

大亚湾北部附近海域海洋沉积物中汞砷的变化分析

杨小平, 陈美靖*, 黄丽霞, 廖诗杰, 陈冰玲

惠州市海洋技术中心, 广东 惠州

收稿日期: 2025年10月10日; 录用日期: 2025年11月11日; 发布日期: 2025年12月23日

摘要

本文对2022年度大亚湾北部附近海域春秋两季沉积物中的汞(Hg)、砷(As)进行分析, 并采用地质积累指数和潜在风险指数进行评价。结果显示, 春秋两季Hg含量分别为0.045~0.071 mg/kg、0.043~0.050 mg/kg, 均值分别为: 0.061 mg/kg、0.047 mg/kg; 春秋两季As含量分别为: 5.359~8.388 mg/kg、4.550~9.693 mg/kg, 均值分别为: 6.879 mg/kg、6.679 mg/kg。结果表明Hg和As两种重金属的含量均符合海洋沉积物质量第一类标准, 地质积累指数呈现出海洋中的Hg和As元素属于安全清洁的状态。但潜在风险指数评价中显示出Hg存在极高的潜在生态风险, 而As的潜在风险则较轻微。与杨文超对大亚湾沉积物Hg、As近10年的研究分布情况相似, As含量没有明显变化; Hg含量逐渐升高, 且存在极高的潜在风险, 污染程度缓慢上升, 需要持续关注Hg的变化趋势。

关键词

沉积物, 汞, 砷, 地质积累指数, 潜在风险指数

Analysis of the Variations of Mercury and Arsenic in Marine Sediments in the Vicinity of the Northern Daya Bay

Xiaoping Yang, Meijng Chen*, Lixia Huang, Shijie Liao, Bingling Chen

Huizhou Marine Technology Center, Huizhou Guangdong

Received: October 10, 2025; accepted: November 11, 2025; published: December 23, 2025

Abstract

This article analyzes the mercury and arsenic in the spring and autumn sediments of near the
*通讯作者。

文章引用: 杨小平, 陈美靖, 黄丽霞, 廖诗杰, 陈冰玲. 大亚湾北部附近海域海洋沉积物中汞砷的变化分析[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(12): 1727-1736. DOI: 10.12677/aep.2025.1512185

northern part of Daya Bay Petrochemical Zone in 2022, and evaluates them using geological accumulation index and potential risk index. The results showed that the mercury content in the spring and autumn seasons was 0.045~0.071 mg/kg, 0.043~0.050 mg/kg, with an average of 0.061 mg/kg and 0.047 mg/kg, respectively; The content of arsenic in spring and autumn is 5.359~8.388 mg/kg, 4.550~9.693 mg/kg, with an average of 6.879 mg/kg and 6.679 mg/kg, respectively. The results showed that the contents of mercury and arsenic were in line with the first-class Marine sediment quality standard, and their geological accumulation index shows that the mercury and arsenic elements in the ocean belong to a safe and clean state. However, the evaluation of the potential risk index shows that mercury has very high potential ecological risk, while the potential risk of arsenic is relatively mild. Similar to Yang Wenchao's research on the distribution of mercury and arsenic in the sediment of Daya Bay in the past 10 years, there has been no significant change in the content of arsenic; The content of mercury gradually increased, and there is still a great potential risk of mercury. The degree of pollution is still slowly increasing, and continued attention needs to be paid to the changing trend of mercury.

Keywords

Sediments, Mercury, Arsenic, Geological Accumulation Index, Potential Risk Index

Copyright © 2025 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

惠州作为我国沿海城市，生态环境良好，海洋资源丰富，具备良好的经济基础。近年来，惠州积极发展海洋经济，抓住蓝碳经济机遇，不断扩大发展优势，在工业、渔业、旅游业上全面发展[1]-[3]。惠州海域以大亚湾为代表，利用“互联网”+技术监测海洋生态[4]变化，对大亚湾的生态环境进行监测，有利于保护大亚湾生态资源环境，响应广东省海洋经济可持续发展战略[5]。

绿水青山就是金山银山。良好的海洋环境，不仅是我们人类必需的生存条件，而且能够为海洋经济的可持续发展提供必要条件。一直以来，海洋沉积物中重金属含量是判定海洋生态环境的指标，沉积物中重金属通过水体沉降富集[6] [7]，当水体中的理化因素[8]发生改变时，会二次释放[9] [10]出重金属进入水体再次污染水体，当浓度超过一定范围会危害海洋中的生物及人类的生命健康。

Cu、Pb、Cr、Cd、Ni、Zn、Hg、As 等重金属对海洋生物及人类危害较大，随着大亚湾北部海上交通、工业、滨海旅游业迅速发展，人类活动更加频繁。其中，As 作为与人类活动[11] [12]密切相关的元素，笔者针对该元素进行研究。此外，大亚湾海域附近石化区等工业活动，对海洋生态环境可能存在一定影响，重金属 Hg 作为工业活动的表征元素[13]，故本文笔者结合沉积物中 As、Hg 含量，分析探讨现阶段惠州海洋生态环境的状况，以期为海洋经济可持续发展提供有力的数据支持。

