

杭州湾表层沉积物重金属污染现状及近期变化

李金铎*, 陈丹琴, 王 哲, 戴益鸿, 徐立峰, 杨耀芳

自然资源部宁波海洋环境监测中心站, 浙江 宁波

收稿日期: 2024年6月17日; 录用日期: 2024年7月18日; 发布日期: 2024年8月8日

摘 要

基于杭州湾海域表层沉积物测试资料, 揭示了重金属Cr、Cu、Zn、Pb、Hg、As、Cd的最新含量和分布特征现状, 采用多元统计方法分析了其影响因素和主要来源, 应用地质累积指数法和潜在生态风险指数法进行了污染状况和生态风险评价, 根据多期资料对比, 探讨了研究区重金属污染状况的近期变化。结果表明: 研究海域重金属含量总体上呈中部高东西两侧低的平面分布特征, Cr、Cu、Zn、Pb、Cd受控于沉积物类型和有机质分布, 以陆源输入为主, Hg、As主要来源于人为污染。地累积指数评价结果表明杭州湾海域总体处于清洁状态, 北岸近岸和南部局部海域站点Hg和Cd具有中等潜在生态风险。Cr、Cu、Zn、Pb和Cd含量平均值在2008至2023期间总体表现为先下降后保持稳定的变化趋势, 分别与沿岸地区工程建设、经济发展以及海域海洋开发活动和国家和地方加强污染治理、减少陆源排放有关。Hg和As在2008~2023年期间没有明显的变化趋势, 今后应加强对研究区Hg、As和Cd含量和分布及其变化趋势的监测。

关键词

表层沉积物, 重金属, 生态风险, 杭州湾

The Current Status and Recent Changes in Heavy Metals Pollution in Surface Sediments of Hangzhou Bay

Jinduo Li*, Danqin Chen, Zhe Wang, Yihong Dai, Lifeng Xu, Yaofang Yang

Ningbo Marine Environment Monitoring Center, Ministry of Natural Resources, Ningbo Zhejiang

Received: Jun. 17th, 2024; accepted: Jul. 18th, 2024; published: Aug. 8th, 2024

Abstract

Based on the testing data of surface sediments in Hangzhou Bay, this study reveals the latest con-

*通讯作者。

文章引用: 李金铎, 陈丹琴, 王哲, 戴益鸿, 徐立峰, 杨耀芳. 杭州湾表层沉积物重金属污染现状及近期变化[J]. 环境保护前沿, 2024, 14(4): 842-851. DOI: 10.12677/aep.2024.144112

tent and distribution characteristics of heavy metals such as Cr, Cu, Zn, Pb, Hg, As, and Cd. Multivariate statistical methods were used to analyze their influencing factors and main sources. Pollution status and ecological risk were assessed using the geo-accumulation index method and the potential ecological risk index method. By comparing multi-period data, the recent changes in heavy metal pollution in the study area were discussed. The results show that the overall distribution of heavy metals in the study area is high in the middle and low on both the east and west sides, controlled by sediment types and organic matter distribution, with terrestrial input being the primary source for Cr, Cu, Zn, Pb, and Cd, while Hg and As mainly come from anthropogenic pollution. The geo-accumulation index assessment indicates that the Hangzhou Bay area is generally in a clean state, but the north shore near the coast and some sites in the southern part of the bay have medium potential ecological risks for Hg and Cd. The average contents of Cr, Cu, Zn, Pb, and Cd showed a trend of first decreasing and then stabilizing from 2008 to 2023, which is related to coastal construction, economic development, maritime activities, and the enhanced pollution control efforts by national and local governments to reduce terrestrial discharges. No significant trend was observed for Hg and As during 2008~2023. Future efforts should focus on strengthening the monitoring of the content, distribution, and trends of Hg, As, and Cd in the study area.

