

考洲洋入海口邻近海域海水中重金属的分布特征及生态风险初探

陈冰玲, 杨小平*, 周志凯, 黄丽霞, 廖诗杰

惠州市海洋技术中心, 广东 惠州

收稿日期: 2023年9月9日; 录用日期: 2023年10月10日; 发布日期: 2023年10月18日

摘要

本文对2022年春秋两季考洲洋入海口邻近海域海水进行生态环境监测, 利用算术均值多因子指数法和风险熵评价法研究海水中重金属的污染现状与生态评价。结果显示: 考洲洋入海口邻近海域海水质量整体良好, 海水中6种重金属含量符合第二类标准。算术均值多因子指数法结果显示, 调查海域海水污染级别为清洁, 春秋两季站位5海水中Cu、Pb含量均最高。风险熵评价法结果显示, Pb的风险熵远小于0.1, 生态风险较低; As、Cu对海洋生物具有明显的生态风险, 需要引起关注。Pearson分析显示, 海水中Cd与Hg具有相同或相似的来源, 盐度显著作用于Cd元素分布。

关键词

海水, 海洋化学, 污染评价, 重金属

Distribution Characteristics and Ecological Risk of Heavy Metals in Seawater near the Estuary of the Kaozhou Ocean

Bingling Chen, Xiaoping Yang*, Zhikai Zhou, Lixia Huang, Shijie Liao

Marine Technology Center of Huizhou, Huizhou Guangdong

Received: Sep. 9th, 2023; accepted: Oct. 10th, 2023; published: Oct. 18th, 2023

Abstract

In this paper, the ecological environment monitoring of seawater in the estuary of Kaozhou Ocean

*通讯作者。

文章引用: 陈冰玲, 杨小平, 周志凯, 黄丽霞, 廖诗杰. 考洲洋入海口邻近海域海水中重金属的分布特征及生态风险初探[J]. 环境保护前沿, 2023, 13(5): 1145-1156. DOI: 10.12677/aep.2023.135137

was conducted in the spring and autumn of 2022. The pollution status and ecological assessment of heavy metals in seawater were studied by means of arithmetic mean multi-factor index method and risk entropy evaluation method. The results show that the sea water quality of the sea water in the estuary of the Kaozhou Ocean is good, and the content of 6 kinds of heavy metals in the sea water meets the second class standard. The results of arithmetic mean multifactor index method show that the pollution level of sea water is clean, and the contents of Cu and Pb in sea water at station 5 are the highest in spring and autumn. The results of risk entropy evaluation method show that the risk entropy of Pb is much less than 0.1, and the ecological risk is low. As and Cu have obvious ecological risks to Marine organisms and need to be paid attention to. Pearson analysis showed that Cd and Hg had the same or similar sources in seawater, and salinity significantly affected the distribution of Cd elements.

Keywords

Seawater, Marine Chemistry, Pollution Assessment, Heavy Metals

Copyright © 2023 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

地球表面约 71% 是海洋，海洋中所含水约为地球总水量的 97%。海水的生态环境反映了地球上的生态环境，保护好海洋环境对促进沿海地区高质量发展、构建人海和谐关系具有重要意义。截至 2021 年，我国一类海水水质标准的海域面积已经占据管辖海域的 97.7%，近海岸优良水质面积占 81.3% [1]，海洋生态保护取得良好的成效。

海水重金属来源方式多样，包括自然因素和人为因素，如大气沉降、岩石风化、废水排放[2]、矿采[3]等。重金属在海洋环境中具有持续时间长、毒性作用强的特点，不仅具有潜在的生态风险，而且能通过食物链直接或间接地进入人体，最终对人类健康产生危害[4]。考洲洋作为惠州重要水产养殖海域之一，对考洲洋入海口海域进行重金属污染评价，分析重金属来源具有重要作用。

此前，国内外学者对考洲洋入海口邻近海域开展了一定的研究。杨玉峰等[5]研究发现 2016 年惠州近海岸环境质量秋季优于夏季，主要超标因子为无机氮和活性磷酸盐。叶冠等人[6]利用 2017 年 11 月和 2018 年 4 月对考洲洋海水质量进行调查，主要研究 DO、COD、DIN 等水质因子的水平分布与季节变化情况。史凯文[7]对 2018 年 10 月和 2019 年 4 月太平岭海域进行航次调查，研究显示海域水质污染级别为清洁，秋季的综合污染情况比春季严重。杨小平等[8]对 2019 年考洲洋入海口海水中汞、砷元素进行研究，海水水质良好，属于尚清洁的污染级别。关于考洲洋入海口重金属多元素水平分布与季节变化的研究较少。