本文通过分析大亚湾北部附近海域 Hg、As 含量分布，判断重金属 Hg、As 的含量是否符合标准。同时，结合杨文超[25]的文章，利用地质积累指数[14]和潜在风险指数法[15]对大亚湾海域的沉积物重金属进行评价，探讨大亚湾近十三年来 Hg、As 含量的变化规律。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

本文采集的样品有 6 个站位点，采取数据来源于惠州大亚湾北部海域 2022 年春秋两个季度的样品，

其站位点的分布如图 1 所示。样品的采集按照《海洋监测规范第 3 部分：样品采集、贮存与运输》(GB 17378.3-2007) [16] 中的要求并制备海洋沉积物样品。其中 S03、S07、S10、S12 中的站位与杨文超 [25] 所分析的站位重合度极高，且分析方法一致。

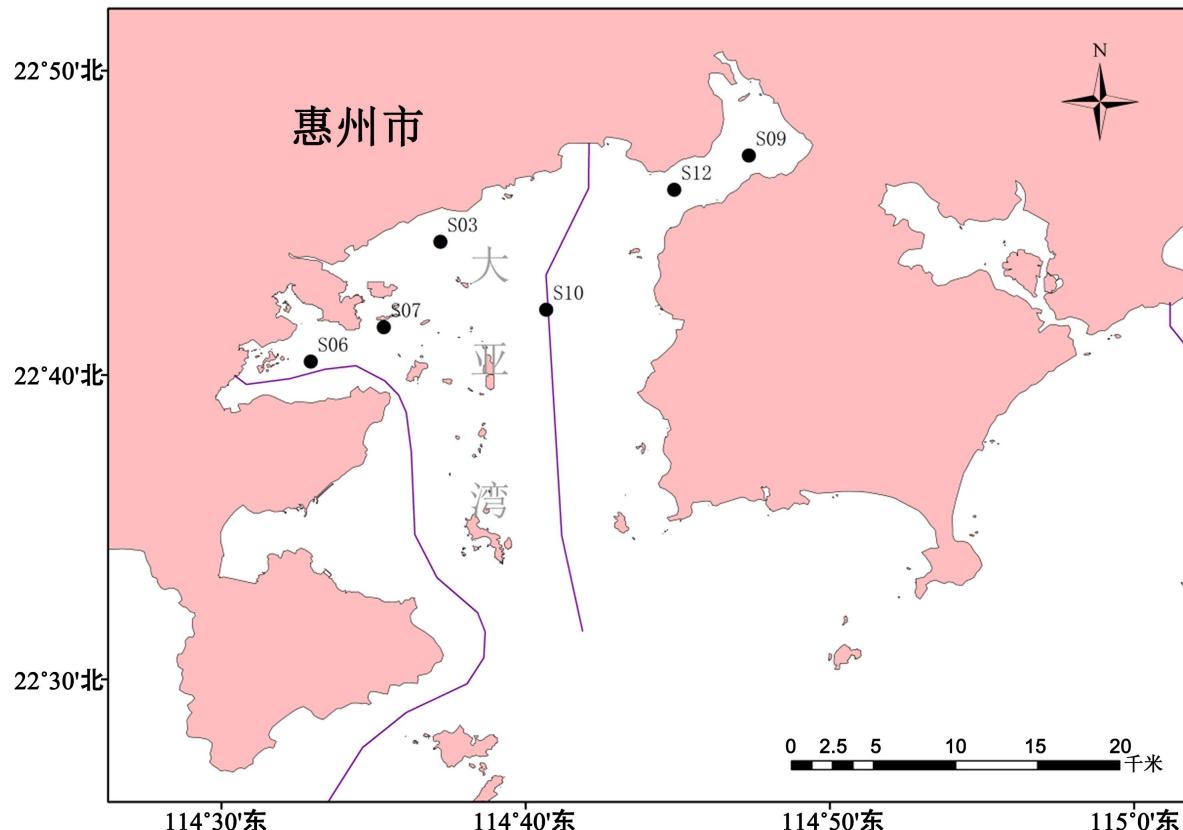


Figure 1. Sampling stations in Daya bay in spring and autumn 2022
图 1. 2022 年春秋两季大亚湾采样站位点

2.2. 样品分析

样品的检测分析方法是根据《海洋监测规范第 5 部分：沉积物分析》(GB 17378.5-2007) [17] 中 5.1 Hg 和 11.1 As 的检测方法进行。检测分析所使用的仪器设备是双道原子荧光光度计。

本文在检测分析中通过采用添加平行样和质控样品的测定来控制精密度确保样品检测的规范要求。

2.3. 评价标准

根据《海洋沉积物质量标准》(GB 18668-2002) [18] 及检测所得数据可以简单将 Hg、As 中每个站点进行分类，其评价标准如下表 1 所示，通过海洋沉积物质量标准可对海洋环境进行初步评价。

