

项立辉,王艳芬,姜辞冬,等.江苏中部潮间带表层沉积物重金属分布、来源及污染评价[J].海洋地质前沿,2024,40(8):42-52.

XIANG Lihui, WANG Yanfen, JIANG Cidong, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of intertidal zone in central Jiangsu Province: distribution, source, and assessment[J]. Marine Geology Frontiers, 2024, 40(8): 42-52.

# 江苏中部潮间带表层沉积物重金属分布、来源及污染评价

项立辉<sup>1,2</sup>,王艳芬<sup>3</sup>,姜辞冬<sup>1,2</sup>,刘强<sup>1,2</sup>,李伟欣<sup>4</sup>

(1 江苏省有色金属华东地质勘查局地球化学勘查与海洋地质调查研究院,南京 210007; 2 江苏华东地质环境工程有限公司,南京 210007; 3 江苏省有色金属华东地质勘查局资源调查与评价研究院,南京 210007; 4 山东省地质矿产勘查开发局第四地质大队,潍坊 261021)

**摘要:**基于 2015 年江苏中部潮间带 89 个站位表层沉积物的测试分析结果和以往资料,探讨了 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg 7 种重金属元素的含量、空间分布特征和相关性,并采用沉积物质量基准法、地累积指数法和富集系数对该区重金属状况进行了系统评价。结果表明,表层沉积物中重金属元素含量相差较大,平均含量由高至低依次为 Cr>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg,空间分布不均匀,高值区呈点状或片状分布。沉积物质量符合中国海洋沉积物质量第一类标准,所有站位的重金属含量均低于可能效应水平(PEL),综合潜在生态风险为低风险。元素相关性分析、地累积指数、富集系数和 R 型因子分析结果表明:Cu、Pb 和 Zn 元素主要来自于地壳物质或自然风化作用,未污染、未富集;Cr 元素含量受自然和人类活动共同作用的影响,部分站位轻度污染和轻度富集;Cd、As 和 Hg 元素含量受人类活动影响较大,较为富集,污染程度较重。

**关键词:**重金属;污染评价;表层沉积物;潮间带;江苏

中图分类号:P736

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2023.222

## 0 引言

沿海海洋沉积物是海洋中重金属重要的“汇”。沉积物中的重金属因易于检测,记录了人类工业文明中各种污染物的来源、分布、迁移和转化的历史,是研究海洋污染历史的最佳工具<sup>[1-2]</sup>。重金属相对于环境背景值的变化在一定程度上反映了该地区人类活动的程度,具有重要的环境意义<sup>[3-5]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来,众多研究人员对中国沿海河口、海湾和潮间带重金属的分布、污染和生态危害进行了评估<sup>[6-8]</sup>,重金属的含量和分布与沉积物的矿物成分及化学组成、化学风化作用、水体理化性质、

水动力条件、人类活动和生物作用等多种因素相关<sup>[9-12]</sup>。

近年来,由于江苏沿海经济的快速发展,工业化、城市化等人类活动排放的重金属进入河流并最终固定在海洋沉积物中<sup>[13-15]</sup>,吸附于沉积物表面的重金属颗粒会随着环境条件的变化释放到水体中,引起二次污染。潮间带既是陆源重金属重要的汇,也是水体潜在的污染源。江苏潮间带以泥滩为主,地形较为平坦,平均潮差 2.5~4 m,潮流沙脊区最大潮差>9 m,潮区相对较宽,多>10 km,取样难度大,以往开展的研究工作相对较少。张蓝天等<sup>[16]</sup>研究了不同滩涂围垦类型下土壤/沉积物重金属总量、有效态含量及其潜在生态风险,认为滩涂土壤重金属总体呈轻度污染,高值区位于养殖区和行道树林。刘超<sup>[17]</sup>利用如东洋口港福海潮滩表层沉积物分析了有机碳(TOC)、总氮(TN)和 6 种重金属元素的含量,其中, Pb 和 Ni 含量超过江苏土壤背景

收稿日期:2023-09-14

资助项目:中国地质调查局海洋地质保障工程专项(GZH201200506)

第一作者:项立辉(1981—),男,硕士,高级工程师,主要从事生态环境调查与海洋地质调查方面的研究工作。E-mail:xianglihui@163.com

值, As 含量超过沉积物质量一级标准, 是潮滩地区主要的致污因子。已有研究受取样难度大、样品数量少等因素的限制, 并不能系统阐明江苏潮间带重金属的污染状况。本文依托地质调查项目, 更新取样方法, 利用火钳式取样器和箱式取样器相结合的方法, 在江苏中部潮间带采集大量的表层沉积物样品, 取样精度达到 1:100 000, 通过开展系统的粒度和地球化学元素测试, 利用各种评价方法对重金属污染状况进行评价, 分析江苏中部潮间带重金属元素分布特征, 以为潮间带地区重金属污染的大范围监测和防治提供理论基础和技术支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 样品采集与测试

2015 年, 在江苏中部潮间带共采集 89 个表层沉积物样品(图 1)。水深 < 2.5 m 的区域采用游艇和泡沫筏作为取样平台, 利用火钳式取样器采样。水深 > 2.5 m 的海区采用调查船作为取样平台, 利用箱式取样器采样。导航采用 DGPS 定位, 定位精度优于 10 m。样品采集后, 取顶部 0~5 cm 的沉积物装入聚乙烯密封袋中, 置于 0~4 °C 环境中保存,

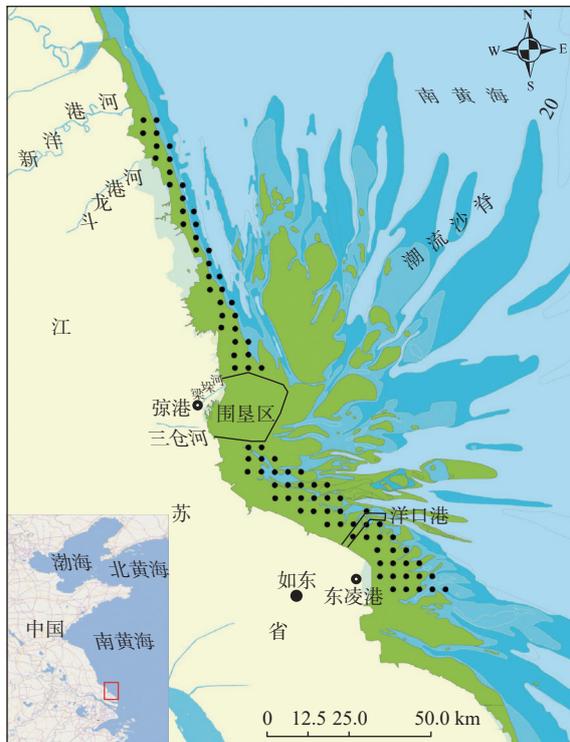


图 1 研究区取样站位

Fig.1 Locations of surface sediment sampling in the study area

用于沉积物粒度和地球化学元素测试。

粒度测试在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室完成。从样品中取 10~20 g 沉积物, 经双氧水和稀盐酸浸泡处理, 除掉有机质和碳酸盐, 然后洗盐, 用六偏磷酸钠溶液作为分散剂经超声波分散后上机测试。实验仪器为英国马尔文公司生产的 Masterisizer-2000 型激光粒度分析仪。对测试数据采用矩法计算沉积物的平均粒径、分选系数、偏态系数和峰态等粒度参数。