本文主要根据春秋两航次 6 种重金属的检测结果，研究该海域水体重金属污染现状、生态风险，对 6 种重金属进行相关性分析，以期惠州海洋经济的可持续发展提供参考依据。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集

2022 年 5 月(春季)、2022 年 9 月(秋季)在考洲洋入海口邻近海域设采样站位 6 个，采样站位分布见

图 1。严格按照《海洋监测规范》(GB 17378.3-2007)和《海洋调查规范》(GB/T 12763-2007)对样品进行采集、贮存、运输,将样品送回实验室进行检测。



Figure 1. Distribution of sampling stations

图 1. 采样站位分布

2.2. 样品分析

海水的溶解氧、水温、电导率等在进行海水采集时,利用多参数水质分析仪(德国 WTW MULTI 3501)进行现场测试;重金属按照《海洋监测规范》(GB 17378.4-2007)对所采集海水进行前处理与分析。

Cu、Pb、Cd、Cr 均采用无火焰原子吸收分光光度法。取过滤水样于比色管中,滴加指示剂,调节溶液至合适 pH 值,加入螯合物进行螯合萃取分离后,使用原子吸收分光光度计(东西分析 AA-7050)于特征波长下进行测定。

As、Hg 均采用原子荧光法。取过滤水样于比色管中,将样品进行消解,再分别取消化液与分析空白液,使用原子荧光光度计(北京吉天 AFS-930)进行测定。

2.3. 评价标准

2.3.1. 算术均值型多因子指数法

本文采用算术均值型多因子指数法[9] [10]进行评价,计算公式如下:

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

其中 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, S_i 为第 i 种污染物评价标准值,本文根据 GBGB3097-1997 采用国家二类海水评价标准,参照文献, I 所对应的污染级别及水质情况如表 1 所示[11]。

Table 1. Water quality evaluation grading standards**表 1.** 水质评价分级标准

水质指数	污染级别	水质状况
$I < 0.2$	清洁	优良
$0.2 \leq I < 0.4$	尚清洁	良好
$0.4 \leq I < 0.7$	轻污染	一般
$0.7 \leq I < 1.0$	中度污染	差
$1.0 \leq I < 2.0$	重污染	较差
$I \geq 2.0$	严重污染	极差

2.3.2. 风险熵评价法

风险熵(RQ)是指污染物的暴露值与生物可接受值的比值[11] [12] [13]。风险熵评价法通常用来评价海水中重金属对海洋生物的生态风险程度，参照阎琨等人文献[14]，其公式为：

$$PNEC = \frac{HC_5}{SF} \quad (2)$$

$$RQ = \frac{EEC}{PNEC} \quad (3)$$

式中：EEC 为环境暴露数据，本文采用重金属的实测值。PNEC 为预测无效应浓度，HC₅ 为物种毒性敏感性累计模型(SSD)的 5%分位数。HC₅ 值见表 2 [15]。SF 为安全毒性因子，取保守值 5。评价标准见表 3。

Table 2. Fitted toxicity values HC₅ for marine organism**表 2.** 海洋生物拟合毒性值 HC₅

元素	Cu	Pb	Cd	Cr	Hg	As
HC ₅ /μg·L ⁻¹	3.46	234.06	1.07	25.43	2.84	0.50

Table 3. Risk entropy evaluation criteria**表 3.** 风险熵评价标准

RQ	污染程度
$RQ \leq 0.1$	轻微生态风险
$0.1 < RQ \leq 1$	中等生态风险
$RQ > 1$	高生态风险

2.4. 数据分析

重金属浓度数据采用站点的浓度平均值，数据分析、分析与绘图使用 Excel 2010、SPSS 等软件。

3. 结果与讨论

3.1. 含量分析

2022 年 5 月(春季) 2022 年 9 月(秋季)的调查显示，考洲洋入海口邻近海域海水中各金属含量均值从高到低的顺序依次为 Cu > Cr > As > Pb > Cd > Hg。在两季调查中，海水中各重金属含量的分布特征如下：

Cu: 春季航次中, 表层海水含量范围为 2.4609~9.4907 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 6.7614 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.1270~7.5790 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 3.8474 $\mu\text{g/L}$ 。秋季航次中, 表层海水含量范围为 0.6606~4.1052 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 2.5280 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.5288~1.9252 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 1.4354 $\mu\text{g/L}$ 。春季航次中, 表层海水、底层海水均符合国家一类海水水质标准。由图 2 知, 春秋两季站位 5 海水中 Cu 含量均最高。