Table 1. Quality standards for marine sediments
表 1. 海洋沉积物质量标准

项目	第一类	第二类	第三类
$Hg \times 10^{-6}$	0.20	0.50	1.00
$As \times 10^{-6}$	20.0	65.0	93.0

2.4. 评价方法

2.4.1. 地质积累指数

地质积累指数[14]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:

$$I_{geo} = \log_2 \left[C_i / (1.5B_i) \right]$$

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[19] [20], 其中大亚湾海域沉积物 Hg、As 的背景值[14] [21]分别为 0.35 mg/kg、13 mg/kg, 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。

通过计算所得的 I_{geo} 数值可根据下表来判断该区域沉积物重金属污染程度(表 2)。

Table 2. Evaluation levels of regional accumulation index

表 2. 地质积累指数评价级别

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

2.4.2. 潜在风险指数法

由 Håkanson [23] [24] 提出环境潜在风险, 通过检测区域内沉积物、海水的重金属含量来初步判定海域的潜在风险, 从而进一步监管海域, 潜在风险指数计算公式如下:

$$E_r^i = (\text{Tri} \times C_j^i))$$

$$C_j^i = \frac{C_i}{C_n}$$

E_r^i 是指单个重金属元素 i 的潜在生态风险系数, Tri 是指重金属毒性相应指数, C_j^i 是指重金属的第 j 个项目的污染指数, C_i 是重金属实测值, C_n 是重金属沉积物背景值, 参考多位学者的研究成果[22] [25], 综合参考本文使用 Hg、As 的背景值分别为 0.011 mg/kg、2.61 mg/kg, Hg、As 的毒性相应指数分别为 40、10 [24]。表 3 中潜在风险指数等级引用杨文超[25]和谷阳光[26], 各站位点所属的潜在风险指数等级如表 3 所示。

Table 3. Potential risk index evaluation levels

表 3. 潜在风险指数评价级别

潜在风险指数	轻微	中等	较高	很高	极高
E_r^i	$E_r^i < 30$	$30 \leq E_r^i < 50$	$50 \leq E_r^i < 100$	$100 \leq E_r^i < 150$	$150 \leq E_r^i$

3. 结果与讨论

3.1. 沉积物重金属含量分析

2022 年春秋两季大亚湾北部海洋沉积物重金属 Hg、As 含量见下表 4, 其中春季 Hg 含量在 0.045~0.071 mg/kg、As 含量在 5.36~8.39 mg/kg, 秋季 Hg 含量在 0.043~0.050 mg/kg、As 含量在 4.55~9.69 mg/kg, 其均值分别为 0.061 mg/kg、6.88 mg/kg、0.047 mg/kg、6.68 mg/kg。春秋两季沉积物 Hg 和 As 的含量均符合一类标准要求。

Table 4. Mercury and arsenic content in sediments from the northern area of Daya Bay in 2022
表 4. 2022 年大亚湾北部沉积物 Hg 和 As 含量

站位	春季		秋季	
	Hg ($\times 10^{-6}$)	As ($\times 10^{-6}$)	Hg ($\times 10^{-6}$)	As ($\times 10^{-6}$)
S03	0.045	6.22	0.05	9.69
S06	0.071	7.51	0.043	4.55
S07	0.065	6.58	0.043	6.33
S09	0.052	7.22	0.046	5.53
S10	0.057	5.36	0.049	6.72
S12	0.073	8.39	0.049	7.25
最大值 Max	0.071	8.39	0.050	9.69
最小值 Min	0.045	5.36	0.043	4.55
平均值	0.061	6.88	0.047	6.68

