

浙江近岸海域表层沉积物重金属分布特征与生态风险评价

鲁斐耀¹, 苏杨¹, 刘健², 桂峰¹, 梁娟^{1*}

(1. 浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 浙江 舟山 316022;

2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071)

摘要:通过对浙江近岸海域477个表层沉积物样品粒度,以及样品中6种元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd和As)和总有机碳(TOC)的分析,探讨重金属的空间分布特征及其生态风险。结果表明,研究区表层沉积物中重金属元素含量的空间分布较为相似,总体上表现为近岸高、远岸低;6种元素具有相似来源,与沉积物平均粒径和TOC均呈正相关性,且细颗粒泥质沉积物和TOC分别是导致其富集累积的主要和次要影响因素;6种元素的地累积指数较低,重金属污染总体上处于轻度水平;6种元素潜在生态风险系数由大到小依次为Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn,总体上潜在生态风险程度轻微;地累积指数和综合潜在生态风险指数均表现为向岸海域的重金属污染程度远大于离岸海域。

关键词:重金属;分布特征;生态风险评价;相关性分析;表层沉积物;浙江近岸海域

中图分类号:X55; X820.4 文献标志码:B 文章编号:1006-2009(2024)06-0042-06

Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments from Zhejiang Offshore

LU Feiyao¹, SU Yang¹, LIU Jian², GUI Feng¹, LIANG Juan^{1*}

(1. *Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan, Zhejiang 316022, China*;

2. *Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China*)

Abstract: This study explored the spatial distribution characteristics and ecological risk of heavy metals by analyzing the grain size of 477 surface sediment samples and the contents of six elements (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As) and total organic carbon (TOC) in these samples from Zhejiang offshore. The results showed that the spatial distribution of heavy metals in surface sediments from the study area was similar, with high content near shore and low content far shore. The six elements had similar sources and were positively correlated with the mean grain size and TOC. Fine grained muddy sediments and TOC were the primary and secondary influencing factors leading to enrichment and accumulation, respectively. The geoaccumulation index of the six elements was relatively low, and heavy metal pollution was generally at a mild level. The potential ecological risk coefficients of the six elements were Cd, As, Pb, Cu, Cr, Zn in descending order, and their potential ecological risks were slight. Both geoaccumulation index and comprehensive potential ecological risk index showed that heavy metal pollution in onshore area was much heavier than that in offshore waters.

Key words: Heavy metals; Distribution characteristic; Ecological risk assessment; Correlation analysis; Surface sediments; Zhejiang offshore area

近岸海域是海陆相互作用的过渡地带,是承载海、陆两大生态系统物质和能量循环、交换的重要环境界面,也是主要的纳污区和污染物质的扩散通道^[1-2]。随着人类开发利用活动的加剧,污染物质源源不断地被排放入海。进入海洋的重金属,一部

收稿日期:2023-10-10;修订日期:2024-10-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52109092);长江三角洲海岸带综合地质调查与监测基金资助项目(No. GZH201200506);国家级大学生创新创业训练基金资助项目(No. 202110340034)

作者简介:鲁斐耀(2001—),男,安徽六安人,本科,研究方向为海洋环境化学。

*通信作者:梁娟 E-mail: Liangjuan@zjou.edu.cn

分进入水体和被吸附至悬浮泥沙颗粒上，并伴随着海流被输送至其他海域，而另一部分则会沉降至海洋底质沉积物中^[3]。当水体物化性质和沉积环境发生改变时，累积在底质中的重金属可再次被释放至水环境中，对海洋环境造成二次污染，底质沉积物对重金属产生“源-汇”效应^[4-5]。海洋沉积物作为一种监测重金属的敏感指示物，可以较为稳定地表征区域海洋环境质量状况和趋势。因此，重金属在海洋沉积物中的含量特征和生态效应是评价海洋环境污染的重要指标。现有评价沉积物重金属环境风险的方法主要有富集因子法^[6]、地累积指数法^[7]、潜在生态危害指数法^[8]、污染负荷指数法^[9]、内梅罗指数法^[10]等。这些评价方法各具特色，均存在优势和局限性，只有将多种方法综合运用，才能较全面地掌握沉积物状况。