Keywords

Surface Sediments, Heavy Metal, Ecological Risk, Hangzhou Bay

Copyright © 2024 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

近年来,沿海地区日益增长的工农业生产和人类活动造成近岸海域沉积物重金属污染[1][2],尤其是河口海湾区域,环境比较封闭,海陆相互作用强烈,易于造成重金属在海底沉积物中富集,并可能释放到水体中或者被海洋生物摄入而进入食物链,对海洋生态环境和人类的健康造成长期危害[3]-[6]。杭州湾现代沉积物主要来自长江入海带来的陆源碎屑[7],长江流域和杭州湾周边地区经济发达,海洋开发活动强烈,上世纪末以来沉积物中和贝类等生物体内部分出现重金属元素超标[8]-[10]。前人对于本区域重金属分布特征和潜在生态风险的研究已经取得了很多成果。杨耀芳等(2013)对 2010 年表层沉积物中重金属进行了分析评价,结果表明杭州湾海域沉积物处于低风险状态[5]。柴小平等(2015)利用 1996~2012 年的资料,对杭州湾及邻近海域表层沉积物中重金属的分布特征、来源和生态风险进行了探讨,指出陆源碎屑的搬运和重金属在不同介质间转换以及海水养殖活动控制和影响了重金属元素的组成和分布,研究区总体生态风险中等,Hg 和 Cd 是主要的生态风险因子,大部分重金属元素在 1996 到 2009 年期间呈上升趋势,在 2009 年之后略有下降[4]。姜文博等(2021)利用 2018 年的采样资料,对 7 种重金属进行了研究,结果表明 Pb 和 Zn 富集程度相对较高,杭州湾海域潜在生态风险等级较低[3]。但这些研究由于取样站点的差异,重金属的含量、分布特征和生态风险评价结果并不统一。而且,作为物源地的长江流域和杭州湾周边由于工程建设、生产和生活方式的变化、以及近年来周边污染防治和环保治理措施的实施,对研究海域沉积物中重金属含量和分布势必造成影响。本文根据 2023 年表层沉积物测试分析资料,采用数理统计法分析了近期该海域沉积物中重金属含量和分布特征、来源及影响因素,采用地累积指数法和潜在生态风险指数法进行污染状况和生态风险评价,并结合 2008 年和 2017 年资料,对其近年来的变化趋势进行了探讨,为杭州湾海域生态环境的研究和保护以及海域开发利用提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 样品测试和数据处理

2023 年和 2017 年表层沉积物样品来源于海洋生态环境监测项目(图 1), 2008 年资料来源于国家专项调查项目, 均为夏季采样, 选取 38 个相同位置的站点。静力取样器采样, 刮取表层 0~2 cm 的沉积物样品, 置于聚乙烯袋中密封存于 4℃ 的冷藏箱中带回实验室进行测试。样品的采集、贮存、运输、预处理按国家规范进行[11] [12]。

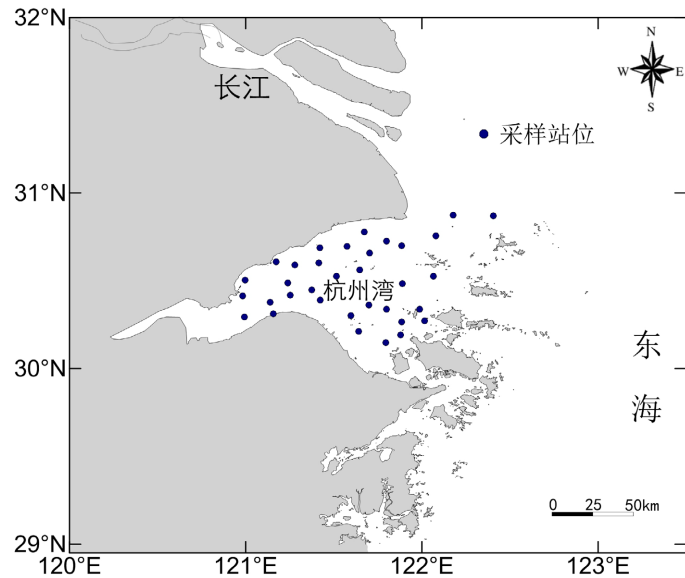


Figure 1. Map showing the sampling positions in the study area
图 1. 研究区域和采样站位图

取适量稀盐酸和双氧水去除沉积物样品中碳酸盐和有机质, 六偏磷酸钠溶液分散, 超声波振荡后使用 Microtrac S3500 型激光粒度仪进行粒度分析。取适量沉积物样品烘干后用玛瑙研钵磨成粉末, 使用 Axios PW4400 型 X 射线荧光光谱分析仪(XRF)进行常量元素 Al_2O_3 等的测定。沉积物样品用 HNO_3 和 HClO_4 消解体系处理后, 使用 X series II 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定重金属元素 Cu、Zn、Pb、Cd、Cr 含量, 使用 AFS 930 原子荧光光度计测定 As 和 Hg 含量。采用重铬酸钾氧化-还原容量法分析测定有机碳(TOC)含量。采用样品数 15%比例平行样和标准物质作质量控制, 测试结果准确可靠。

图件采用 Surfer11.0 和 Origin 2018 软件制作, 应用 SPSS19.0 软件进行相关性分析和因子分析。

2.2. 分析评价方法

重金属评价研究一般会将几种评价方法结合使用[4] [5]。根据 2023 年资料, 采用地累积指数法对研究区重金属污染程度进行评价[13], 采用潜在生态风险指数法评价海域生态环境[14]。

地累积指数(Index of geo-accumulation, I_{geo})公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[C_n / (1.5B_n) \right]$$