元素地球化学测试在中国海洋大学海洋监测与检测中心完成。将样品在恒温 (< 60 °C) 下烘干后, 研磨至 250 目以下进行元素分析, 以消除含水量变化和粒度的影响。采用全谱直读电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定 Cr、Zn、Al 和 Fe 元素含量, 采用美国热电公司生产的电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定 Cu、Pb 和 Cd 元素含量。As 和 Hg 元素采用原子荧光光谱法(AFS)测定。测试过程中采用平行样和水系沉积物国家标准 GBW07309(GSD-9)进行质量控制, 每测试 10 个样品加 1 个标准样和 1 个平行样, 平行样的相对误差 < 5%, 标准物质的回收率介于 95%~120%, 测试结果准确可靠。

### 1.2 数据处理

实验测试过程中, 不可避免地存在一些随机误差(偶然误差), 产生一些异常高值。本文采用平均值加 3 倍标准偏差法检验, 并剔除异常值<sup>[18-19]</sup>。本文中 Fe 元素剔除异常值数据 1 个, Cd 元素剔除异常值数据 1 个, Hg 元素剔除异常值 4 个。

### 1.3 分析评价

#### 1.3.1 沉积物质量基准法

目前分析重金属污染程度的方法有很多, MACDONALD 等<sup>[20]</sup>提出的阈值效应水平(TEL)和可能效应水平(PEL)可有效评估重金属对生态系统的毒性或可能存在的风险<sup>[21-23]</sup>。TEL 值表示很少发生不良生物效应的污染物浓度, PEL 值表示经常发生不良生物效应的污染物浓度, 浓度介于二者之间, 说明偶尔发生不良反应。

#### 1.3.2 地累积指数法

地累积指数法( $I_{geo}$ )是一种可定量评价重金属污染程度的重要指标, 被广泛应用于沉积物质量评

价中,公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2(C_n / (k \cdot B_n)) \quad (1)$$

式中,  $C_n$  为沉积物样品中元素  $n$  的实测含量;

$B_n$  为元素  $n$  的地球化学背景值, 本研究中选用华北上地壳中各元素的平均值<sup>[24]</sup>;

$k$  为考虑各地岩石差异可能会引起背景值的变化而取的系数<sup>[25]</sup>, 一般取值 1.5。

重金属污染程度<sup>[26]</sup> 依据  $I_{\text{geo}}$  值划分为 7 级, 从未污染( $I_{\text{geo}} \leq 0$ )至严重污染( $I_{\text{geo}} \geq 5$ )。

### 1.3.3 富集系数

富集系数(EF)是另一种可定量评价沉积物重金属污染程度和污染来源的指标, 用 Al 作为参考元素可对样品中的元素含量进行标准化, 以此消除粒度差异对元素的影响, 富集系数计算公式如下:

$$EF = (Me/Al)_{\text{sample}} / (Me/Al)_{\text{baseline}} \quad (2)$$

式中,  $Me_{\text{sample}}$  和  $Al_{\text{sample}}$  分别为沉积物样品中 7 种重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg)和 Al 元素的实测含量;

$Me_{\text{baseline}}$  和  $Al_{\text{baseline}}$  分别为重金属元素和 Al 元素的背景值。

本研究中背景值采用华北上地壳中各元素的平均值<sup>[24]</sup>。重金属的来源可通过 EF 值进行评价,  $0.5 < EF < 1.5$  为自然源,  $EF > 1.5$  为人为源<sup>[27-28]</sup>。

## 2 结果

### 2.1 沉积物粒度特征

研究区表层沉积物粒径介于  $1.10\Phi \sim 5.98\Phi$ , 平均粒径  $3.10\Phi$ (图 2a), 沉积物类型主要包括砂、砂质粉砂、粉砂质砂、粉砂、砂质泥和泥 6 种, 其中以砂和粉砂质砂为主, 占到 70% 以上(图 2b)。围垦区北部沉积物粒径相对较细, 平均粒径为  $3.83\Phi$ , 沉积物类型以粉砂质砂为主, 分选系数介于  $0.51 \sim 2.01$ (图 2c), 平均值为 1.29, 偏态介于  $-0.23 \sim 0.69$ (图 2d), 平均值为 0.24, 峰态介于  $0.58 \sim 2.81$ (图 2e), 平均值为 1.32。围垦区南部, 除了洋口港南侧以泥为主, 大部分区域以砂和粉砂质砂为主, 平均粒径为  $2.60\Phi$ , 沉积物粒径相对较粗, 分选系数介于  $0.49 \sim 1.77$ (图 2c), 平均值为 0.80, 偏态介于  $-0.54 \sim 0.63$ (图 3d), 平均值为 0.05, 峰态介于  $0.68 \sim 2.74$ (图 2e), 平均值为 1.44。

### 2.2 元素空间分布特征

研究区常量元素(Al 和 Fe)和重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg)的分布特征如图 3 所示。其中 Al 元素含量介于  $9.93\% \sim 15.66\%$ , 平均值为  $11.49\%$ , 高值区位于围垦区北部外侧海域和洋口港南侧(图 3b)。Fe 元素含量介于  $3.44\% \sim 6.48\%$ , 平均值为  $4.6\%$ , 除了围垦区南部近岸出现一片高值区, 其分布特征基本与 Al 元素相似(图 3c)。