浙江近岸海域地处东海浅海大陆架，北临长江河口，南接闽江河口，分布众多海湾和港口。因其地理位置特殊，大量污染物质随长江、钱塘江、甬江、椒江等径流不断被输送入海，农业化肥的大量使用和沿海城市工业、生活污水的排放使得重金属易沉积于近岸海域，对生态环境产生风险^[11-14]。近年来，一些学者在浙江海岸带、浙南近海、温州近岸、杭州湾等海域开展了重金属研究，分析重金属含量分布及开展生态风险评价^[15-19]。浙江近岸海域主要为泥质沉积区，沉积速率高且沉积环境相对稳定，能够很好地反映重金属污染物的迁移累积效应。今以浙江近岸海域为研究区，测定表层沉积物样品中6种元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd和As)含量，结合沉积环境条件，分析其分布特征及影响因素，并评估重金属污染程度和生态风险，为近岸海洋重金属污染防治和近海生态环境安全维护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

根据浙江近岸海域地理位置、地质地貌特征及水动力环境，于2013年7月在研究区均匀网格布设477个采样点(见图1)。采用箱式取样器采集表层0 cm~20 cm的沉积物约1 kg装入聚乙烯袋中，密封、编号后运至实验室。

1.2 样品分析

1.2.1 沉积物粒度分析

取表层沉积物样品10 g~20 g，经H₂O₂溶液

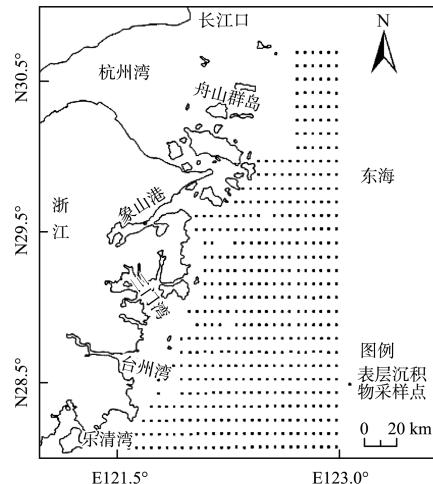


图1 研究区表层沉积物采样点分布

Fig. 1 Distribution of surface sediment sampling sites in the study area

和HCl溶液浸泡处理，去除有机质、碳酸盐和盐分。随后将其用(NaPO₃)₆溶液处理，通过超声波分散。用英国马尔文公司的Mastersizer-2000型激光粒度分析仪进行粒度分析。粒度测量范围为0.02 μm~2 000 μm，粒级分辨率为5 μm，重复测量的相对误差<2%。表层沉积物的平均粒径(M_z)采用统计矩法计算^[20]。

1.2.2 元素分析

将表层沉积物样品去除杂质后，取10 g恒温(<60 °C)烘干，研磨至250目以下。采用X射线荧光光谱法(XRF)测定样品中元素Cu、Pb和Zn的含量，采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定元素Cr、Cd的含量，采用原子荧光光谱法(AFS)测定元素As的含量。使用近海沉积物标准样品GBW07314作内控样进行质量控制，回收率均在90%~110%范围内，平行样的标准偏差均<10%。

1.2.3 总有机碳(TOC)分析

将表层沉积物样品冷冻干燥、粉碎，过100目筛，并加入1 mol/L的HCl溶液，去除无机碳，冷冻干燥至恒重，采用德国Elementar vario EL III型元素分析仪测定沉积物中TOC含量。所有测试分析均在青岛海洋地质研究所实验检测中心完成。

1.3 沉积物中重金属评价方法

1.3.1 地累积指数法

地累积指数(I_{geo})法考虑了自然成岩作用对背景值的影响及人为因素对重金属污染的影响，比较

适用于现代沉积物重金属污染的评价^[7]。其计算公式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (k \times B_i)] \quad (1)$$

式中: C_i 为元素 i 的测定值, mg/kg; k 为背景值的变动系数,一般取值 1.5; B_i 为元素地球化学背景值,根据最新上陆壳元素丰度值^[21], Cu、Pb、Zn、Cd、Cr 和 As 的背景值分别为 27 mg/kg、17 mg/kg、75 mg/kg、0.078 mg/kg、73 mg/kg 和 5.7 mg/kg。一般可将重金属污染程度划分为 7 个等级,即当 $I_{\text{geo}} < 0$ 、 $0 \leq I_{\text{geo}} < 1$ 、 $1 \leq I_{\text{geo}} < 2$ 、 $2 \leq I_{\text{geo}} < 3$ 、 $3 \leq I_{\text{geo}} < 4$ 、 $4 \leq I_{\text{geo}} < 5$ 、 $I_{\text{geo}} \geq 5$ 时,重金属污染程度分别为无、轻度、偏中度、中度、偏重度、重度、严重污染。