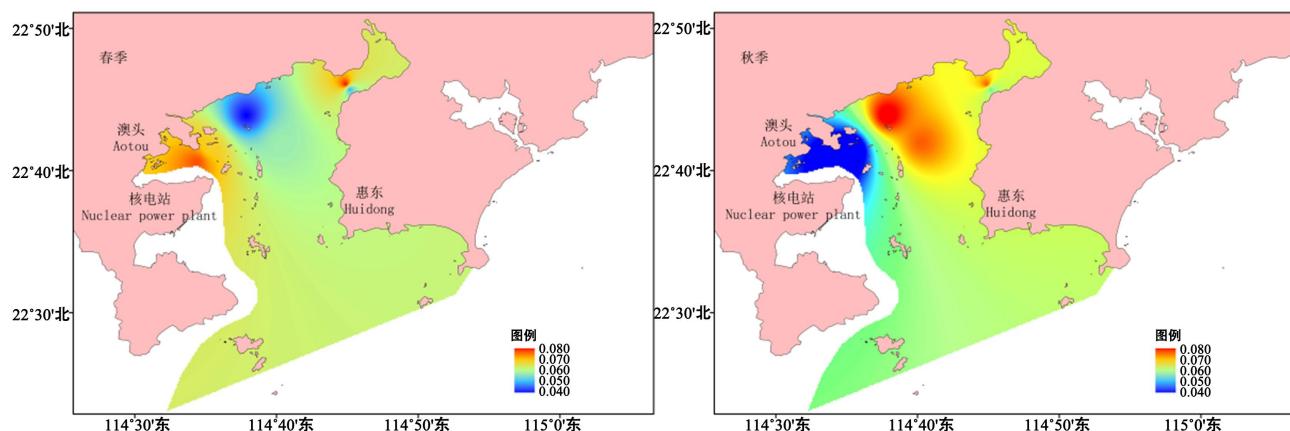


Figure 2. Hg content (mg/kg) distribution

图 2. Hg 含量(mg/kg)分布

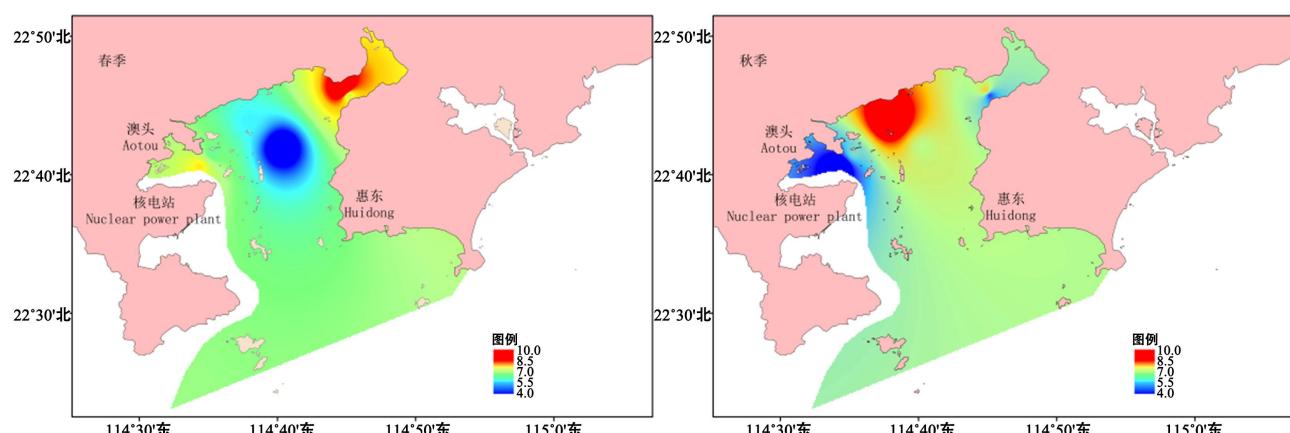


Figure 3. As content (mg/kg) distribution

图 3. As 含量(mg/kg)分布

对 2022 年大亚湾北部沉积物含量进行空间分布图的绘制, 从图 2、图 3 中可以看出春季平均含量大于秋季平均含量, 大亚湾北部靠近核电站附近海域 Hg、As 含量春季均大于秋季, 春季大亚湾北部从西

至东方向呈高 - 低 - 高趋势, 而秋季大亚湾北部从西至东方向 Hg、As 含量呈现低 - 高 - 低趋势。

3.2. 沉积物重金属污染评价分析

根据 1.4.1 的计算公式可得出 2022 年春秋两季的 Hg、As 的地质积累指数, 见表 5, 各站位海域地质积累指数值 I_{geo} 呈现秋季 > 春季, Hg、As 的地质积累指数值 I_{geo} 呈现 $Hg < As$ 。由表可知, 2022 年地质累积指数均小于 0, 这说明 2022 年大亚湾北部海域干净清洁, 海洋环境受到工业等污染效果不显著, 这与李明泽[27]研究一致。

Table 5. Summary of 2022 geological accumulation index results

表 5. 2022 年地质积累指数结果汇总

站位	春季		秋季	
	Hg	As	Hg	As
S03	-3.54	-1.65	-3.39	-1.01
S06	-2.89	-1.38	-3.61	-2.10
S07	-3.01	-1.57	-3.61	-1.62
S09	-3.34	-1.43	-3.51	-1.82
S10	-3.20	-1.86	-3.42	-1.54
S12	-2.85	-1.22	-3.42	-1.43
平均值	-3.14	-1.52	-3.49	-1.59

根据 1.4.2 中的计算公式计算出 2022 年春秋两季大亚湾北部海域春秋两季 Hg 的潜在生态风险值 E_r^i 均超过 150, 属于极高潜在生态风险。2022 年春秋两季大亚湾北部海域春秋两季 As 的潜在生态风险值 E_r^i 均低于 30, 属于轻微潜在生态, 但春季站位 S12、秋季站位 S03 的潜在生态风险值 E_r^i 高于 30, 在后续监测中需要重点关注(表 6)。