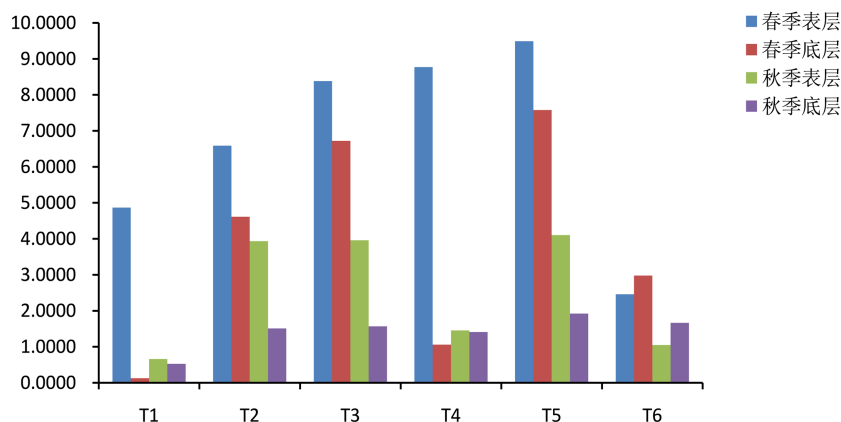


Figure 2. Cu content change in seawater ($\mu\text{g/L}$)
图 2. 海水中 Cu 含量变化($\mu\text{g/L}$)

Pb: 春季航次中, 表层、底层海水 Pb 含量皆低于检出限。秋季航次中表层海水含量范围为 0.0083~1.4050 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.4082 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.0150~1.4313 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.7505 $\mu\text{g/L}$ 。由图 3 知, 站位 5 海水中 Pb 含量最高。

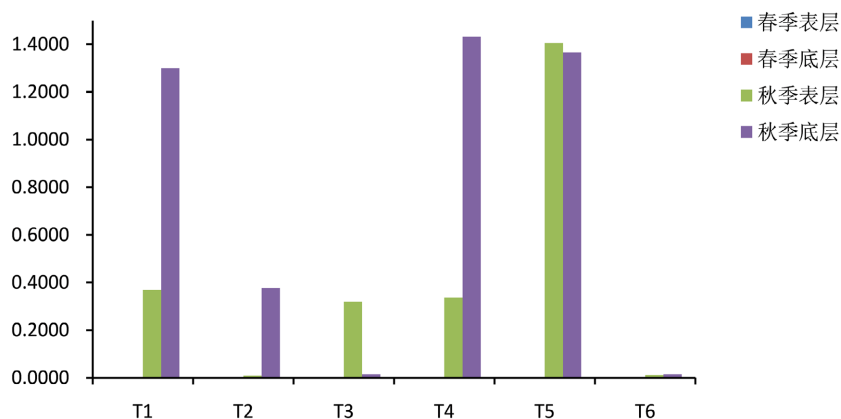


Figure 3. Change of Pb content in seawater ($\mu\text{g/L}$)
图 3. 海水中 Pb 含量变化($\mu\text{g/L}$)

Cd: 春季航次中, 表层海水 Cd 含量低于检出限, 底层海水 Cd 两个站位含量分别为 0.1087 $\mu\text{g/L}$ 、0.0987 $\mu\text{g/L}$, 其他站位含量低于检出限, 根据 GB17378.2-2007《海洋监测规范》, 计算得底层海水平均含量为 0.0362 $\mu\text{g/L}$ 。秋季航次中表层海水含量范围为 0.0494~0.2847 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.1024 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.0464~0.2589 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.1005 $\mu\text{g/L}$ 。春秋两季航次中, 表层海水、底层海水均符合国家一类海水水质标准。由图 4 知, 春季底层中, 站位 5 海水中 Cd 含量最高, 秋季航次中站位 1 表层、底层海水中 Cd 含量最高。