重金属元素 Cu 含量介于  $11.66 \sim 46.01 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $28.95 \text{ mg/kg}$ , 高值区在围垦区北部呈点状分布, 在围垦区南部近岸区域呈片状分布(图 3d); Pb 元素的含量介于  $3.72 \sim 27.7 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $18.07 \text{ mg/kg}$ , 高值区基本呈片状分布, 主要位于围垦区北部、围垦区南部近岸和洋口港南侧海域(图 3e); Zn 元素含量介于  $12.86 \sim 90.34 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $50.48 \text{ mg/kg}$ , 除了研究区北部出现片状高值区, 其他高值区较为分散, 呈点状分布(图 3f); Cr 元素含量介于  $44.74 \sim 167.7 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $79.37 \text{ mg/kg}$ , 主要发现 3 个高值区, 分别位于研究区北部近岸、围垦区南侧近岸和洋口港北侧海域(图 3g); Cd 元素含量介于  $0.02 \sim 0.73 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $0.20 \text{ mg/kg}$ , 高值区主要位于研究区北部的近岸区域(图 3h); As 元素含量介于  $0.81 \sim 16.09 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $6.21 \text{ mg/kg}$ , 主要呈现 2 片高值区, 分别位于研究区北部近岸区域和洋口港北侧近岸区域(图 3i); Hg 元素含量介于  $0 \sim 0.2 \text{ mg/kg}$ , 平均值为  $0.08 \text{ mg/kg}$ , 高值区较为分散, 基本呈点状分布, 位于围垦区北侧外部海域和围垦区南部近岸区域(图 3j)。

## 3 讨论

### 3.1 元素含量对比分析

从江苏中部潮间带与其他典型区域沉积物中重金属元素的含量对比可以看出(表 1), 研究区表层沉积物中 Cu、Cr、Cd 和 Hg 元素的平均含量高于江苏南部和江苏南通<sup>[13,29]</sup>, 但 Pb、Zn 和 As 含量相对较低。除了 Cr、Cd 和 Hg, 研究区其他 4 种重金属元素平均含量低于南黄海表层沉积物中的含量<sup>[30]</sup>。江苏中部潮间带 Cu、Cr 和 Hg 含量高于江苏沿海和陆域土壤<sup>[31]</sup>, 而 Zn 和 As 含量较低, Pb

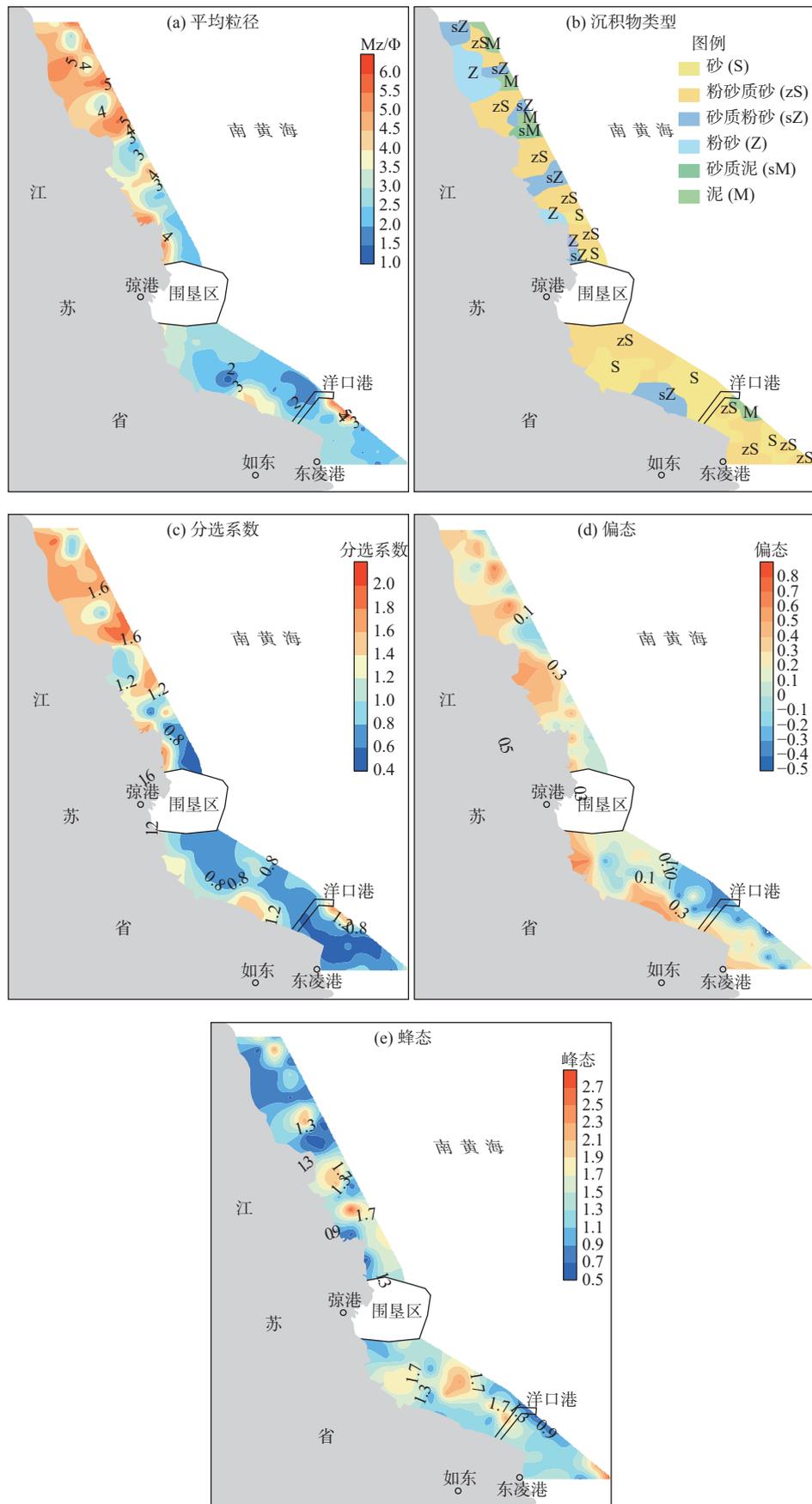


图 2 研究区沉积物平均粒径 (Mz)、沉积物类型、分选系数、偏态和峰态的空间分布特征

Fig.2 Spatial distributions of mean grain size (Mz), sediment type, sorting coefficient, skewness, and peak state in the study area