式中: C_n 是重金属 n 含量; B_n 为其地球化学背景值, 本文根据文献, 采用研究区及邻近海域沉积物重金属的背景值[4] [15] (表 1)。 I_{geo} 值与重金属污染水平的关系为 7 级[13]: 其中 I_{geo} 小于 0, 为清洁状态; 0~1 之间为轻度污染; 若 ≥ 3 则表示重度污染。

Table 1. Summary of heavy metals contents of the surface sediment in the study and adjacent areas and the criteria (μg/g)
表1. 研究区和邻近海域表层沉积物中重金属元素含量统计及国家标准(μg/g)

项目		含量(μg/g)							数据来源 及取样时间
		Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	As	Cd	
杭州湾	平均值	57.20	25.50	62.90	18.60	0.048	5.05	0.099	本研究(2023 年)
	最大值	78.81	37.00	95.10	34.00	0.056	8.01	0.200	
	最小值	21.10	7.50	26.00	7.60	0.031	3.67	0.050	
杭州湾	平均值	49.55	19.59	54.03	18.19	0.044	5.76	0.106	本研究(2017 年)
杭州湾	平均值	79.94	31.41	97.83	23.07	0.053	3.10	0.320	本研究(2008 年)
海洋沉积物一类标准		80	35	150	60	0.2	20	0.5	文献[19]
杭州湾	平均值	50.90	23.52	107.30	32.80	0.049	2.99	0.510	文献[5] (2010 年)
杭州湾及邻近海域	平均值	/	23.20	78.40	26.30	0.080	8.27	0.112	文献[4] (2012 年)
杭州湾	平均值	48.32	22.50	69.39	21.93	0.050	5.45	0.100	文献[3] (2018 年)
长江口海域	平均值	66.80	15.07	67.40	22.49	0.030	7.08	0.060	文献[17] (2006 年)
浙江中部近海	平均值	89.86	36.89	108.74	32.15	0.041	6.09	0.134	文献[18] (2017 年)
工业化前全球范围最大值		90	50	175	70	0.25	15	1	文献[14]
研究海域背景值		97.00	20.60	80.50	21.00	0.039	9.99	0.102	文献[4] [15]

采用 Hakanson (1980)的潜在生态危害指数法并根据本研究重金属种类数(7 种)对评价标准做了调整 [14]，其公式为：

$$C_d = \sum C_f^i = \sum C_{\text{实测}}^i / C_n^i$$
$$RI = \sum E_r^i = \sum T_r^i \times C_f^i$$

式中： C_f^i 定义为某一重金属的污染系数， $C_{\text{实测}}^i$ 为其实测含量， C_n^i 为其背景值。 C_d 是某取样站点多种重金属污染系数之和，代表该采样点沉积物重金属污染程度。 E_r^i 为某一重金属的潜在生态危害系数，代表该单一元素的污染程度， T_r^i 为重金属的毒性响应因子，通常以毒性系数代替[16]，本文采用 $Hg = 40$ ， $Cd = 30$ ， $As = 10$ ， $Cu = Pb = 5$ ， $Cr = 2$ ， $Zn = 1$ ； RI 定义为综合潜在生态危害指数，是某一采样站点沉积物中多个重金属污染物潜在生态危害系数的综合值。评价等级为： $E_r^i < 40$ 或 $RI < 105$ ，潜在生态风险低； $40 \leq E_r^i < 80$ 或 $105 \leq RI < 210$ ，潜在生态风险中等； $E_r^i \geq 80$ 或 $RI \geq 210$ ，潜在生风险高。

3. 结果与讨论

3.1. 重金属含量及分布特征

研究区 2023 年表层沉积物中重金属元素 Cr、Cu、Zn、Pb、Hg、As、Cd 平均含量分别为 57.20、25.50、62.90、18.60、0.048、5.05 和 0.099 μg/g (表 1)。总体上与北侧的长江口附近海域大致相当，低于南侧的浙江中南部海域[17] [18]。

仅有 2 个采样点的 Cu 超过国家的海洋沉积物质量标准(GB 18668-2002)的一类标准，其他绝大部分采样点的 Cu 和所有采样点的其他重金属含量均符合一类标准[19]，与前人的研究结论相一致[3]-[5]。

Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 含量总体表现为中部高而西部湾顶和东部外海低的分布特征(图 2)，尤其是在中部的杭州湾北岸附近海域形成高值区。Hg、As 的含量分布特征不明显，高值区和低值区呈相间分布，总体上研究区北部海域含量高于南部海域。