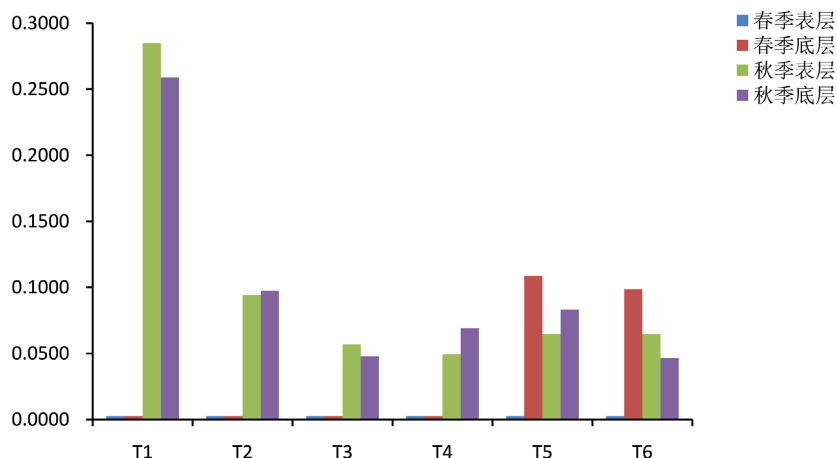


Figure 4. Change of Cd content in seawater ($\mu\text{g/L}$)

图 4. 海水中 Cd 含量变化($\mu\text{g/L}$)

Cr: 春季航次中, 表层海水含量范围为 ND~5.7832 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 2.5216 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 ND~0.7837 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.6362 $\mu\text{g/L}$ 。秋季航次中表层海水含量范围为 0.0494~2.7886 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 1.1063 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.1393~1.3609 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.5997 $\mu\text{g/L}$ 。春秋两季航次中, 表层海水、底层海水均符合国家一类海水水质标准。由图 5 知, 春季站点 4 的表层海水、底层海水含量都是最高, 秋季表层海水站点 2 最高, 底层海水站点 4 含量最高。

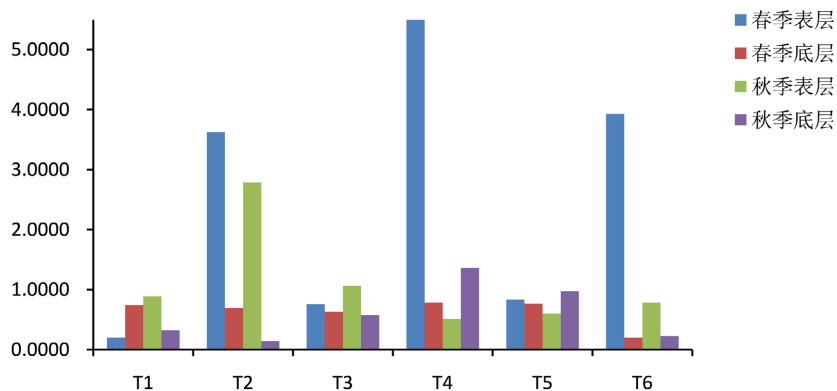


Figure 5. Change of Cr content in seawater ($\mu\text{g/L}$)

图 5. 海水中 Cr 含量变化($\mu\text{g/L}$)

Hg: 春季航次中, 表层海水含量范围为 0.0032~0.0091 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.0065 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.0044~0.0082 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.0065 $\mu\text{g/L}$ 。秋季航次中表层海水含量范围为 0.0621~0.0905 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.0723 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.0621~0.0807 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.0692 $\mu\text{g/L}$ 。春季航次中, 表层海水、底层海水均符合国家一类海水水质标准, 而秋季航次中, 表层海水、底层海水均符合国家二类海水水质标准。由图 6 知, 春季表层海水站点 2 最高, 底层海水站点 1 含量最高, 秋季站点 1 的表层海水、底层海水含量都是最高。

As: 测定时, 春季站点点 5 表层海水出现异常值, 故对数据进行剔除。依据结果可知, 表层海水含量范围为 0.5533~0.8417 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.6909 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.5341~1.2121 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.7303 $\mu\text{g/L}$ 。秋季航次中表层海水含量范围为 0.4894~0.6115 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.5447 $\mu\text{g/L}$; 底层含量范围为 0.4256~1.6374 $\mu\text{g/L}$, 平均含量为 0.6832 $\mu\text{g/L}$ 。春秋两季航次中, 表层海水、底层海水均符合国

家一类海水水质标准。由图 7 知, 春季表层海水站位 2、底层海水站位 3 含量最高, 秋季站表层站位 3、底层站位 5 含量最高。

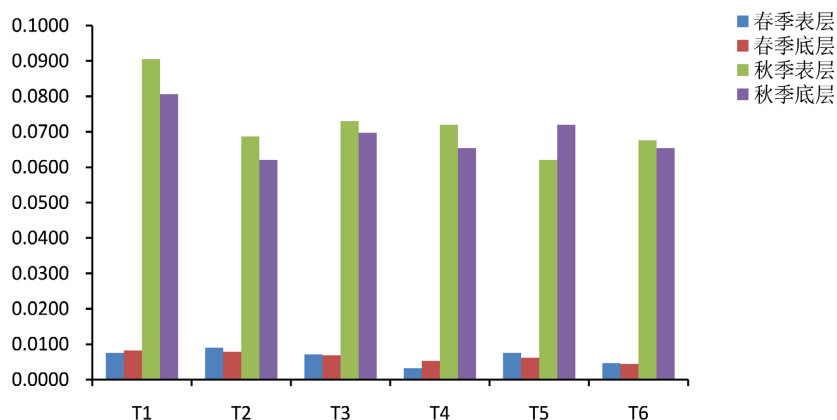


Figure 6. Change of Hg content in seawater ($\mu\text{g/L}$)