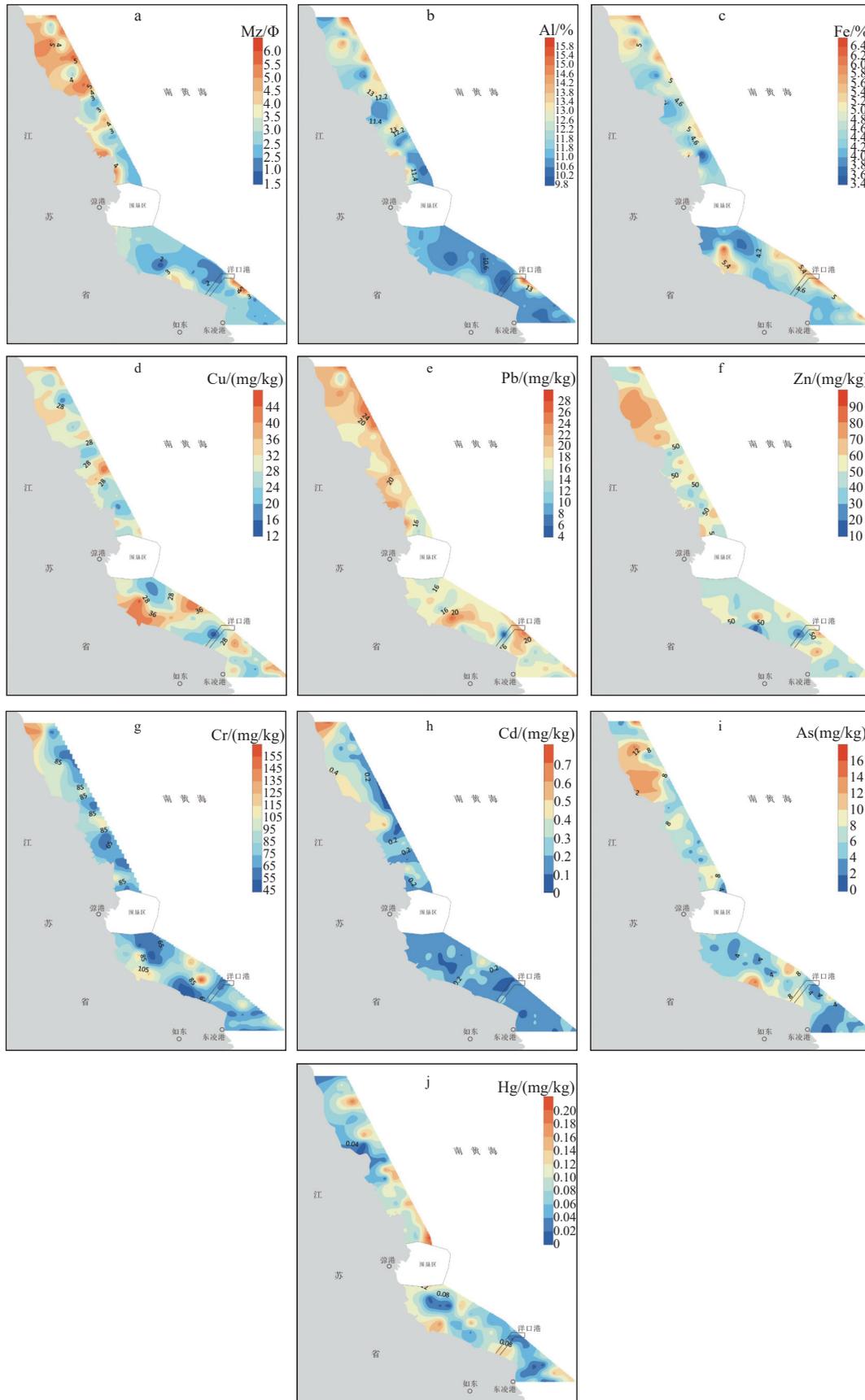


图3 研究区沉积物平均粒径、常量元素 (Al、Fe) 和重金属元素 (Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg) 的空间分布特征

Fig.3 Spatial distributions of mean grain size, major elements (Al and Fe), and heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, As, and Hg) in the study area

表 1 江苏中部潮间带与其他典型区域沉积物中重金属含量对比

Table 1 Comparison of the heavy metal concentrations in surface sediments of intertidal zone in central Jiangsu Province and other representative areas

位置		Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg	来源
江苏中部潮间带	范围	11.66~46.01	3.72~27.7	12.86~90.34	44.74~167.7	0.02~0.73	0.81~16.09	0~0.2	本文
	均值	28.95	18.07	50.48	79.37	0.20	6.21	0.08	
江苏南部	均值	19.02	21.34	70.77	65.56	0.07	6.25	0.03	文献[13]
江苏南通	均值	16.60	21.60	130.75	55.54	0.18	9.24	0.04	文献[29]
南黄海	均值	40.30	19.29	56.91	57.17	0.09	11.06	0.01	文献[30]
江苏沿海土壤	均值	19.54	14.52	61.06	61.71	0.12	13.06	0.01	文献[27]
江苏陆域土壤	均值	15.84	24.70	64.68	60.28	0.37	8.59	0.03	文献[31]
海洋沉积物质量第一类标准	均值	35	60	150	80	0.5	20	0.2	文献[32]

和 Cd 含量介于两者之间。研究区表层沉积物中 7 种重金属元素的平均含量均符合中国海洋沉积物质量第一类标准。

### 3.2 元素相关性分析

根据相关性分析(表 2)可以看出,与平均粒径

高度相关的元素是 Al, 中度相关的是 Zn, 低相关的元素有 Fe、Pb 和 As, 不相关的元素有 Cu、Cr、Cd 和 Hg。大部分元素之间表现为低相关或不相关, 中相关的元素有 Al 与 Fe、Pb、Zn 元素( $r=0.54\sim 0.55$ ), Fe 与 Pb( $r=0.53$ ), Cu 与 Cr( $r=0.63$ ), Pb 和 Zn( $r=0.57$ ), 研究区内无高度相关的元素。

表 2 重金属元素与常量元素和平均粒径的 Pearson 相关系数

Table 2 Pearson's correlation matrix for the heavy metals, major element, and mean grain size

	Al	Fe	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg	Mz
Al	1									
Fe	0.55**	1								
Cu	0.22*	0.48**	1							
Pb	0.54**	0.53**	0.47**	1						
Zn	0.54**	0.45**	0.43**	0.57**	1					
Cr	0.06	0.39**	0.63**	0.32**	0.23*	1				
Cd	-0.05	0.10	0.17	0.10	0.16	0.37**	1			
As	0.30**	0.17	0.07	0.10	0.42**	0.03	0.34**	1		
Hg	0.06	0.03	0.12	0.11	0.12	0.16	-0.02	0.07	1	
Mz	0.89**	0.37**	0.16	0.42**	0.51**	0.12	0.14	0.35**	0.001	1

注:\*\* 在 0.01 级别(双尾), 相关性显著; \* 在 0.05 级别(双尾), 相关性显著。

### 3.3 重金属污染评价

从研究区 7 种重金属元素的基准阈值和不同浓度范围内的样品百分比(表 3)可以看出, 超过 PEL 的样品数为 0, 表明研究区沉积物重金属浓度不会经常产生不良生物效应, 综合潜在生态风险为低风险。Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As 和 Hg 浓度低于 TEL 值的分别占 5%、100%、100%、3%、99%、66% 和 85%。介于 TEL 值和 PEL 值之间的重金属元素 Cu、Cr、Cd、As 和 Hg 浓度分别占 95%、97%、1%、34% 和 15%, 表明这些元素偶尔会产生不良生