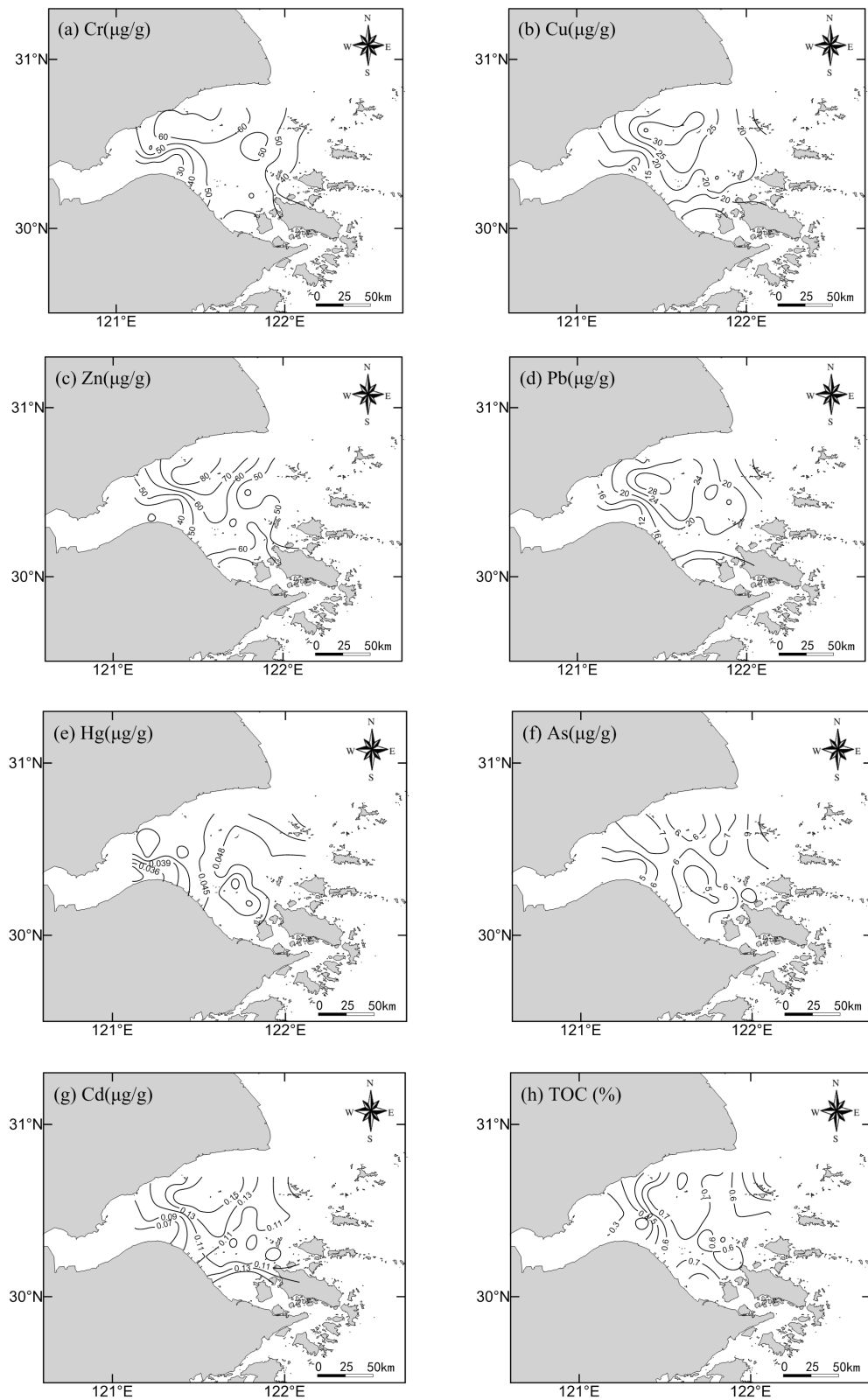


Figure 2. Distribution patterns of the heavy metals ($\mu\text{g/g}$) ((a)~(g)), and TOC content (%) (h) of the surface sediment in the study area

图 2. 研究海域表层沉积物重金属含量($\mu\text{g/g}$) ((a)~(g))和沉积物中 TOC 含量(%) (h)分布

对研究区表层沉积物 7 种重金属元素和 Al_2O_3 、TOC 以及平均粒径、粘土含量做 Pearson 相关性分析(表 2, $n = 38$)，结果表明，重金属含量与沉积物平均粒径存在负相关(表 2)，与粘土含量显著正相关，表明杭州湾表层沉积物中重金属主要富集在较细的粘土颗粒内，其分布主要受到沉积物类型的控制。而沉积物的类型和分布受控于物源和水动力条件[20]，杭州湾沉积物的主要来源长江入海陆源碎屑从研究区东北侧随偏向北岸的涨潮流进入湾内，随南部的落潮流移出，在中部湾口地区流速下降，重金属随细颗粒物落淤[20] [21]，形成中部尤其北岸附近海域重金属的高值区。柴小平等(2015)的研究也指出陆源碎屑的运移控制了杭州湾及邻近海域重金属的组成和分布[4]。研究区沉积物中重金属含量与 TOC 含量明显相关(表 2)，分布特征相似(图 2)，表明亦受到有机质分布的控制。Hg、As 的分布比较散乱，显示出受到其他环境因素的影响。前人的研究也指出，沉积物中 Hg、As 的含量与其物源变化没有明显的响应[22]，更多的受到局部区域理化条件、养殖排污等因素的影响[4]。