图 6. 海水中 Hg 含量变化($\mu\text{g/L}$)

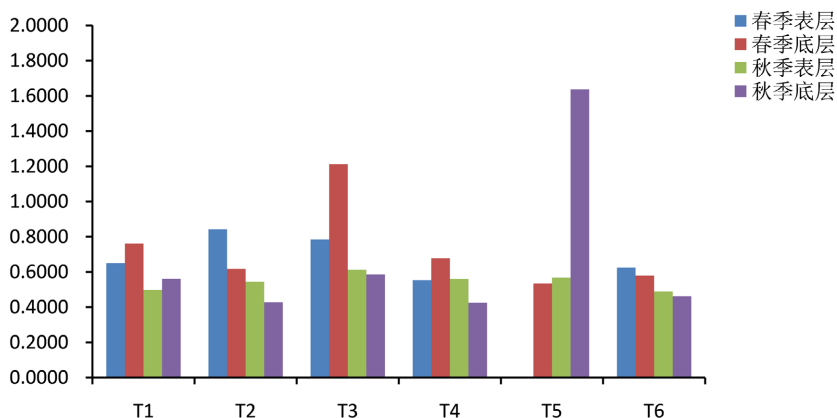


Figure 7. Change of As content in seawater ($\mu\text{g/L}$)

图 7. 海水中 As 含量变化($\mu\text{g/L}$)

3.2. 污染评价

3.2.1. 单项指标评价

采样点海水中各重金属污染指数的计算结果见表 4。各项重金属的单项污染指标均小于 1, 说明该海域表层及底层海水均符合国家二类海水水质标准的要求。2022 年春季表层海水各重金属污染程度由高到低的排序为 $\text{Cu} > \text{As} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cd}$, 底层海水各重金属污染程度由高到低的排序为 $\text{Cu} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Pb}$, 2022 年秋季表层海水由高到低的排序为 $\text{Cu} > \text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cd} > \text{As} > \text{Cr}$, 底层海水各重金属污染程度由高到低的排序为 $\text{Hg} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Cr}$ 。

3.2.2. 春秋两季算术均值型多因子指数评价

根据 2022 年两个航次的调查, 采用算术均值型多因子指数评价法, 进行数据分析, 两季度的算术均值型多因子指数变化见图 8。从表 5 可知, 2022 年春秋两季所调查站点点水质优良, 处于清洁级。其中 2022 年的春季表层海水中重金属算术均值型多因子指数变化范围在 0.0005-0.6761 $\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 0.1594 $\mu\text{g/L}$, 最大值出现在站位 5; 底层海水中重金属算术均值型多因子指数变化范围在 0.0064-0.3847

$\mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 $0.0910 \mu\text{g/L}$, 最大值出现在站位 5。2022 年的秋季表层海水中重金属算术均值型多因子指数变化范围在 $0.0111\sim 0.3615 \mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 $0.1243 \mu\text{g/L}$, 最大值出现在站位 5; 底层海水中重金属算术均值型多因子指数变化范围在 $0.0060\sim 0.3461 \mu\text{g/L}$ 之间, 平均值为 $0.1148 \mu\text{g/L}$, 最大值出现在站位 5。表层海水秋季算术均值型多因子指数平均值($0.1243 \mu\text{g/L}$)略小于春季($0.1594 \mu\text{g/L}$)平均值, 底层海水秋季算术均值型多因子指数平均值($0.1148 \mu\text{g/L}$)略大于春季($0.0910 \mu\text{g/L}$)平均值。

春秋两季海水中 6 种重金属的含量表现不同, 是由于海水受到水文动力与天气的影响, 底层相较于表层元素交换活跃, 会导致重金属的分布存在不同步的现象[16]。

Table 4. Pollution index values of each heavy metal/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