1.3.2 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数(RI)^[8]法从重金属含量、环境背景含量及生物毒性等方面综合反映沉积物重金属对生态环境的影响,在实践中取得了很好的效果^[22-24]。其计算公式为:

$$C_f^i = C_i / C_n^i \quad (2)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (3)$$

$$\text{RI} = \sum_{i=1}^n E_r^i \quad (4)$$

式中: n 为元素种类数; C_n^i 为元素 i 的背景值, mg/kg; C_f^i 为元素 i 的污染系数; T_r^i 为元素 i 的毒性系数,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd 和 As 分别取 5、5、1、2、30 和 10^[25]; E_r^i 为单项潜在生态风险系数,当 $E_r^i < 40$ 、 $40 \leq E_r^i < 80$ 、 $80 \leq E_r^i < 160$ 、 $160 \leq E_r^i < 320$ 时,单因子生态风险程度分别为轻微、中等、强、很强; RI 为多种元素的综合潜在生态风险指数,当 $\text{RI} < 150$ 、 $150 \leq \text{RI} < 300$ 、 $300 \leq \text{RI} < 600$ 、 $\text{RI} \geq 600$ 时,综合潜在生态风险分别为轻微、中等、强、很强。

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物重金属含量及空间分布特征

研究区表层沉积物中元素 Pb 的测定值为 17.90 mg/kg ~ 56.50 mg/kg, 平均值为 31.86 mg/kg; Zn 的测定值为 58.60 mg/kg ~ 148.00 mg/kg, 平均值为 112.82 mg/kg; Cd 的测定值为 0.03 mg/kg ~ 0.16 mg/kg, 平均值为 0.09 mg/kg; As 的测定值为 1.39 mg/kg ~ 17.20 mg/kg, 平均值为 10.24 mg/kg。Pb、Zn、Cd、As 的测定值均低于《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)第一类标准限值。Cu 的测定值为 11.40 mg/kg ~ 49.30 mg/kg, 平均值为 32.59 mg/kg; Cr 的测定值为 49.90 mg/kg ~ 99.50 mg/kg, 平均值为

85.05 mg/kg。在 477 个采样点中, 255 个采样点 Cu 的测定值、120 个采样点 Cr 的测定值均低于第一类标准限值, 占比分别为 53.46%、25.16%, 其余采样点 Cu、Cr 的测定值均低于第二类标准限值。

研究区表层沉积物中 6 种元素含量分布特征分别见图 2(a)~(f)。由图 2 可见, Cu、Cd 和 As 含量在靠岸侧最高, 而远离海岸则逐渐减小; Pb、Zn、Cr 含量在近岸中心海域较高, 向东西两侧逐渐减小。6 种元素含量自西向东递减, 总体上呈现出近岸海域高、远岸海域低的趋势。元素含量高值区主要分布在沿岸区域, 在象山港—乐清湾海域出现最高值; 而含量低值区则主要分布在 E122.5° 以东海域。该空间分布格局是由于水沙携带的重金属污染物受到南下的浙闽沿岸流、北上的台湾暖流及东海陆架向岸的涨潮流的综合作用而形成^[26-27]。

2.2 相关性分析

2.2.1 元素之间的相关性分析

研究区表层沉积物中 6 种元素的相关性分析结果见表 1。元素之间的相关系数为 0.445 ~ 0.945, 除 Pb 和 As 之间的相关性不明显外, 其他元素两两之间均呈较强的正相关关系。其中, 元素 Zn-Pb、Zn-Cr 的相关系数均 > 0.920, 为高度正相关。上述结果表明研究区 6 种元素具有相似的物质来源、分布特征和迁移变化规律。