物反应<sup>[33-35]</sup>。

研究区表层沉积物中 Hg 元素的平均污染程度

表 3 江苏中部重金属基准阈值及不同浓度范围内的百分比

Table 3 The reference threshold of heavy metals in central Jiangsu Province and percentage of samples in different concentration ranges

沉积物基准阈值	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg
阈值效应水平(TEL)	18.7	30.2	124	52.3	0.68	7.24	0.13
可能效应水平(PEL)	108	112	271	160	4.21	41.6	0.7
<TEL/%	5	100	100	3	99	66	85
≥TEL, < PEL/%	95	0	0	97	1	34	15
≥PEL /%	0	0	0	0	0	0	0

最高(表4),其次是Cd、As、Cr、Cu、Pb和Zn(图4)。7种重金属元素地累积指数的空间分布特征如图5所示,所有站位中Cu和Zn的 $I_{geo}$ 值均 $<0$ ,说明研究区内沉积物未受到Cu和Zn的污染。Pb、Cr、Cd、As和Hg的 $I_{geo}>0$ 的站位分别占8%、

31%、76%、53%和92%。Pb和Cr元素污染的站位中主要为未污染至中度污染( $0<I_{geo}\leq 1$ )。Cd、As和Hg表现为未污染至中度污染、中度污染和中度至重度污染( $2<I_{geo}\leq 3$ ),局部Hg呈现为重度污染( $3<I_{geo}\leq 4$ )<sup>[25]</sup>。

表4 江苏中部潮间带表层沉积物的富集系数EF和地累积指数 $I_{geo}$

Table 4 Enrichment factors and geoaccumulation index values of heavy metals in the surface sediments of intertidal zone in central Jiangsu Province

参数	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	As	Hg	
背景值/(mg/kg)	31	16	61	56	0.077	3.3	0.011	
EF	范围	0.46~1.67	0.28~1.96	0.22~1.55	0.86~3.32	0.38~10.82	0.27~4.56	0.38~20.99
	均值	0.99	1.19	0.87	1.51	2.81	1.98	7.88
$I_{geo}$	范围	-2~-0.02	-2.69~0.21	-2.83~-0.02	-0.91~1	-2.26~2.66	-2.61~1.7	-1.84~3.65
	均值	-0.72	-0.45	-0.92	-0.13	0.56	0.12	1.95

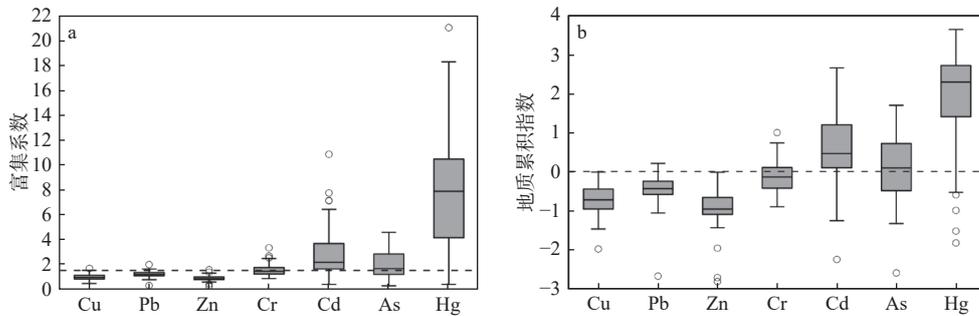


图4 表层沉积物中重金属元素的富集系数EF(a)和地累积指数 $I_{geo}$ (b)

Fig.4 Enrichment factors (a) and geoaccumulation indexes (b) of heavy metals in the surface sediments

### 3.4 重金属来源分析

研究区表层沉积物7种重金属元素中富集系数最大的是Hg,其次是Cd、As、Cr、Pb、Cu和Zn(图4)。除了Cu、Pb和Zn,其他4种元素的EF平均值均 $>1.5$ ,说明这些元素受到人类活动影响较大。7种元素的EF值的空间分布特征如图6所示,Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、As和Hg各站位中EF值 $>1.5$ 的分别占3%、3%、1%、43%、76%、58%和94%。表层沉积物富集的站位中,Cr元素除了位于洋口港的北侧的1个站位为中度—重度富集( $EF=3.32$ ),其他站位的富集均为轻度富集( $1.5<EF<3$ )。除了斗龙港河口处1个站位的Cd元素呈现重度富集,其他站位Cd和As元素均表现为轻度富集( $1.5<EF<3$ )和中度—重度富集( $3<EF<10$ )。Hg元素的富集情况最为突出,约30%的站位呈现重度富集( $EF>10$ ),主要呈点状分布于围垦区北侧外部海域和围垦区南部近岸区域(图6)。

利用SPSS 25软件对江苏中部潮间带表层沉

积物中的常量元素、重金属元素和平均粒径进行R型因子分析,得到4个特征值 $>1$ 的因子,累积方差贡献量达到77.27%,代表了地球化学信息中的绝大部分信息。经Kaiser标准化的正交旋转后的各因子载荷见表5。

因子1(F1)的方差贡献量为38.61%,高载荷的元素主要包括Al(0.80)、Fe(0.73)、Cu(0.63)、Pb(0.74)和Zn(0.81),说明这些元素有相同的来源,同时沉积物粒径在F1上也呈现较高的正载荷。 $Al_2O_3$ 是大陆分异的产物,在地壳中相对稳定,因此,Al被认为是从大陆到海洋的稳定元素<sup>[36-37]</sup>,被用作海洋中陆源成分的指示物,并且Al与Fe、Pb、Zn为强相关(表2),因此,推测重金属元素Cu、Pb和Zn主要来自于地壳物质或自然风化作用,F1代表自然源。江苏中部潮间带沉积物主要来源于河流陆源输入,因此,沉积物中自然源的Cu、Pb和Zn在围垦区北侧新洋港河、斗龙港河口海域含量相对较高,同时受苏北沿岸流作用,江苏北部古黄河、射阳河、灌河等河流物质也可能影响到本区。整体