Table 2. Correlation analysis of heavy metals contents ($\mu\text{g/g}$), Al_2O_3 content (%), TOC content (%), mean grain-size (μm) and clay portions content (%) ($n = 38$) of the surface sediment in the study area

表2. 研究区表层沉积物中重金属含量($\mu\text{g/g}$)、 Al_2O_3 含量(%)、TOC含量(%)和平均粒径(μm)、粘土颗粒含量(%)的相关性统计($n = 38$)

	Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	As	Cd	Al_2O_3	TOC	平均粒径	粘土含量
Cr	1							0.842**	0.606**	-0.250	0.612**
Cu	0.816**	1						0.766**	0.863**	-0.593**	0.732**
Zn	0.839**	0.898**	1					0.874**	0.750**	-0.480**	0.638**
Pb	0.844**	0.970**	0.872**	1				0.840**	0.836**	-0.492**	0.743**
Hg	0.467**	0.573**	0.415**	0.588**	1			0.151	0.592**	-0.376*	0.675**
As	0.161	0.344*	0.223	0.325*	0.478**	1		0.172	0.380*	-0.183	0.223
Cd	0.761**	0.921**	0.865**	0.891**	0.460**	0.271	1	0.572**	0.786**	-0.484**	0.568**

**在 0.01 水平(双侧)上显著相关，*在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

3.2. 重金属来源分析

相关性分析结果表明：Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 之间相关性显著，同时，它们均与海洋沉积物中细颗粒陆源风化碎屑的主要指示物 Al_2O_3 呈高度正相关[23] (表 2)，表明它们共同源自陆源输入。Hg、As 之间以及它们与其他重金属元素、TOC 以及粘土粒级含量相关性稍差，尤其与 Al_2O_3 相关性更差，说明二者陆源输入较少。

采用主成份分析法(Principal Component Analysis, PCA)进一步揭示研究区重金属的来源和成因[24]。采用最大方差法进行因子旋转，将全部因子概括为 2 个主成分，累积总方差 82.34%，可以解释了绝大部分信息(表 3)。第一主成分的贡献率为 69.91%，Cr、Cu、Zn、Pb、Cd、 Al_2O_3 、TOC 和沉积物中的粘土颗粒含量均在第一主成分上均有相当高的正载荷(表 3)，与相关性分析中这些因子间存在显著相关性的结果相一致，可解释为上述重金属元素主要源自长江流域和杭州湾沿岸地区母岩风化产物输入海和生产生活排污，伴随细颗粒沉积物和其中的有机质搬运沉积于杭州湾表层沉积物中。前人的研究也指出长江口、杭州湾海域沉积物中大多数重金属共同来源于各种陆源碎屑、工农业废水和船舶运输污染等[4] [24]。第二主成分的贡献率为 12.43%，Hg 和 As 具有较高的正载荷，研究表明，Hg 和 As 主要来源于人为污染，如工业三废、农业生产中农药、化肥的残留以及人类生活污水的排放等[25] [26]。柴小平等(2015)研究表明重金属在不同介质间转换及海水养殖污染是研究区沉积物中 Hg 和 As 的重要来源[4]。根据以上分析，

认为杭州湾表层沉积物中的 Hg 和 As 主要受控于研究区沿岸污染物排放和人类用海活动的影响。另外, TOC 和粘土含量也在第二主成分中有相当的正载荷, 结合相关性分析结果, 说明沉积物中的细颗粒和有机质对重金属的成因分布和富集过程有全面的影响。细颗粒的粘土在潮流、波浪等作用下悬浮搬运, 携带重金属以及有机质在海底沉积物中运移沉积[6] [25] [26]。

Table 3. PCA factors information of heavy metals of the surface sediment in the study area
表3. 研究区表层沉积物重金属因子分析提取信息

因子	成份	
	1	2
Cr	0.886	0.087
Cu	0.927	0.313
Zn	0.934	0.116
Cd	0.903	0.186
Pb	0.922	0.308
Hg	0.402	0.757
As	0.041	0.872
Al ₂ O ₃	0.816	0.273
TOC	0.779	0.452
粘土含量	0.696	0.433