2.2.2 元素与 M_z 的相关性分析

6 种元素与 M_z 的相关系数在 0.639 ~ 0.945 范围内, 均具有显著的正相关关系(见表 1)。其中, Cr 与 M_z 的相关系数高达 0.945, 表明元素含量随粒度变细而升高, 与元素粒度控制律相符合^[11]。海域的细颗粒泥质沉积区是重金属的高含量分布区。研究区大部分细粒沉积物主要来自长江, 在浙闽沿岸流的搬运下向南运移, 遇到北上的台湾暖流的阻挡, 以较高的沉积速率在近岸海域沉积, 形成著名的东海内陆架泥质沉积区。此泥质沉积区是东海末次冰消期以来高海平面时期的沉积中心^[2]。然而, 随着离岸距离的增大, 细颗粒组分逐渐减小, 粗颗粒组分逐渐增加, 元素含量也逐渐降低, 这是受东海外陆架残留砂的影响^[28]。

2.2.3 元素与 TOC 的相关性分析

6 种元素与 TOC 的相关性分析结果见表 1。元素 Zn、Cr 与 TOC 的相关系数较大, 分别为 0.637、0.677, 呈现较强的正相关性, 表明 TOC 的地球化学循环过程对 Zn、Cr 的迁移、转化具有重要

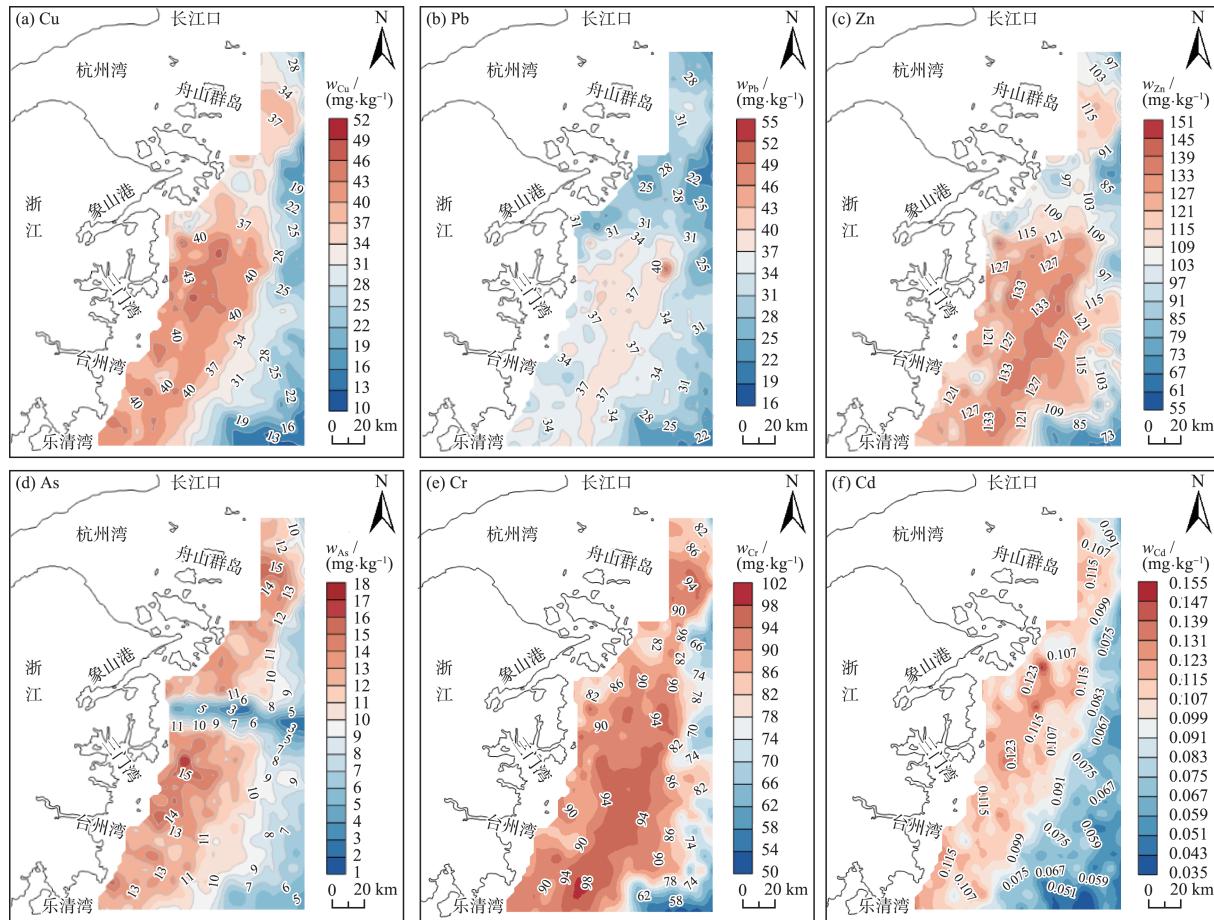


图2 研究区表层沉积物中6种元素含量的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of 6 elements in surface sediments from the study area