表 4. 各重金属的污染指数值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目		2022 年 5 月		2022 年 9 月	
		范围	均值	范围	均值
Cu	S	0.2461~0.9491	0.9761	0.0661~0.4105	0.2528
	B	0.0127~0.7579	0.3847	0.0529~0.1925	0.1435
Pb	S	ND	ND	0.0017~0.2810	0.0816
	B	ND	ND	0.0030~0.2863	0.1501
Cd	S	ND	ND	0.0099~0.0569	0.0205
	B	ND~0.0217	0.0072	0.0093~0.0518	0.0201
Cr	S	ND~0.0578	0.0252	0.0051~0.0279	0.0111
	B	0.0020~0.0078	0.0064	0.0014~0.0136	0.0060
Hg	S	0.0158~0.0453	0.0325	0.3107~0.4524	0.3615
	B	0.0221~0.0410	0.0324	0.3107~0.4033	0.3461
As	S	0.0184~0.2601	0.0625	0.0163~0.0204	0.0182
	B	0.0178~0.0404	0.0243	0.0142~0.0546	0.0228
算术均值多因子指数值	S	0.0005~0.6761	0.1594	0.0111~0.3615	0.1243
	B	0.0064~0.3847	0.0910	0.0060~0.3461	0.1148

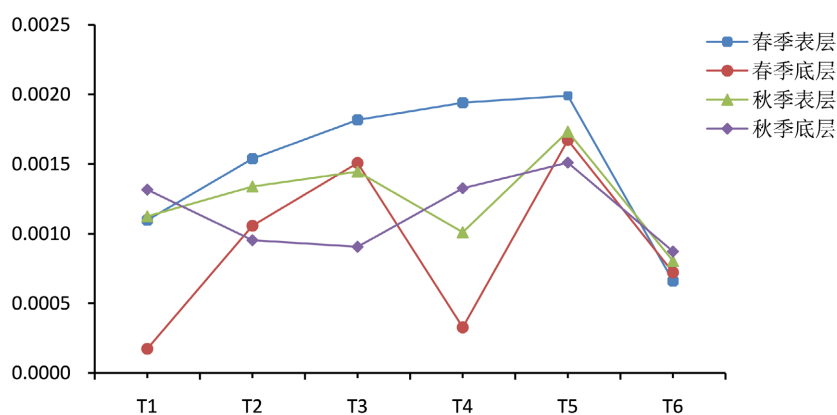


Figure 8. Comprehensive pollution index changes in the spring and autumn of 2022

图 8. 2022 年春、秋两季的算术均值型多因子指数变化

Table 5. Combined pollution index values for Spring and Autumn 2022/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$
表 5. 2022 年春、秋两季的算术均值型多因子指数值/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$

项目	T1	T2	T3	T4	T5	T6
春季表层	0.1097	0.1538	0.1817	0.1940	0.1991	0.0660
春季底层	0.0174	0.1057	0.1508	0.0328	0.1672	0.0722
夏季表层	0.1125	0.1339	0.1446	0.1010	0.1733	0.0803
夏季底层	0.1316	0.0954	0.0906	0.1327	0.1511	0.0873

3.3. 风险熵法评价

调查海域位于考洲洋入海口，为小漠工业与城镇用海区，受到重金属污染的可能性大，对考洲洋海水的生态安全威胁性强，因此进行生态风险评价十分必要，本文采用风险熵法。

对调查海域进行数据分析，得到 6 种重金属对海洋生物的风险熵如表 6。对 RQ 均值进行分析，由图 9 分析得，春季表层海水中 6 种重金属元素的风险熵(RQ)由高到低的排序为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb}$ ，底层海水 6 种重金属元素的风险熵(RQ)由高到低的排序为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Hg} > \text{Pb}$ ，2022 年秋季表层海水 6 种重金属元素的风险熵(RQ)由高到低的排序为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Pb}$ ，底层海水 6 种重金属元素的风险熵(RQ)由高到低的排序为 $\text{As} > \text{Cu} > \text{Cd} > \text{Hg} > \text{Cr} > \text{Pb}$ 。

总体上，Pb 的风险熵远小于 0.1，生态风险较低，这与研究一致，可能原因是重金属 Pb 对海洋生物毒性较低[15]。本次 SF 取保守值 5，但通过数据分析，As、Cu 具有明显的生态风险，需要引起关注。