3.3. 污染程度和潜在生态风险评价

研究区 2023 年表层沉积物中重金属元素地累积指数评价结果表明杭州湾海域总体处于清洁状态(表 4), 仅在北岸附近海域 Cd 的含量比较高, 处于轻度污染状态。潜在生态风险评价结果表明, 研究区 Hg 和 Cd 具有中等潜在生态风险, 有 34 个采样点(占总采样点 89.4%)的 Hg 和 10 个采样点(占总采样点 26.3%)的 Cd 潜在生态风险系数 E_r^i 大于 40, 其余重金属元素的 E_r^i 均小于 40。

Table 4. Pollution and potential ecological risk assessment of the heavy metals of the surface sediment in the study area
表4. 研究区沉积物中重金属元素污染程度和生态风险评价

评价指标		Cr	Cu	Zn	Pb	Hg	As	Cd
I_{geo}	平均值	-1.63	-0.78	-1.23	-0.90	-0.44	-1.42	-0.62
	最大值	-0.88	0.26	-0.34	0.11	-0.06	-0.90	0.39
	最小值	-2.79	-2.04	-2.22	-2.05	-0.92	-2.03	-1.61
污染水平		清洁	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁	清洁 - 轻度污染
E_r^i	平均值	1.02	4.75	0.67	4.33	44.74	5.77	31.18
	最大值	1.62	8.98	1.18	8.10	57.44	8.02	58.82
	最小值	0.44	1.82	0.32	1.81	31.79	3.67	14.71
占比(%)		1.10	5.14	0.73	4.68	48.39	6.24	33.72
生态风险		低	低	低	低	中	低	低 - 中

11 个采样点的潜在生态风险指数 RI 大于 105, 占总数的 28.9%, 主要分布于北岸近岸和南部局部海域(图 3), 主要生态风险因子为 Hg 和 Cd , 二者分别贡献了风险指数 RI 的 48.39% 和 33.72%, 其余各点生态风险较低, 与前人的研究成果一致[3]-[5]。今后应加强研究区对 Hg 和 Cd 的监测。

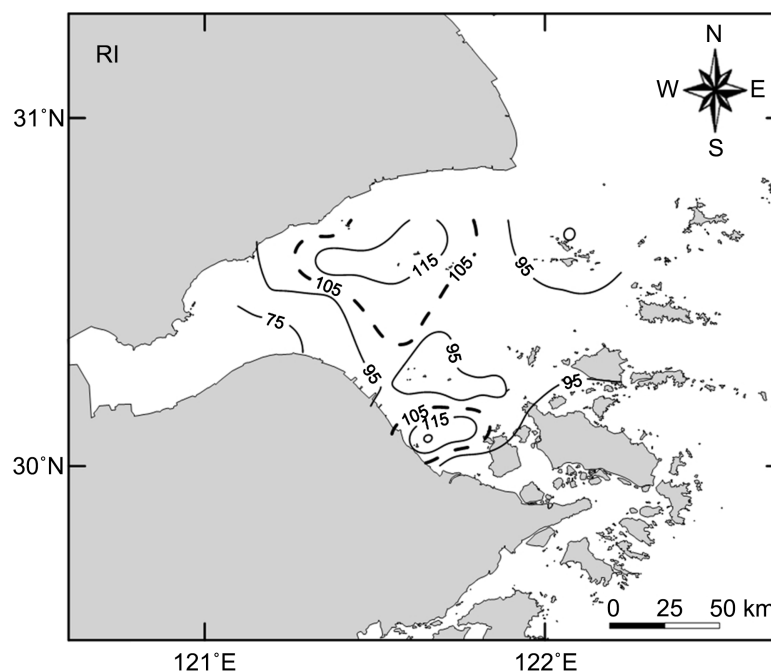


Figure 3. Distribution of potential ecologic risk assessment index (RI) of the surface sediment in the study area
图 3. 研究区表层沉积物潜在生态风险评价指数(RI)分布

