相关性

3.4.2. 聚类分析

为揭示沉积物污染物的来源, 探究有机碳(OC)是否对重金属的迁移和归趋产生影响, 通过聚类分析对不同污染物进行分类, 从而揭示污染物在大亚湾海域中可能的传输和变化机制。聚类分析结果见图 8。从图中看出, 在距离 0.6 时, 7 类污染物可以分成 4 簇。第一簇为 Cu, 第二簇为 Cd、Zn、Hg、OC, 第三簇为 Pb, 第四簇为 Cr。聚类结果与上述 Pearson 相关性分析相似, 表明 OC 与 Cd、Zn、Hg 具有较强的相关性, 沉积物中 OC 含量对重金属有较高的吸附效率[18], 这与田丰歌[19]、唐得昊[20]等人研究一致。而 Pb 与 Cr 各成一族, 说明这两种可能存在与其他元素不同的来源。Pearson 相关性分析中, Cr 与 Cu、

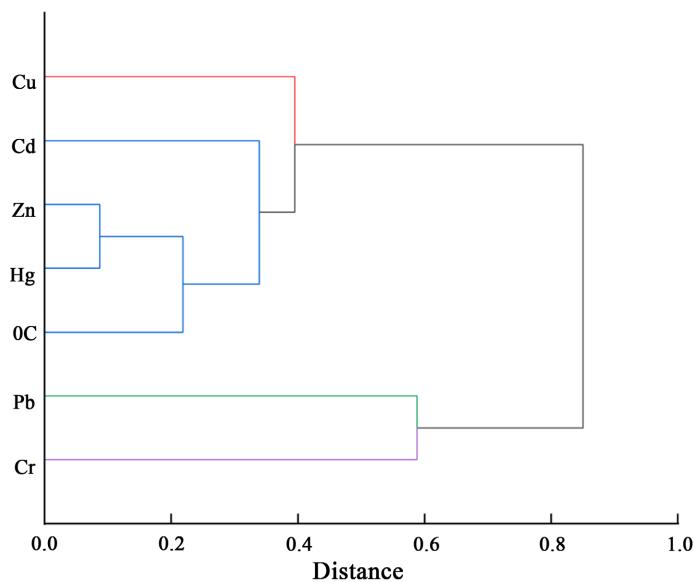


Figure 8. Cluster analysis of pollutants in surface sediments of Daya Bay sea area
图 8. 大亚湾海域表层沉积物中污染物聚类分析

Zn 元素存在中等强度相关性(r 分别为 0.59 和 0.64), 但在聚类分析中, Cr 却被单独分为一族, 考虑到 Pearson 分析主要关注两个变量之间的关系, 侧重线性关系, 而聚类分析主要基于多变量的整体相似性对变量分组, 会受到所有元素的综合影响。因此, 虽然 Cr 与 Cu、Zn 呈中等线性同步, 但可能被其他元素带来的整体特征差异所抵消, 导致在进行聚类分析时没有与 Cu、Zn 归为同一簇。

4. 结论

1) 海水中 6 种元素的平均含量由大到小分别为 Zn ($36.5 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) > Cu ($2.5 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) > Pb ($2.38 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) > Cr ($1.4 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$) > Hg ($0.072 \text{ ug}\cdot\text{L}^{-1}$), 沉积物的平均含量由大到小分别为 Zn ($92 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$) > Pb ($60 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$) > Cr ($46 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$) > Cu ($11 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$) > Cd ($0.06 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$) > Hg ($0.034 \text{ ug}\cdot\text{g}^{-1}$)。Zn 在海水和沉积物中均具有最高浓度, 沉积物重金属含量均高于该海域背景值, 反映出该海域受到陆源输入及人类活动影响显著。推测大亚湾海域湾顶重金属来源于工业活动, 湾顶西侧与交通运输业密切相关, 大亚湾东部主要源于人类活动、船舶尾气等。

2) 2023 年秋季海水重金属含量整体呈现沿岸浓度高、离海岸浓度低的特点, 表层沉积物的重金属含量主要集中在湾顶。这是由于重金属含量与水文动力密切相关, 沿岸与湾顶水文动力较弱, 水体流速慢, 海水重金属附着沉淀至海底形成沉积物累积。