Table 6. Summary of potential ecological risk assessment results for 2022

表 6. 2022 年度潜在生态风险评价结果汇总

站位	污染指数 C_j^i		潜在生态风险 E_r^i			
	Hg	As	春季		秋季	
			Hg	As	Hg	As
S03	4.32	3.05	163.64	23.84	181.82	37.14
S06	5.18	2.31	258.18	28.79	156.36	17.43
S07	4.91	2.47	236.36	25.19	156.36	24.27
S09	4.45	2.44	189.09	27.65	167.27	21.20
S10	4.82	2.31	207.27	20.53	178.18	25.73
S12	5.55	3.00	265.45	32.14	178.18	27.78
平均值	4.87	2.60	220.00	26.36	169.70	25.59

3.3. 趋势分析

本文中 Hg 含量与杨文超[25]2009、2012 和 2018 年的含量相比高 34%, 与 2015 年相比降低了 55%;

本文中 As 含量与杨文超[25] 2009 和 2018 年相比分别降低了 15% 和 8%，与 2012 年相比提高了 41%，2015 年 As 含量与本文相近。Hg 含量的变化趋势呈现先升后降，As 含量的变化趋势呈现先降后升。

本文中 Hg 的地质积累指数值 I_{geo} 杨文超[25] 2009、2012 和 2018 年的地质积累指数 I_{geo} 值相比高了 9%，与 2015 年相比降低 59%；As 的地质积累指数 I_{geo} 值与 2009 和 2018 年相比分别降低了 18% 和 8%，与 2012 年相比高了 25%，2015 年 As 的地质积累指数 I_{geo} 值与之相同。 Hg 地质积累指数的变化趋势呈现先升后降，As 地质积累指数的变化趋势呈现先降后升。

本文中 Hg 的潜在生态风险值 E_r^i 与杨文超[25] 2009 和 2012 年的 E_r^i 值相比高了 34%，与 2015 年相比降低了 55%，与 2018 年相比高了 78%；As 的潜在生态风险值 E_r^i 与 2009 和 2018 年相比分别降低了 15% 和 11%，与 2012 年相比高了 41%，2015 年的 As 潜在生态风险值 E_r^i 与之相近。 Hg 潜在生态风险的变化趋势呈现先升后降，As 的潜在生态风险的变化趋势呈现先降后升。

将本文的数据进行评价分析后与杨文超[25]进行对比， Hg 的含量、地质积累指数和潜在生态风险年度变化趋势均是呈现先升后降，As 的含量、地质积累指数和潜在生态风险年度变化趋势均是呈现先降后升。可见，一个元素在不同的评价分析方法中，分析结果有所不同，但是在年度的变化趋势中，不同的分析方法年度变化趋势也是相同的。趋势示意图见图 4、图 5。