Table 6. RQ index
表 6. RQ 指数

项目		2022 年 5 月		2022 年 9 月	
		范围	均值	范围	均值
Cu	S	3.5561~13.7149	9.7708	0.9546~5.9324	3.6532
	B	0.1835~10.9523	5.5598	0.7642~2.7821	2.0743
Pb	S	ND	ND	0.0002~0.0300	0.0087
	B	ND	ND	0.0003~0.0306	0.0160
Cd	S	0.0117	0.0117	0.2308~1.3304	0.4784
	B	0.4612~1.2500	0.9949	0.2168~1.2098	0.4695
Cr	S	0.0393~1.1371	0.4958	0.1007~0.5483	0.2175
	B	0.0393~0.1541	0.1251	0.0274~0.2676	0.1179
Hg	S	0.0056~0.0159	0.0115	0.1094~0.1593	0.1273
	B	0.0078~0.0144	0.0114	0.1094~0.1420	0.1219
As	S	5.5327~78.0321	18.7628	4.8944~6.1152	5.4469
	B	5.3406~12.1211	7.3025	4.2560~16.3744	6.8320

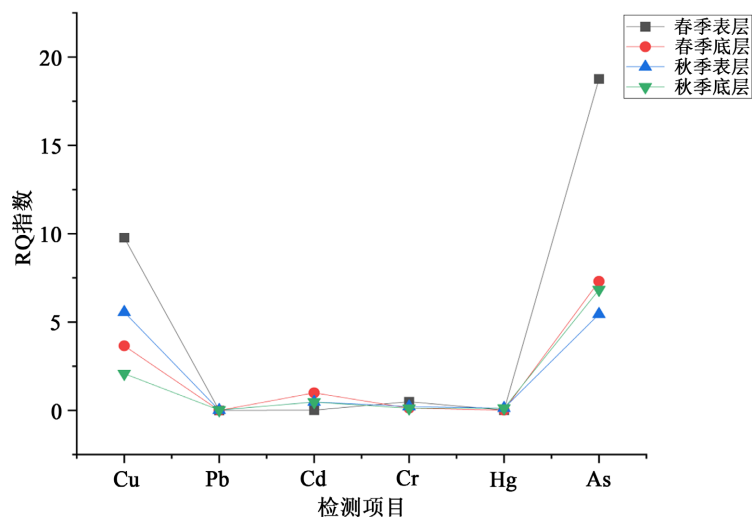


Figure 9. Changes in the mean RQ index in the spring and fall of 2022
图 9. 2022 年春、秋两季的 RQ 指数均值变化

3.4. 相关性分析

对春秋航次数据采用 Pearson 分析, 以期进一步了解海水重金属来源。由表 7 可知, 春季海水中, Cd 与 pH、盐度、Cu、Hg 呈极显著正相关, 说明 Cd 元素与海水的 pH、盐度有关, 盐度越高, 越有利于重金属 Cd 元素的溶解与扩散, 这与研究一致[13]; 同时, Cd 与 Hg、Cu 具有同源性; 观察表 7, Cr 和 As 呈极显著负相关, 说明两者来源不同。秋季航次海水中, Cd 与盐度呈显著正相关, 与春季结论一致; 由表 7 可知, Hg 与盐度呈显著负相关, 与 Cd 呈极显著正相关, 说明 Hg 与 Cd 的来源相同或相似。Cd 主要来源于船舶涂料及其燃料尾气, Hg 具有挥发性, 主要通过大气降沉进入海洋, 推测 Hg 可能随着燃料燃烧以飘尘方式进入水体环境。

Table 7. Correlation analysis

表 7. 相关性分析

指标	pH	盐度	DO	温度	Cu	Pb	Cd	Cr	Hg	As
pH		0.548	-0.067	-0.767**	0.350	ND	1.000**	0.188	-0.567	0.149
盐度	0.049		-0.413	-0.579*	0.693*	ND	1.000**	-0.360	0.094	0.282
DO	-0.014	0.290		-0.120	-0.300	ND	-1.000**	0.043	-0.540	0.053
温度	0.238	-0.012	0.091		-0.258	ND	-1.000**	0.323	0.392	-0.080
Cu	-0.242	0.276	0.144	-0.347		ND	1.000**	0.164	0.042	0.417
Pb	-0.455	0.081	-0.315	-0.487	0.000		ND	ND	ND	ND
Cd	0.263	0.650*	-0.496	-0.106	-0.460	0.213		ND	1.000**	-1.000**
Cr	0.133	0.009	-0.138	-0.250	0.499	-0.092	-0.058		-0.547	-0.218
Hg	0.317	-0.687*	-0.297	0.027	-0.514	-0.060	0.794**	0.082		0.253
As	-0.566	0.093	0.165	0.085	0.069	0.394	-0.074	0.073	-0.019	