3) 水质与表层沉积在清洁度上表现出一致性, 本研究依据海水中 6 种重金属得到算术均值多因子指数均小于 1, 平均指数值为 0.305, 小于 0.4, 表明该海域清洁, 水质良好。计算表层沉积物 6 种重金属的地累积指数, 均小于 0, 表明 2023 年秋季大亚湾海域表层沉积物处于清洁状态, 未受到重金属污染。

对未来大亚湾海域可能出现的潜在生态风险进行分析, 大亚湾海域海水中 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg 这 6 种重金属潜在生态风险指数平均值排序为 Pb (4.27) > Cd (1.67) > Cr (1.53) > Cu (1.14) > Zn (0.53) > Hg (0.41), 表层沉积物中 Cu、Pb、Cd、Cr、Zn、Hg 这 6 种重金属平均值排序为 Hg (14.37) > Pb (2.38) > Cu (1.27) > Zn (0.73) > Cd (0.03) = Cr (0.03), 各类重金属潜在生态风险指数均小于 40, 属于轻微潜在生态风险等级。

2023 年秋季大亚湾海域水质状况良好, 表层沉积物 Cu、Pb 等 6 种重金属均属第一类标准, 但表层沉积物重金属平均含量与大亚湾沉积物背景值相比, 却出现显著性富集现象。这与 21 世纪初以来大亚湾石化区等项目建设与运行、大亚湾滨海旅游业的发展、人类活动的增加密切相关, 长期的陆源污染输入使得重金属在沉积物中不断累积, 带来一定的潜在生态风险。近年来采取一系列环境整治行动后, 生态环境有所好转, 但沉积物重金属显著性富集现象的存在, 警示我们要坚持绿色发展, 在未来持续加强监测, 以保持良好的生态环境。

4) 采用 Pearson 与聚类分析进行重金属污染源分析, 表明 OC 与 Cd、Zn、Hg 具有较强的相关性, 主要污染来源相似。

参考文献

- [1] 花修艺, 赵宇, 付欣妍, 等. 生物扰动对沉积物-水界面附近污染物环境行为及生物地球化学过程的影响[J]. 吉林大学学报(理学版), 2025, 63(1): 271-285.
- [2] 赵连玲. 大亚湾核电海域生态系统质量综合研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- [3] 彭文启, 张详伟. 现代水环境质量评价理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [4] 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.
- [5] 张汉霞, 李希国, 卢伟华. 水环境质量评价指数法在东莞近岸水域水质评价中的应用[J]. 广东水利水电, 2010(5): 33-34.
- [6] 贾振邦, 周华, 赵智杰, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 北京大学学报(自然科学版),

- 2000(4): 525-530.
- [7] Hakanson, L. (1980) An Ecological Risk Index for Aquatic Pollution Control: A Sedimentological Approach. *Water Research*, **14**, 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- [8] 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.
- [9] 张银英. 大亚湾沉积物中重金属元素背景值研究[J]. 热带海洋, 1991(3): 76-80.
- [10] 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.
- [11] 王聪, 林军, 陈丕茂, 等. 大亚湾水交换的数值模拟研究[J]. 南方水产, 2008, 4(4): 8-15.
- [12] Chen, H., Wang, J., Chen, J., Lin, H. and Lin, C. (2016) Assessment of Heavy Metal Contamination in the Surface Sediments: A Reexamination into the Offshore Environment in China. *Marine Pollution Bulletin*, **113**, 132-140. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.08.079>
- [13] 黄奕文. 广东大亚湾海域表层沉积物重金属分布特征及化学形态研究[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2022.
- [14] 谢思荣. 涠洲岛海域船舶运输和石油污染对海水重金属的影响研究: 来自滨珊瑚的证据[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2023.
- [15] 于向楠. 北京市道路尘中重金属元素地球化学特征的时空变化规律[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2021.
- [16] 国家海洋局. GB 18668-2002 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [17] 谢文琦, 杨玉峰, 梁浩亮, 等. 惠州海水重金属污染特征及生态风险评估[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(7): 83-87.
- [18] 刘晓梦. 重金属在胶州湾流域沉积物中的环境行为研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛农业大学, 2018.
- [19] 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.
- [20] 唐得昊, 刘兴健. 大亚湾表层沉积物中重金属污染与潜在生态风险评价[J]. 亚热带资源与环境学报, 2018, 13(4): 1-7.