表1 表层沉积物中6种元素与M_z、TOC的相关性分析^①Table 1 Correlation analysis of the 6 elements with M_z and TOC in the surface sediments^①

因子	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	M _z	TOC
Cu	1.000							
Pb	0.820 **	1.000						
Zn	0.838 **	0.945 **	1.000					
Cr	0.889 **	0.844 **	0.926 **	1.000				
Cd	0.857 **	0.534 **	0.551 **	0.704 **	1.000			
As	0.688 **	0.445 **	0.505 **	0.638 **	0.679 **	1.000		
M _z	0.843 **	0.781 **	0.873 **	0.945 **	0.671 **	0.639 **	1.000	
TOC	0.371 **	0.525 **	0.637 **	0.677 **	0.159 **	0.312 **	0.667 **	1.000

① ** 表示在 0.01 水平(双侧上)显著相关。

影响。Pb 与 TOC 表现为中度正相关, Cu、Cd、As 与 TOC 的相关系数均 < 0.4, 为弱正相关, 可能与元素的人为输入及其本身赋存状态有关。上述结果说明有机质是影响研究区沉积物中重金属含量分布的重要因素。此外, TOC 与 M_z 之间呈现出显著的正相关性, 在细粒沉积物占比超过 80% 的区

域, TOC 值超过 0.5%。

2.3 表层沉积物重金属生态风险评价

2.3.1 重金属污染程度分析

研究区表层沉积物中 6 种元素的污染累积程度见图 3(a)。由图 3(a)可见, 6 种元素的 I_{geo} 平均值由高到低依次为 Pb (0.30)、As (0.17)、Zn

(-0.02)、Cu (-0.37)、Cr (-0.38) 和 Cd (-0.42)。Pb、Zn 和 Cr 的箱型框体较短, 表明元素含量高度相似, I_{geo} 值分布范围较窄; Cu、Cd 和 As 的箱型框体较长, 表明元素含量存在显著差异, 且 I_{geo} 值分布较广。元素 Cr 的 I_{geo} 值全部 < 0, 无污染累积现象; Cu、Cd 分布情况相似, 超过 80% 的样品 I_{geo} 值 < 0, 其余样品 I_{geo} 值在 0 ~ 1 范围内, 处于无污染与轻度污染之间; Pb、As 和 Zn 的 I_{geo} 值在 0 ~ 1 范围内的样品占比分别为 85%、69% 和 56%, 为轻度污染, 未发现研究区重金属 I_{geo} 值 > 2 的样品。总体而言, 近岸向岸海域的污染程度明显高于远岸海域, 与重金属物源及研究区沉积环境有关。

2.3.2 重金属潜在生态风险评价

研究区表层沉积物中 6 种元素的单项潜在生态风险见图 3(b)。由图 3(b) 可见, 6 种元素的 E_r^i 平均值在 1.50 ~ 35.13 范围内, 均 < 40。Cd 和 As 的箱型框体较长, 表明 E_r^i 值变化范围较大。Pb、Cu、Cr 和 Zn 的箱型框体较短, 表明 E_r^i 值变化较小。其中, Cd 的 E_r^i 最大值 > 40, 为 61.54。总体上 6 种元素的生态风险程度轻微, 部分采样点 Cd 元素的生态风险程度为中等。研究区单因子污染物生态风险系数由大到小依次为 Cd > As > Pb > Cu >