3.4. 2008~2023 年的变化

研究区表层沉积物中 Cr 、 Cu 、 Zn 、 Pb 和 Cd 含量平均值在 2008 至 2023 期间总体表现为先下降后保持稳定的变化趋势, 2008~2010 年为相对高值段, 2017~2023 年为相对低值段, 而 Hg 和 As 含量在 2008~2023 年期间上下轻微波动, 没有明显的变化趋势(图 4)。柴小平等(2015)的研究表明, 1996~2012 年期间 Cu 、 Zn 和 As 含量在 2009 年前后分别表现为上升和下降趋势, 2009 年为相对高点, Cd 和 Hg 含量总体保持稳定。 Cr 、 Cu 、 Zn 、 Pb 和 Cd 在 2008~2010 年的高值可能的原因如下: 一是如前所述, Cr 、 Cu 、 Zn 、 Pb 和 Cd 主要来源于陆源输入, 流域内三峡工程等工程建设减少了入海泥沙通量[27], 单位体积悬浮泥沙吸附的重金属元素含量增加[28]; 二是本世纪初长江三角洲及杭州湾沿岸地区经济迅猛发展, 工农业、船舶和汽车以及生活污水排放快速增加; 三是本世纪以来, 海洋开发活动使杭州湾富营养化[2] [9], 有机质增多, 海域环境发生变化, 重金属富集于海底沉积物中[4]。2010 年之后的下降然后稳定的变化趋势可能主要与最近 10 年来国家和地方加强污染治理、减少陆源排放有关。如前所述, Hg 和 As 主要受控于研究区沿岸污染物排放和人类用海活动的影响, Hg 元素主要源于工农业三废及生活污水的排放等[25], As 主要源于农药残留[26], 杭州湾海域水动力作用强烈[7], 二者主要以悬浮态形式在不同介质及地域迁移[2] [6]。另外, 海水养殖等海洋开发活动也对 Hg 和 As 的分布和富集有重要影响[4]。研究区 Hg 和 As 含量在 2008~2023 年期间基本稳定的变化趋势一方面说明近年来杭州湾海域人为污染没有增加, 另一方面, 评价结果显示, 研究区部分站点表层沉积物中的 Hg 和 Cd 具有中等潜在生态风险, 因此, 今后尤其要加强对研究区 Hg 、 As 和 Cd 含量和分布及其变化趋势的研究。

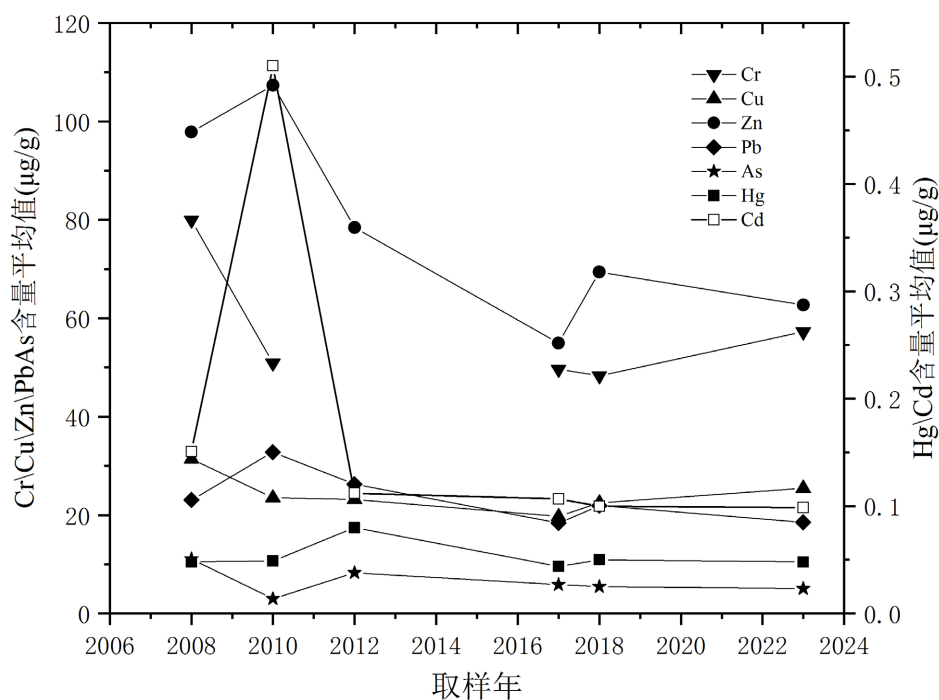


Figure 4. Temporal changes of heavy metals contents of the surface sediment in the study area from the year of 2008 to 2023 (2010, 2012 and 2018 data from literature [3]-[5], respectively)

图 4. 研究区表层沉积物重金属含量平均值 2008~2023 年变化(其中 2010、2012 和 2018 年数据分别来自文献[3]-[5])

4. 结论

1) 研究区 2023 年表层沉积物中重金属元素 Cr、Cu、Zn、Pb、Hg、As、Cd 平均含量分别为 57.20、25.50、62.90、18.60、0.048、5.05 和 0.099 µg/g。Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 含量总体表现为中部高而西部湾顶和东部外海低的分布特征,受细颗粒沉积物和有机质分布控制,Hg、As 的含量分布受到多种因素的影响。相关性和主成份分析表明 Cr、Cu、Zn、Pb、Cd 主要源自陆源输入,Hg 和 As 主要来源于人为污染。地累积指数评价结果表明杭州湾海域总体处于清洁状态,北岸近岸和南部局部海域站点 Hg 和 Cd 具有中等潜在生态风险。