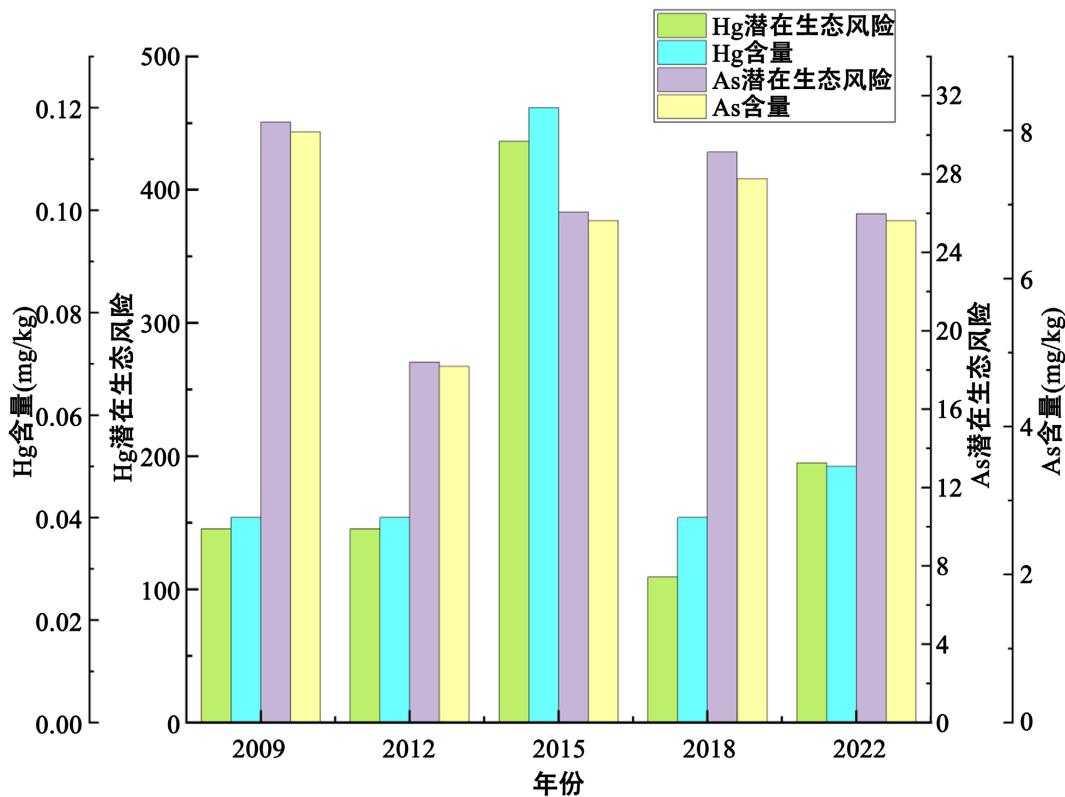


Figure 4. Annual trend chart of potential ecological risks and content

图 4. 潜在生态风险及含量年度变化趋势图

根据查阅的相关信息推断出年度变化趋势与惠州市海洋经济发展有关，在“十二五”期间，大亚湾地区的渔业与港口运输业保持持续稳定发展态势，惠州 LNG 电厂二期、广州控股惠东黄埠东山海风风电场、国电电力惠东斧头石风风电场等重大项目进展顺利。与此同时，区域经济的快速发展正逐步对海洋生态环境产生影响。“十三五”期间，惠州市沿海港口货物吞吐量持续高速增长，大亚湾石化区炼油产能

达 2200 万吨、乙烯产能达 220 万吨，炼化一体化规模跃居全国首位，工业化进程显著加速。然而，彼时清洁能源产业的发展尚未同步跟上工业扩张的步伐，导致 2015 年前后海洋污染问题相对突出。此后，随着中科院两大科学装置、广东太平岭核电、港口海上风电等一批重大清洁能源项目相继落户惠州，粤港澳大湾区清洁能源-6-中心与能源科技创新中心的建设加速推进，有效缓解了大亚湾海洋工业高速发展带来的环境压力。综上可见，只要绿色能源建设与工业发展协调同步、齐头并进，海洋经济的增长对海洋环境的影响可以有效控制在合理范围内。

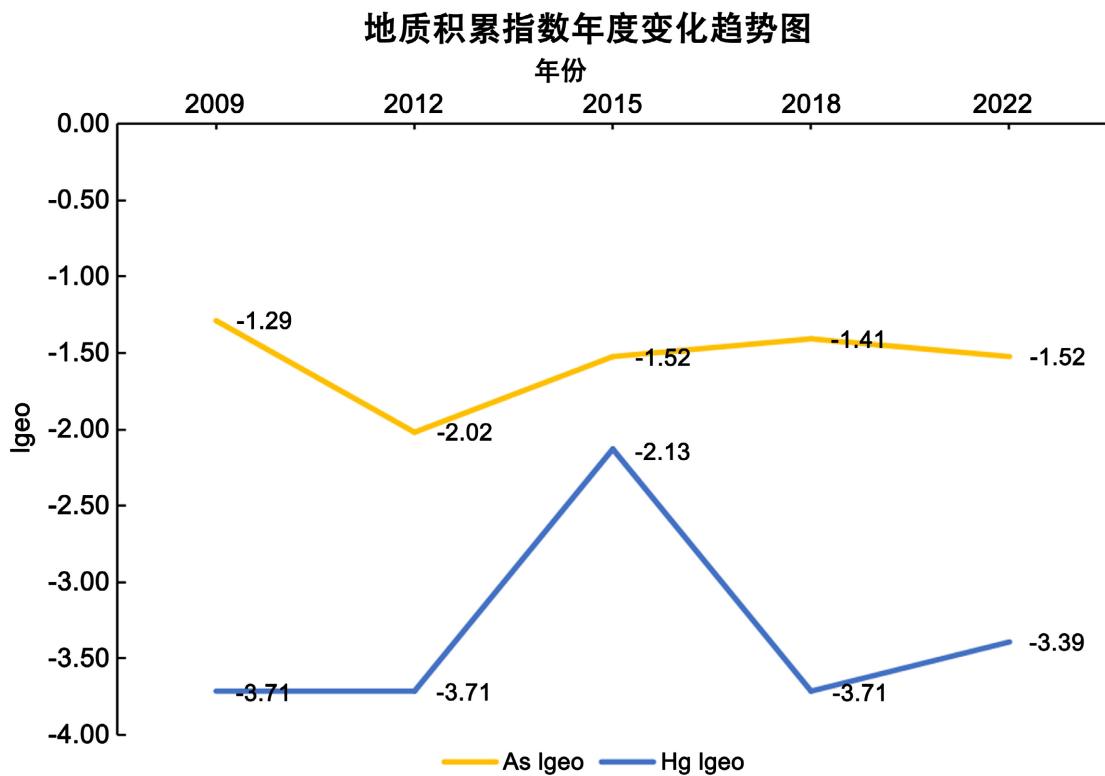


Figure 5. Annual trend chart of geological accumulation index
图 5. 地质积累指数年度变化趋势图

3.4. 影响重金属生态风险的因素

通过地质积累指数和潜在风险指数两种评价方法可知，大亚湾北部海域中的沉积物 As 为清洁状态，污染程度较轻，而在潜在风险指数法中，Hg 则着重需要关注。

海洋环境的污染分为海洋陆源污染和海洋海源污染。海洋开发利用仍是以陆地为基础，目前海洋环境的污染主要是以陆源污染为主[27]。而沉积物重金属的陆源污染[25]主要来源有：工业污水排放的废水污染、化工生产中产生的废气污染和冶炼中产生的 Hg [30]的固体废物污染。鉴于大亚湾部分海域为石化区，以炼油、化工一体化[28] [29]的工业活动生产为主要的经济发展手段，Hg 作为对环境的主要输入来源，需持续对沉积物中 Hg 元素进行监测。