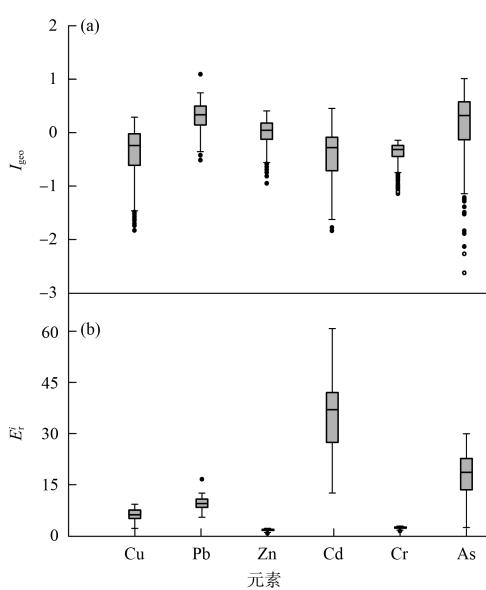


图 3 研究区表层沉积物中 6 种元素的污染累积程度
和单项潜在生态风险

Fig. 3 Pollution accumulation degree and individual potential ecological risk of 6 elements in surface sediments from the study area

$\text{Cr} > \text{Zn}$ 。由此可见, Cd 和 As 是主要的生态风险贡献因子,原因是 Cd 和 As 的污染参数与毒性响应系数高于其他元素,存在较高的潜在生态风险。

研究区 6 种元素综合潜在生态风险指数的空间分布见图 4。RI 值为 32.90 ~ 109.04, 平均值为 72.34。RI 值均 < 150, 表明研究区表层沉积物综合潜在生态风险为轻微。其中, 三门湾、台州湾和乐清湾等沿岸海域的 RI 值相对偏大, 而越远离海岸 RI 值则越小。研究区综合潜在生态风险整体上由向岸至远岸呈现逐渐下降的趋势, 在后续的海域生态环境保护过程中应予以重视。

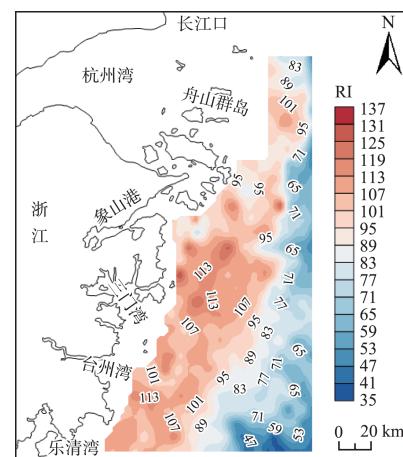


图 4 研究区表层沉积物 6 种元素综合潜在生态风险指数的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of comprehensive potential ecological risk index of 6 elements in surface sediments from the study area

3 结论

(1) 浙江近岸海域表层沉积物中 6 种元素含量总体上分布规律相似, 元素含量高值区主要分布在向岸海域, 在象山港—乐清湾沿岸出现最高值; 而远离海岸则含量逐渐减小, 东部海域出现极低值。6 种元素含量分布特征主要受陆上排污、沉积物来源、水动力特征及沉积作用等影响和控制。

(2) 浙江近岸海域表层沉积物中 6 种元素之间呈显著正相关, 表明其具有相似的物质来源、分布特征及迁移变化规律; 6 种元素与 M_{g} 均具有显著的正相关性, 表明其易吸附在细颗粒沉积物上, 近岸泥质区也是元素含量高值区; 6 种元素与 TOC 均呈正相关, 表明有机质是影响海域沉积物中重金属含量分布的重要因素。

(3) 基于地累积指数法和生态风险指数法评价重金属潜在生态风险的结果基本一致,浙江近岸海域重金属污染总体上属于轻度水平,综合潜在生态风险分布表现为向岸海域大于远岸海域,6种元素的潜在生态风险从大到小依次为 Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn,建议加强对 Cd、As 的重点监测。

[参考文献]