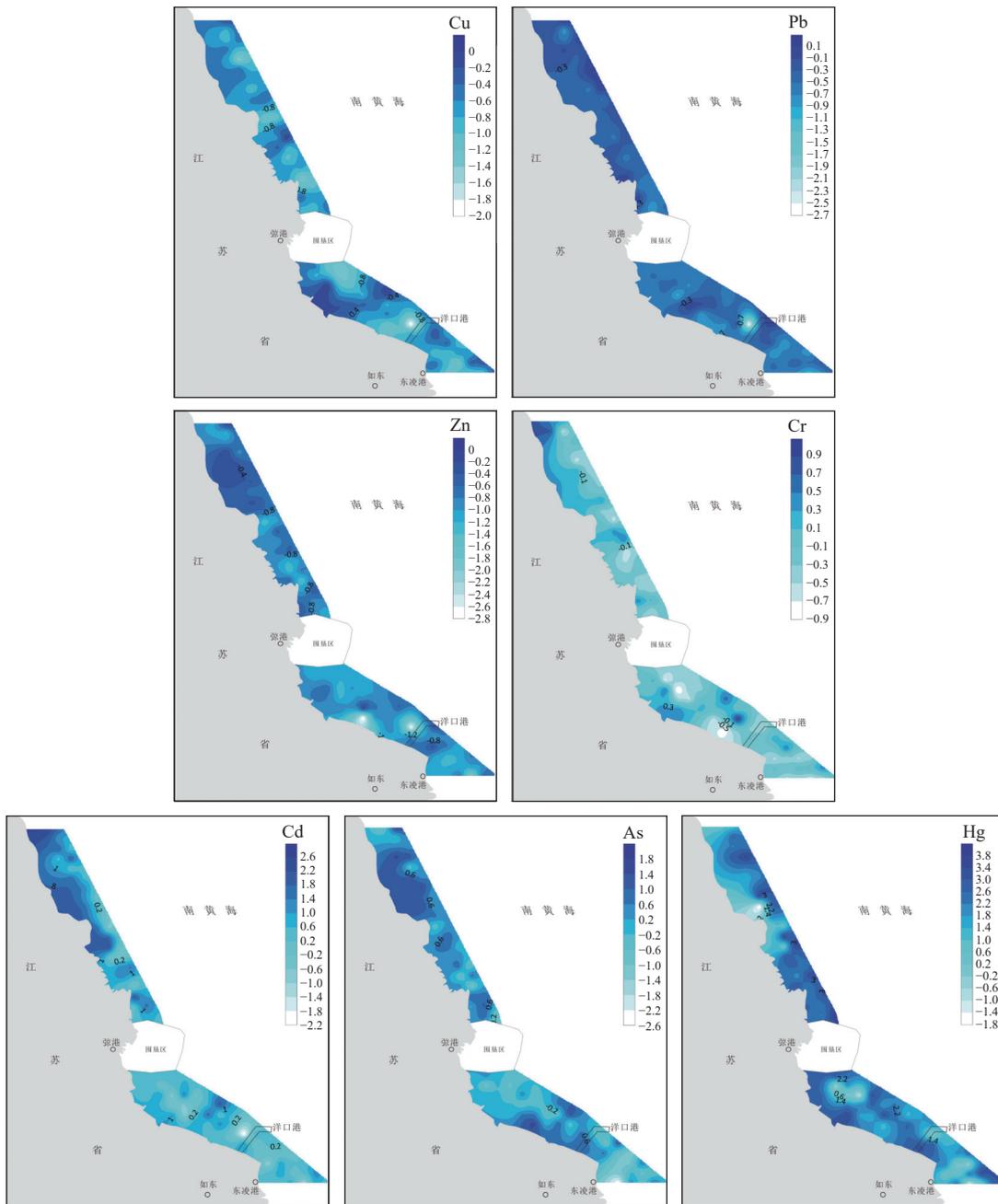


图 5 表层沉积物中重金属元素  $I_{geo}$  值分布特征

Fig.5 Spatial distributions of the  $I_{geo}$  values for heavy metals in the surface sediments

上, Pb 和 Zn 受元素粒度控制规律作用, 沉积物粒径较细的区域, 富集吸附作用强, 重金属含量较高。

因子 2(F2) 的方差贡献量为 15.83%, 高载荷的元素主要为 Cr(0.74)。Cr 元素的平均 EF 值 > 1.5, 说明受到人类活动的影响, 并且 31% 站位的  $I_{geo} > 0$ , 表明这些站位受到 Cr 元素的污染。此外, Cr 元素在 F1 上也有一定的正载荷(0.48), 因此认为 F2 代表自然源和人为源的共同作用。研究区中 Cr 元素的含量一方面与地壳自然风化有关, 另一方面还有人类活动的贡献, 如电镀、化石燃料的燃烧、化肥农

药的使用等<sup>[30]</sup>。Cr 元素污染主要出现在北侧新洋港、斗龙港港口区域和洋口港北侧贝类养殖区, 与人类活动密切相关。

因子 3(F3) 的方差贡献量为 12.87%, 高载荷的元素主要为 Cd(0.78) 和 As(0.68)。Cd 和 As 元素的平均 EF 值 > 1.5, 平均  $I_{geo}$  值 > 0, 说明研究区内这 2 种元素主要受到人类活动的影响, F3 代表人为源。Cd 主要来源于工业冶金、化工生产。As 是农药、化肥的主要成分, 因此可能是现代农业发展过程中农药化肥的过渡使用, 其残留通过河流汇入海