注: 表格右上方为春季航次相关性, 左下方为秋季航次相关性; *表示在 0.05 水平上呈显著相关, **表示在 0.001 水平上呈极显著相关。

与杨小平等人[8]在 2019 年的研究相比, Hg (0.018 ug/L)春季航次平均含量下降, As (1.99 ug/L)总体含量下降。一方面, As 主要来源于工业废水[17] [18]。另一方面, Pb 主要来源于工业废水、大气沉降、船舶涂料及其燃料尾气[19], 而 Pb 在春季航次中未检出, 秋季航次检出量低, 说明近年来工业废水排放造成水体重金属污染减少, 大力降污减碳措施效果良好。

4. 结论

1) 该海域表层及底层海水中 Cu、Pb、Cr、Cd、Hg、As 等 6 种元素均值均符合国家二类海水水质标准的要求。算术均值型多因子指数显示, 该海域海水污染级别为清洁。春秋两季站位 5 海水中 Cu、Pb 含量均最高, 未来需对站位 5 加强监测。

2) 风险熵法评价结果显示, Pb 的风险熵远小于 0.1, 生态风险较低; As、Cu 对海洋生物具有明显的生态风险, 需要引起关注。

3) Pearson 分析显示, 海水中 Cd 与 Hg、Cu 具有相同或相似的来源, 盐度显著作用于 Cd 元素分布。

参考文献

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 中国海洋生态环境状况公报[R]. 2022.
- [2] 王毅. 钦州近岸海域及其入海口重金属的分布、来源及污染风险评价[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [3] Budianta, W. (2021) Heavy Metal Pollution and Mobility of Sediment in Tajum River Caused by Artisanal Gold Mining in Banyumas, Central Java, Indonesia. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 8585-8593. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11157-5>
- [4] Liu, R., et al. (2021) Occurrence, Partition, and Risk of Seven Heavy Metals in Sediments, Seawater, and Organisms from the Eastern Sea Area of Shandong Peninsula, Yellow Sea, China. *Journal of Environmental Management*, **279**, Article ID: 111771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111771>
- [5] 杨玉峰, 梁浩亮, 范开文, 谢文琦, 陈冰玲, 肖思巧, 钟锦明. 春、夏季惠州市海水环境质量及其有机污染评价[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(12): 57-60. <https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfgy.2018.12.012>
- [6] 叶冠, 王军星, 梁浩亮, 陈冰玲, 钟志强. 春、秋季考洲洋海水质量状况及评价方法初探[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(5): 41-45. <https://doi.org/10.20016/j.cnki.hykyfgy.2020.05.009>
- [7] 史凯文. 南方典型近岸海域无机氮与金属来源分析与评价[D]: [硕士学位论文]. 厦门: 厦门大学, 2020. <https://doi.org/10.27424/d.cnki.gxmd.2020.003183>
- [8] 杨小平, 陈冰玲, 谢文琦, 梁婷婷, 肖思巧. 考洲洋入海口附近海域海水重金属含量分析[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 119-124.
- [9] 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.
- [10] 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+37.
- [11] 范开文, 梁浩亮, 杨玉峰, 等. 惠州海洋功能区重金属污染分析与评价[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(6): 121-125.
- [12] Vragović, N., Bažulić, D. and Njari, B. (2011) Risk Assessment of Streptomycin and Tetracycline Residues in Meat and Milk on Croatian Market. *Food and Chemical Toxicology*, **49**, 352-355. <https://doi.org/10.1016/j.fct.2010.11.006>
- [13] Wang, Z., Du, Y., Yang, C., et al. (2017) Occurrence and Ecological Hazard Assessment of Selected Antibiotics in the Surface Waters in and around Lake Honghu, China. *Science of the Total Environment*, **609**, 1423-1432. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.009>
- [14] 阎琨, 庞国涛, 邢新丽, 李伟, 杨源祯, 鲍宽乐. 广西企沙半岛近岸表层海水重金属分布、来源及生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2023, 42(1): 89-96. <https://doi.org/10.13634/j.cnki.mes.2023.01.011>
- [15] 杜建国, 赵佳懿, 陈彬, 等. 应用物种敏感性分布评估重金属对海洋生物的生态风险[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(4): 561-570.
- [16] 黄向青, 林进清, 张顺枝, 等. 广西钦州湾-北海水域海水重金属分布与评价[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(5): 729-735, 762.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 孙维萍, 潘建明, 吕海燕, 等. 2006 年夏冬季长江口、杭州湾及邻近海域表层海水溶解态重金属的平面分布特征[J]. 海洋学研究, 2009, 27(1): 37-43.