- [1] PAN K, WANG W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. Science of the Total Environment, 2012, 421/422: 3–16.
- [2] XU G, LIU J, LIU S F, et al. Modern muddy deposit along the Zhejiang coast in the East China Sea: Response to large-scale human projects[J]. Continental Shelf Research, 2016, 130: 68–78.
- [3] MORELLI G, GASPARSON M, FIERRO D, et al. Historical trends in trace metal and sediment accumulation in intertidal sediment of Moreton Bay, southeast Queensland, Australia [J]. Chemical Geology, 2012, 300/301: 152–164.
- [4] QUAN W M, SHI L Y, HAN J D, et al. Spatial and temporal distributions of nitrogen, phosphorus and heavy metals in the intertidal sediment of the Changjiang River Estuary in China[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2010, 29(1): 108–115.
- [5] LIU Q, YANG P, HU Z, et al. Identification of the sources and influencing factors of the spatial variation of heavy metals in surface sediments along the northern Jiangsu coast[J]. Ecological Indicators, 2022, 137: 108716.
- [6] BUAT-MENARD P, CHESSELET R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 42(3): 399–411.
- [7] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geochemical Journal, 1969, 2(3): 109–118.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975–1001.
- [9] 王婕,刘桂建,方婷,等.基于污染负荷指数法评价淮河(安徽段)底泥中重金属污染研究[J].中国科学技术大学学报,2013,43(2):97–103.
- [10] 赵增锋,石伟,邱小琮,等.清水河流域水体中5种重金属的分布特征及健康风险评价[J].环境监测管理与技术,2021,33(3):35–40.
- [11] 赵一阳.中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J].地质科学,1983,18(4):307–314.
- [12] 赵宝刚,邵秘华,鲍永恩,等.东海表层沉积物中重金属集成特征及变化规律[J].大连海事大学学报,2008,34(3):13–16.
- [13] CHEN B, FAN D J, LI W R, et al. Enrichment of heavy metals in the inner shelf mud of the East China Sea and its indication to human activity [J]. Continental Shelf Research, 2014, 90: 163–169.
- [14] 丁喜桂,叶思源,鲁静.浙江省近岸海域表层沉积物重金属分布特征及地球化学分区[J].海洋地质前沿,2010,26(12):1–8.
- [15] 张弛,高效江,宋祖光,等.杭州湾河口地区表层沉积物中重金属的分布特征及污染评价[J].复旦学报(自然科学版),2008,47(4):535–540.
- [16] 孙晓燕,李希彬.近3 ka来东海陆架北部泥质沉积物地球化学特征[J].海洋地质前沿,2012,28(4):10–16.
- [17] 曹柳燕,张捷,胡颖琰,等.浙江南部近岸海域表层沉积物中重金属污染评价[J].环境污染与防治,2016,38(7):61–65.
- [18] XU G, LIU J, DOU Y G, et al. Historical trends of trace metals in muddy deposit along the Zhejiang coast, East China Sea: response to economic development and hypoxia[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2018, 25(2): 1609–1620.
- [19] ZHAI B, ZHANG X L, WANG L B, et al. Concentration distribution and assessment of heavy metals in surface sediments in the Zhoushan Islands coastal sea, East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 164: 112096.
- [20] MC MANUS J. Grain size determination and interpretation[M]// TUCKER M. Techniques in sedimentology. Oxford: Blackwell Scientific Press, 1988: 63–85.
- [21] ZHOU G H, SUN B B, ZENG D M, et al. Vertical distribution of trace elements in the sediment cores from major rivers in east China and its implication on geochemical background and anthropogenic effects[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 139: 53–67.
- [22] 叶敏强,季相星,李婷婷,等.江苏省近岸海域沉积物重金属分布及风险评价[J].污染防治技术,2019,32(2):33–38.
- [23] ZHUANG W, ZHOU F X. Distribution, source and pollution assessment of heavymetals in the surface sediments of the Yangtze River Estuary and its adjacent East China Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 164: 112002.
- [24] XIAO H, SHAHAB A, YE F, et al. Source-specific ecological risk assessment and quantitative source apportionment of heavy metals in surface sediments of Pearl River Estuary, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2022, 179: 113726.
- [25] 赵一阳,鄢明才.中国浅海沉积物地球化学[M].北京:科学出版社,1994.
- [26] 肖尚斌,李安春,蒋福清,等.近2 ka闽浙沿岸泥质沉积物物源分析[J].沉积学报,2005,23(2):268–274.
- [27] LIANG J, LIU J, XU G, et al. Grain-size characteristics and net transport patterns of surficial sediments in the Zhejiang near-shore area, East China Sea[J]. Oceanologia, 2020, 62: 12–22.
- [28] 沈华悌,梁居廷,王秀昌.东海陆架残留沉积物的改造[J].海洋地质与第四纪地质,1984(2):67–76.

本栏目编辑 谢咏梅 刘罗