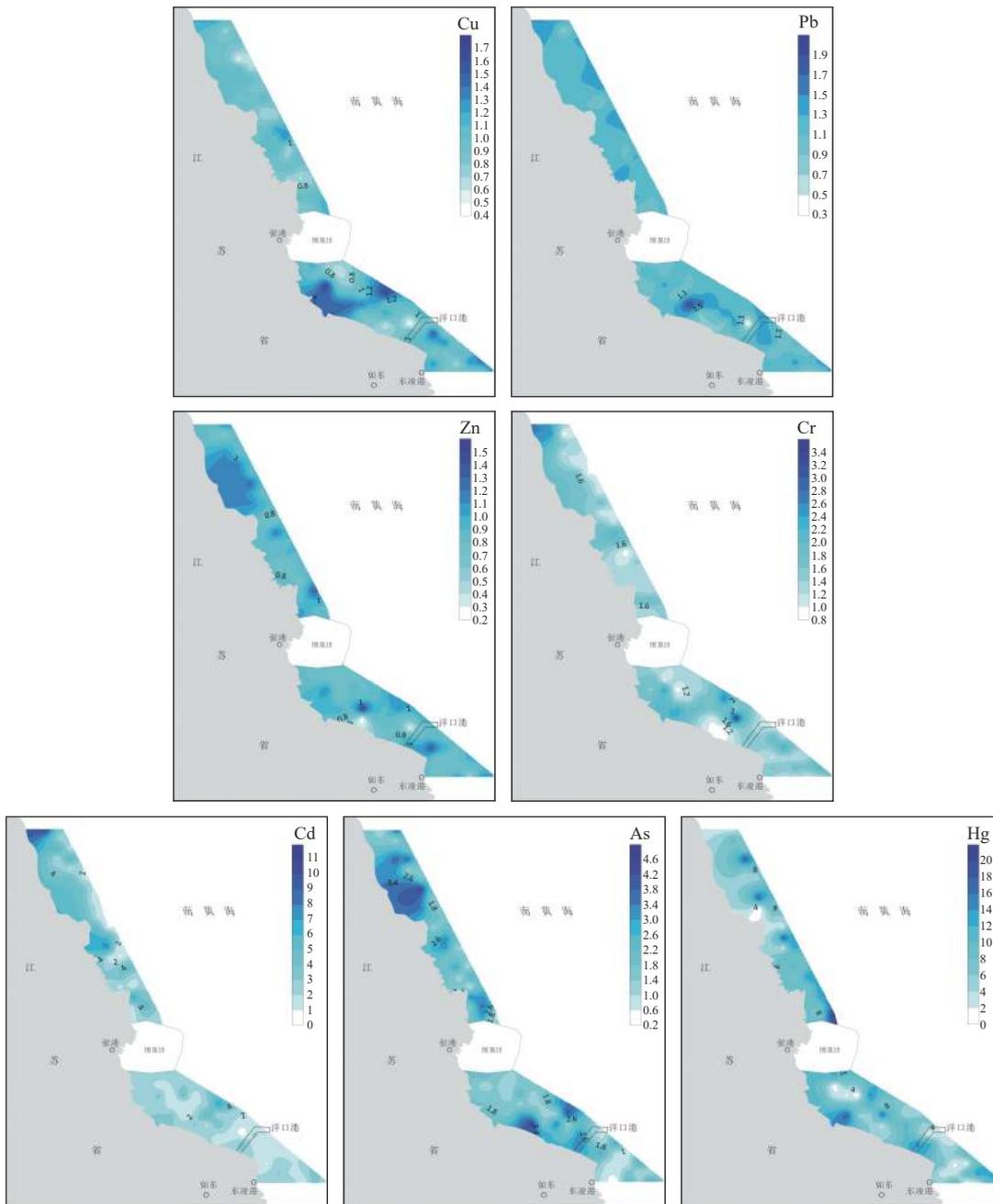


图6 表层沉积物中重金属元素 EF 值分布特征

Fig.6 Spatial distributions of the EF values of heavy metals in the surface sediments

洋,造成研究区 As 元素的污染。Cd 和 As 元素污染主要出现在北侧新洋港、斗龙港港口区域和洋口港北侧贝类养殖区。新洋港、斗龙港作为地区性港口,海上贸易繁荣,船舶往来频繁,临港工业区内分布着农药化工、化学药物、石油化工以及精密电子等产业,产生的工业废水经河流排放到本区域。贝类养殖区在养殖过程中会使用大量化肥,极易造成 As 污染。

因子 4(F4)的方差贡献量为 9.97%,高载荷的元素为 Hg(0.93),其平均 EF 高达 7.88,  $I_{geo}$  为 1.95,

说明研究区内 Hg 元素主要来自于人类活动,F4 代表人为源, Hg 主要来自于塑料、电池、电子等工业的排放。研究区内大部分区域呈现 Hg 污染,Hg 主要来自于生产工业化学药物和电子工业的排放。据江苏省 2016 年度工业用地调查数据显示<sup>[38]</sup>, 20.94% 的生态用地和 58.03% 的生活地被化工、钢铁、纺织、交通等相关企业挤占,启东港附近 5 km 范围内就有 69 家化工公司,研究区域内大量的化工企业污水的排放导致了 Hg 出现大面积污染。

表 5 表层沉积物中特征值的总方差、方差百分比和 4 个主成分的特征向量 (F1—F4)

Table 5 Total variance of surface sediments and their eigenvalues, percentages of variance, and eigenvectors of four principal components (F1—F4)

	F1	F2	F3	F4
Al	0.80	-0.48	-0.17	0.00
Fe	0.73	0.08	-0.22	-0.19
Cu	0.63	0.58	-0.16	-0.11
Pb	0.74	0.06	-0.29	-0.02
Zn	0.81	-0.10	0.08	0.12
Cr	0.48	0.74	0.03	-0.09
Cd	0.26	0.31	0.78	-0.14
As	0.45	-0.25	0.68	0.18
Hg	0.16	0.24	-0.09	0.93
Mz	0.75	-0.48	0.05	-0.04
特征值	3.86	1.58	1.29	1.00
方差百分比/%	38.61	15.83	12.87	9.97
累积方差/%	38.61	54.44	67.30	77.27

## 4 结论

(1) 元素相关性分析表明重金属元素中除 Zn 与沉积物平均粒径表现为中相关, 其他元素均与平均粒径低相关或不相关, 沉积物粒径不是重金属元素空间分布的主控因素。

(2) 表层沉积物中重金属元素含量差异较大, 平均含量由高至低依次为 Cr>Zn>Cu>Pb>As>Cd>Hg, 空间分布不均匀, 高值区呈点状或片状分布。沉积物质量符合中国海洋沉积物质量第一类标准, 所有重金属元素不会经常产生不良生物效应, 其中, Cu、Cr、Cd、As 和 Hg 元素偶尔会产生不良生物反应。

(3) 表层沉积物  $I_{geo}$  值表明重金属 Hg 元素的平均污染程度最高, 其次是 Cd、As、Cr、Cu、Pb 和 Zn; EF 值表明重金属的富集程度由大到小依次为 Hg>Cd>As>Cr>Pb>Cu>Zn。结合元素相关性分析和 R 型因子分析, 认为 Cu、Pb 和 Zn 主要来自于地壳物质或自然风化作用, Cr 含量受到自然风化和人类活动的共同影响, Cd、As 和 Hg 主要来源于人类活动。

### 参考文献:

[1] 雷雁翔, 张斌, 吴治国, 等. 长岛北部海域表层沉积物重金属分布特征与风险评价及来源分析 [J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(3): 40-50.

[2] THORAT B, PRASAD P, RAM A. Heavy metal accumulation

in a moderately polluted Ulhas Estuary, Western India[J]. *Regional Studies in Marine Science*, 2023, 60: 102818.

[3] 王俊杰, 左平, 黄阳, 等. 盐城新洋港表层沉积物重金属分布特征与评价 [J]. 环境评价, 2013, 39(5): 57-62.

[4] KHALEEQ A, AHMED M, HUMA R, et al. Evaluation of trace and heavy metals in different varieties of sauces to characterize their impact on human health[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2022, 114: 104789.

[5] 赵雪琴, 赵善道, 左平, 等. 江苏盐城原生湿地表层沉积物中的重金属污染评价 [J]. 环境保护科学, 2010, 36(1): 64-68.

[6] 郑江鹏, 矫新明, 方南娟, 等. 江苏近岸海域沉积物重金属来源及风险评价 [J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1514-1522.

[7] 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.

[8] 高燕云. 射阳河口现代沉积速率及其重金属污染评价 [D]. 南京: 南京师范大学, 2011.

[9] 孟昆. 苏北辐射沙洲近岸潮滩现代沉积特征及重金属时空分布规律研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2018.