沿海地区环境规制、产业结构、海洋科技水平虽然对海洋环境污染有影响，但是效果并不显著[27]。随着海域市场化进程的推进，政府出台环保政策，加大对用海主体的规制。繁荣的海域市场亦吸引一批资金、技术雄厚的海域需求主体参与，促进了海洋产业的生产优化，更有利于控制海洋环境污染。与此同时，城镇化管理的推进，进一步减缓海洋环境的污染作用。故此，在大亚湾加快推动渔港建设，推动

惠州港从产业港向贸易港、产业港并重转型，推进滨海城市的建设，推进滨海高端酒店、商业综合体等高品质项目建设，打造“国际化社区、国内一流度假区”^[31]等一系列活动下，大亚湾北部海域生态环境受到的影响不大。

3.5. 不同评价结果的量化影响

地质积累指数主要考虑了自然造岩运动引起的影响，而潜在风险指数主要考虑重金属的富集特征、多种重金属的相互影响、毒性水平、生态污染敏感性。前者评价主要受背景值影响，后者评价主要受该元素的毒性系数影响^[32]。元素在环境物质中的丰度数越大，毒性越大，沉积物中元素的释放系数愈大，毒性愈大^[33]，故而其毒性系数愈大。本文在进行评价时，Hg 地质积累指数属于安全清洁的状态，而潜在风险指数表现出极高的潜在生态风险，这是由于在计算时潜在风险指数法考虑较为综合，毒性系数取值较大，采用更为严格的判断标准，以引起监测者的关注。

3.6. 小结

通过杨文超^[25]2009 年、2012 年、2015 年、2018 年对大亚湾海洋沉积物 Hg、As 的评价，以及本文监测的大亚湾北部沉积物 Hg、As 数据进行比对，证明了 As 自 2009 年以来对生态环境的影响较小。但 Hg 对生态环境的危害影响有所加深，其潜在风险指数升高近 1 倍，后续需多关注 Hg 浓度。

笔者对于大亚湾海域中的沉积物 Hg、As 近十三年的数据进行分析，但由于每年的监测站位、监测时间频次有所不同，本研究仍有不足之处。且局限于实验条件，在分析中未区分 Hg 的化学形态，对于 Hg 最重要的形态甲基汞还有待深入研究。随着工业化进程的加强，大亚湾石化区的工业发展势必影响沉积物中的重金属含量，未来应该加强对这片海域重金属含量的监测。

4. 结论

(1) 2022 年大亚湾北部海洋沉积物春季和秋季 Hg、As 平均含量均符合沉积物质量第一类标准，符合所在地海洋经济发展对海洋沉积物的要求。

(2) 地质积累指数的结果显示重金属元素 Hg 和 As 均为负值，Hg 和 As 元素均属于安全清洁的状态。

(3) 春秋两季重金属元素 As 的潜在风险指数处于轻微风险；春秋两季 Hg 的潜在风险指数数值 E_r^i 均高于 150，具有极高的生态风险，Hg 对人类和生物存在产生负效应的概率较大。随着北部的工业活动频率的提高，建议密切关注海洋沉积物重金属 Hg、As 的含量变化趋势。

(4) 不同的评价方法考虑的侧重因素不同，地质积累指数评价方法主要考虑了自然造岩运动引起的影响，重点评价沉积物中的重金属含量污染情况；而潜在风险指数评价方法则考虑重金属毒性相应指数的影响，主要体现水体环境中重金属整体的含量对整个水体生态环境的影响。利用地质积累指数和潜在风险指数两种指标共同评价大亚湾北部海域生态情况，将更为全面。

参考文献

- [1] 李向英. “承上启下”延伸大亚湾石化产业链[N]. 惠州日报, 2022-10-14(003).
- [2] 周鑫, 陈培雄, 于文琪, 等. 惠州大亚湾区渔港建设规划建议[J]. 中国水产, 2020(8): 44-47.
- [3] 钟伟城. 大亚湾滨海旅游区治理问题研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [4] 张天俊. 基于生态系统开展海洋资源管理可持续发展研究——以广东省惠州市海洋资源管理实践为例[J]. 特区经济, 2019(2): 65-67.
- [5] 姚梓娴, 许虹, 刘娟. 广东海洋经济可持续发展评价指标体系构建[J]. 科技创业月刊, 2022, 35(1): 33-38.
- [6] 朱玥, 丁颖, 经欢欢, 孔德智, 周心刚, 朱亮. 中山水库沉积物重金属分布特征及生态风险评估[J]. 净水技术, 2022, 41(11): 40-48+178.