2) 研究区表层沉积物中 Cr、Cu、Zn、Pb 和 Cd 含量平均值在 2008 至 2023 期间总体表现为先下降后保持稳定的变化趋势,与沿岸地区工程建设、经济发展以及海域海洋开发活动和最近 10 年来国家和地方加强污染治理、减少陆源排放有关。Hg 和 As 含量在 2008~2023 年期间上下轻微波动。今后要加强对研究区 Hg、As 和 Cd 含量和分布及其变化趋势的研究。本文采用了最新的数据较为全面地分析了最近 15 年间研究区主要重金属污染的状况,其未来的变化趋势有待进一步探讨。

参考文献

- [1] Xu, F., Hu, B., Yuan, S., Zhao, Y., Dou, Y., Jiang, Z., *et al.* (2018) Heavy Metals in Surface Sediments of the Continental Shelf of the South Yellow Sea and East China Sea: Sources, Distribution and Contamination. *CATENA*, **160**, 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.09.022>
- [2] Xu, H., Yang, H., Ge, Q., Jiang, Z., Wu, Y., Yu, Y., *et al.* (2020) Long-Term Study of Heavy Metal Pollution in the Northern Hangzhou Bay of China: Temporal and Spatial Distribution, Contamination Evaluation, and Potential Ecological Risk. *Environmental Science and Pollution Research*, **28**, 10718-10733. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11110-6>
- [3] 姜文博, 梁斌, 高范, 等. 杭州湾表层沉积物中重金属空间分布特征与污染状况评价[J]. 海洋环境科学, 2021,

- 40(4): 555-561.
- [4] 柴小平, 胡宝兰, 魏娜, 等. 杭州湾及其邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3906-3916.
- [5] 杨耀芳, 曹维, 朱志清, 等. 杭州湾海域表层沉积物重金属污染的累积及其潜在生态风险评价[J]. 海洋开发与管理, 2013, 30(1): 51-58.
- [6] 王珊珊, 潘存鸿, 李鸿, 等. 杭州湾泥沙中重金属元素的分布及影响因素[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4701-4709.
- [7] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第五分册[M]. 北京: 海洋出版社, 1992.
- [8] 贾海波, 邵君波, 曹柳燕. 杭州湾海域生态环境的变化及其发展趋势分析[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(3): 14-19, 25.
- [9] 浙江省海洋与渔业局. 2008-2017 年浙江省海洋环境公报[EB/OL]. http://sthjt.zj.gov.cn/art/2019/5/10/art_1201912_34050639.html, 2024-03-11.
- [10] 中华人民共和国生态环境部. 中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. <http://www.mee.gov.cn/hjzl/sthjzk/jagb/>, 2024-03-11.
- [11] 国家海洋局. GB17378-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [12] 国家海洋局. GB/T12763-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] Muller, G. (1969) Index of Geoaccumulation in Sediments of the Rhine River. *Geochemical Journal*, 2, 108-118.
- [14] 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)
- [15] 张志忠, 李双林, 董岩翔, 等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(3): 15-24.
- [16] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 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.
- [17] 密蓓蓓, 蓝先洪, 张志珣, 等. 长江口外海域沉积物重金属分布特征及其环境质量评价[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2013, 33(6): 47-54.
- [18] 李金铎, 贺智能, 虞理鹏, 等. 象山近海表层沉积物重金属分布特征和生态风险评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 93-101.
- [19] 国家海洋局. GB18668-2002 海洋沉积物质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [20] 王昕, 石学法, 王国庆, 等. 长江口及邻近海域现代沉积速率及其对长江入海泥沙去向的指示意义[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2013, 38(4): 763-775.
- [21] Jilan, S. and Kangshan, W. (1989) Changjiang River Plume and Suspended Sediment Transport in Hangzhou Bay. *Continental Shelf Research*, 9, 93-111. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(89\)90085-x](https://doi.org/10.1016/0278-4343(89)90085-x)
- [22] 张振, 刘健, 陈彬, 等. 浙江近岸泥质区近 140 年来重金属元素沉积记录及其对长江流域人类活动的响应[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2016, 36(3): 23-33.
- [23] 盛菊江, 范德江, 杨东方, 等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2405-2412.
- [24] 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. 环境科学, 2006, 27(1): 137-141.
- [25] 毕春娟, 陈振楼, 沈军, 等. 再悬浮作用下长江河口沉积物中 Hg 的迁移与释放[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3256-3261.
- [26] 柳青青, 杨忠芳, 周国华, 等. 中国东部主要入海河流 As 元素分布、来源及影响因素分析[J]. 现代地质, 2012, 26(1): 114-124.
- [27] 黄光远. 长江口及其邻近海域悬沙浓度对流域水库修建和台风的响应及其环境效应[D]: [博士学位论文]. 上海: 华东师范大学, 2022.
- [28] 李磊, 平仙隐, 王云龙, 等. 长江口及邻近海域沉积物中重金属研究——时空分布及污染分析[J]. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2245-2252.