[10] 宋颖, 李华栋, 时文博, 等. 黄河三角洲湿地重金属污染生态风险评价 [J]. 环境保护科学, 2018, 44(5): 118-122.

[11] 徐艳东, 魏潇, 杨建敏, 等. 山东近岸海域表层沉积物 7 种重金属污染特征和生态风险评估研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 651-658.

[12] 陈鹏. 江苏北部沿海潮间带大型底栖动物群落特征及表层沉积物重金属含量研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2019.

[13] QIU J D, YIN P, LIU J, et al. Historical records of trace metals in core sediments from Jiangsu coastal area, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 149: 110625.

[14] YUAN H M, SONG J M, LI X G, et al. Distribution and contamination of heavy metals in surface sediments of the South Yellow Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64: 2151-2159.

[15] XIANG L, JIANG S, CHENG H, et al. Heavy metal concentration profiles and pollution assessment in the Jiangsu offshore area, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 193: 115187.

[16] 张蓝天, 杨林生, 李海蓉, 等. 江苏沿海滩涂土壤重金属风险分析 [J]. 中国环境监测, 2023, 39(2): 55-62.

[17] 刘超. 江苏如东潮滩重金属污染及其基于光谱响应的定量估算研究 [D]. 南京: 南京师范大学, 2020.

[18] WU Z, DONG Y, LIU R, et al. Assessment of heavy metal contamination in surface sediments off the Dongying coast, Bohai Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2022, 180: 113826.

[19] 顾效源, 孔祥淮, 王伟, 等. 山东丁字湾表层沉积物重金属分布及污染评价 [J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(3): 13-21.

[20] MACDONALD D, CARR R, CALDER F, et al. Development and evaluation of sediment quality guidelines for Florida coastal waters[J]. *Ecotoxicology*, 1996, 5(4): 253-278.

[21] LONG E, MACDONALD D, SMITH S, et al. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments[J]. *Environmental Management*, 1995, 19(1): 81-97.

[22] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 渤海莱州湾沉积物 REE 与重金属污染特征及物源判别 [J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(10): 8-24.

- [23] RUBIO B, NOMBELA M, VILAS F. Geochemistry of major and trace elements in sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an assessment of metal pollution[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2000, 40(11): 968-980.
- [24] GAO S, LUO T C, ZHANG B R, et al. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, 62(11): 1959-1975.
- [25] MULLER G. Heavy-metals in sediment of the rhine-changes since 1971 [M]. Germany, Umschau in Wissenschaft und Technik, 1979: 778-783.
- [26] MÜLLER G. Die Schwermetallbelastung der sediment des Neckars und seiner Nebenflüsse: eine Bestandsaufnahme[J]. *Chemiker Zeitung*, 1981, 105: 157-164.
- [27] LI Y, LI H G. Historical records of trace metals in core sediments from the Lianyungang coastal sea, Jiangsu, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 116(1/2): 56-63.
- [28] HU B Q, LI J, ZHAO J T, et al. Heavy metal in surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai Sea: distribution, contamination, and sources[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(6): 5071-5083.
- [29] SHEN F, MAO L J, DENG X Q, et al. Reanalysis of distribution characteristics and contamination evaluation of heavy metals in coastal sediments of Jiangsu Province[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(5): 62-71.
- [30] XU G, LIU J, KONG X H, et al. An evaluation on heavy metal contamination in surface sediments on the west South Yellow Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 2012, 31(2): 181-185.
- [31] 夏增禄. 土壤元素背景值及其研究方法 [M]. 北京: 气象出版社, 1987.
- [32] 国家海洋局国家海洋环境监测中心. GB 18668—2002, 海洋沉积物质量 [S]. 北京: 中国标准出版社.
- [33] XAVIER D, DOS SANTOS V, DE MIRANDA A, et al. Determination of background geochemistry of an Amazon estuary: the Cuñani Estuary -Amapá[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 155: 111144.
- [34] MADADI R, MEJJAD N, DE-LA-TORRE G. Geochemical speciation, ecological risk, and source identification of heavy metal(loid)s in sediments and waters from Musa Estuary, Persian Gulf[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 190: 114836.
- [35] JEONG H, RA K. Pollution and ecological risk assessments for heavy metals in coastal, river, and road-deposited sediments from Apia City in Upolu Island, Samoa[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2023, 188: 114596.
- [36] DIAGOMANOLIN V, FARHANG M, GHAZI-KHANSARI M, et al. Heavy metals (Ni, Cr, Cu) in the karoon waterway river, Iran[J]. *Toxicology Letters*, 2004, 151(1): 63-67.
- [37] 段云莹, 裴绍峰, 廖名稳, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征、污染评价与来源分析 [J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2021, 41(6): 67-81.
- [38] 江苏省国土资源厅. 江苏省工业企业用地调查分析报告(2016) [R]. 南京: 江苏省国土资源厅, 2017.

## Heavy metal contamination in surface sediments of intertidal zone in central Jiangsu Province: distribution, source, and assessment

XIANG Lihui<sup>1,2</sup>, WANG Yanfen<sup>3</sup>, JIANG Cidong<sup>1,2</sup>, LIU Qiang<sup>1,2</sup>, LI Weixin<sup>4</sup>

(1 Institute of Geochemical Exploration and Marine Geological Survey, ECE, Nanjing 210007, China; 2 Jiangsu East China Geological Environment Engineering Co. Ltd., Nanjing 210007, China; 3 Institute of Resource Survey and Evaluation of East China Geological Exploration Bureau, Nanjing 210007, China; 4 Shandong Provincial No.4 Institute of Geological and Mineral Survey, Weifang 261021, China)

**Abstract:** Surface sediment samples were collected at 89 stations from intertidal zone in central Jiangsu Province in 2015. The concentrations, spatial distribution patterns, and interrelations of seven heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cr, Cd and Hg) were studied and compared with previous investigations. The pollution status was evaluated systematically with China's national sediment quality guidelines, geoaccumulation index, and enrichment factor. Results show that the concentrations of heavy metals in surface sediment varies greatly, and the average concentration followed the descending order of: Cr > Zn > Cu > Pb > As > Cd > Hg. The spatial distribution was uneven. High-value areas were spot-like or in patch. The heavy metal concentrations at all stations were below the possible effect level, and the overall potential ecological risk was low. The Pearson correlation coefficients, geoaccumulation indexes, enrichment factors, and R-type factor analysis show that heavy metals Cu, Pb and Zn were not polluted or enriched, and they were mainly from crustal materials or natural weathering. Cr was slightly polluted and enriched, which were jointly affected by natural weathering and human activities. Cd, As, and Hg were enriched and heavily polluted, which were mainly derived from anthropogenic sources.

**Key words:** heavy metals; pollution assessment; surface sediments; intertidal zone; Jiangsu Province