- [7] Pratap, A., Mani, F.S. and Prasad, S. (2020) Heavy Metals Contamination and Risk Assessment in Sediments of Lauca Bay, Suva, Fiji. *Marine Pollution Bulletin*, **156**, Article 111238. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111238>
- [8] 张逸飞, 靳宇扬, 刘佳佳, 李文润, 顾珉嘉. 沉积物-水界面研究在水环境治理中的应用[J]. 现代盐化工, 2022, 49(6): 61-64.
- [9] 艾留唤, 马秉, 邵世伟, 田侠, 张磊. 东平湖水体和沉积物重金属分布及风险评估[J]. 环境保护科学, 2023, 49(2): 126-131.
- [10] 曲良, 谭海涛, 刘涛, 张文龙. 北部湾铁山港附近海域水体和沉积物重金属分布特征及生态风险评价[J]. 环境化学, 2023, 42(3): 757-768.
- [11] Liu, J., Peng, A., Deng, S., Liu, M., Liu, G. and Li, C. (2021) Distribution of Heavy Metals and Radionuclides in the Sediments and Their Environmental Impacts in Nansha Sea Area, South China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **166**, Article 112192. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112192>
- [12] Hasan, M.R., Anisuzzaman, M., Choudhury, T.R., Arai, T., Yu, J., Albeshr, M.F., et al. (2023) Vertical Distribution, Contamination Status and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from a Mangrove-Dominated Tropical River. *Marine Pollution Bulletin*, **189**, Article 114804. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.114804>
- [13] Jin, B., Wang, J., Lou, W., Wang, L., Xu, J., Pan, Y., et al. (2022) Pollution, Ecological Risk and Source Identification of Heavy Metals in Sediments from the Huafei River in the Eastern Suburbs of Kaifeng, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **19**, Article 11259. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811259>
- [14] 贾振邦, 周华, 张宝权, 等. 应用地积累指数法评价太子河沉积物中重金属污染[J]. 辽宁城乡环境科技, 1997(4): 41-44.
- [15] 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.
- [16] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). 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, 2007.
- [17] 全国海洋标准化技术委员会(SAC/TC 283). GB 17378.5-2007. 海洋监测规范第5部分: 沉积物分析[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [18] 国家海洋标准计量中心. GB 18668-2002. 海洋沉积物质量[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [19] 能子礼超, 勾琴, 彭代芳, 熊富皓, 杨丹凤, 刘盛余. 工业搬迁企业原场地土壤 Pb、Cd、Hg、Cr 污染研究[J]. 能源与环保, 2020, 42(8): 1-5+14.
- [20] Yang, C., Yu, G., Liu, Y., Shan, B., Wang, L., Sun, D., et al. (2022) Heavy Metal Distribution in Surface Sediments of the Coastal Pearl Bay, South China Sea. *Processes*, **10**, Article 822. <https://doi.org/10.3390/pr10050822>
- [21] 王莹, 陈玉成, 李章平. 我国城市土壤重金属的污染格局分析[J]. 环境化学, 2012, 31(6): 763-770.
- [22] 成杭新, 李括, 李敏, 杨柯, 刘飞, 成晓梦. 中国城市土壤化学元素的背景值与基准值[J]. 地学前缘, 2014, 21(3): 265-306.
- [23] 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)
- [24] 马建华, 韩昌序, 姜玉玲. 潜在生态风险指数法应用中的一些问题[J]. 地理研究, 2020, 39(6): 1233-1241.
- [25] 杨文超, 黄道建, 陈继鑫, 等. 大亚湾近十年沉积物中汞、砷分布及污染评价[J]. 水产科学, 2020, 39(6): 915-921.
- [26] 谷阳光, 林钦, 王增焕, 等. 柘林湾及邻近海域沉积物重金属分布与潜在生态风险[J]. 南方水产科学, 2013, 9(2): 32-37.
- [27] 李明泽. 海域使用权市场化对海洋环境污染的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2021.
- [28] 吴欣. 惠州大亚湾石化区产业发展的探讨[J]. 广州化工, 2007(4): 103-104.
- [29] 欧阳德辉, 匡湘鄂, 冯丽均, 等. 惠州大亚湾石化区再添巨无霸[N]. 惠州日报, 2023-05-22(002).
- [30] 林承奇, 于瑞莲, 胡恭任, 等. 九龙江河口潮间带表层沉积物汞污染分布、赋存形态与生态风险[J]. 生态毒理学报, 2014, 9(5): 901-907.
- [31] 曾静妍, 黄旭新, 张宇琪. 系列港口建设项目加速推进[N]. 惠州日报, 2024-01-30(009).
- [32] 程岩, 刘月, 李富祥, 等. 鸭绿江口及毗邻浅海沉积物重金属富集特征与潜在生态风险比较[J]. 环境科学研究, 2011, 24(5): 516-525.
- [33] 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(2): 112-115.