

# 江苏启东近岸海域沉积物重金属分布特征 及其潜在生态风险评价

周 翔<sup>1</sup>, 刘 晴<sup>2</sup>, 吴 痕<sup>2</sup>

(1.中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司,江苏 南京 211102)

(2.南京师范大学海洋科学与工程学院,江苏 南京 210023)

**[摘要]** 为了揭示江苏启东近海沉积物中重金属污染特征,对 2016 年在近岸海域获取的 10 个站位沉积物样品进行了重金属含量测定,分析了江苏启东海域表层沉积物 7 种重金属元素(Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 和 As)。结果表明,沉积物中重金属的含量由高到低依次为 Zn、Cr、Pb、Cu、As、Cd、Hg,其中 Zn、Pb、Cu、As 和 Cd 元素含量均大于该海域沉积物重金属含量自然背景值,意味着这些重金属元素对江苏近海海洋生态环境有着不同程度的污染。空间上,沉积物重金属污染存在明显的空间差异性,高值区主要分布在港口和河口入海处,表明近海生态环境受人类活动和陆源污染物入海影响较大。沉积物重金属地累积指数结果显示除 Cd 元素外,其它重金属元素污染程度相对较低。潜在生态风险指数结果表明启东近海沉积物环境重金属生态风险总体处于中等水平。因此,有必要加强对该区域人类活动所产生的重金属污染进行控制。

**[关键词]** 沉积物,重金属,生态风险评价,启东近海

**[中图分类号]** P76 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2023)02-0062-07

## Distribution Characteristics and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Coastal Sediments of Qidong, Jiangsu Province

Zhou Xiang<sup>1</sup>, Liu Qing<sup>2</sup>, Wu Hen<sup>2</sup>

(1.China Energy Engineering Group Jiangsu Power Design Institute Co.,Ltd,Nanjing 211102,China)

(2.School of Marine Science and Engineering,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

**Abstract:** In order to reveal the pollution characteristics of heavy metal in the sediments of the Qidong coastal region, Jiangsu Province, we have measured the concentrations of seven heavy metal elements(Cu, Pb, Zn, Cr, Cd, Hg and As) in 10 surface sediments collected in Qidong coastal region, Jiangsu Province in 2016, and analyzed the pollution characteristics and potential ecological risks of heavy metal. The results show that the concentration of heavy metals in sediments are Zn, Cr, Pb, Cu, As, Cd and Hg in the order from high to low. Among them, the contents of Zn, Pb, Cu, As and Cd are all higher than the background value of heavy metal in Jiangsu tidal flat area, indicating that these heavy metal elements pollute the marine environment to a certain extent. There are obvious differences in the spatial distribution of heavy metal content, and the high value areas are mainly distributed in the ports and estuaries, indicating that the pollutants discharged into the sea by human activities have a great impact on the coastal ecological environment. In addition, the results of geoaccumulation index show that the pollution degree is low except Cd. The heavy metal levels generally indicated medium ecological risks, except for Cd. Therefore, it is necessary to control heavy metal contamination caused by anthropogenic activities in studied area.

**Key words:** sediments, heavy metals, ecological risks, Qidong coastal region

海岸海洋区域是陆海相互作用的重要界面,也是人类生存、生产的最重要空间载体,受人类活动影响极为突出<sup>[1]</sup>。过去几十年,由于人类活动,特别是沿海地区社会经济快速发展导致入海污染物增加,严重影响了近岸海域海洋水生生态环境。重金属被认为是水环境的主要污染源,其毒性、生物积累、生态风险、

收稿日期:2022-11-20.

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK20200735)、江苏省海洋科技创新项目(JSZRHYKJ202103)。

通讯作者:刘晴,博士,讲师,研究方向:海洋资源与环境。E-mail:liuq@njnu.edu.cn

持久性和不可生物降解性引起了全球的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。沉积物作为近海水域环境中的重要组成部分,被认为是大多数重金属污染的“汇”<sup>[4]</sup>。然而,许多污染物并不是永久固定在沉积物中,由于海岸区水动力较强,且极易受到风暴潮等高能突发事件的影响,沉积物扰动会导致重金属重新释放进入海水中,可能成为污染源<sup>[5]</sup>。海水或沉积物中的重金属被海洋生物摄入后,会在其体内富集,在海洋食物链中传递和生物放大,进而影响海洋生态系统和人类健康。因此,研究近岸海域沉积物重金属污染状况及其潜在生态风险,对于评估近海区域生态环境的健康水平具有重要价值。

江苏启东位于长江河口三角洲北侧,是长江中下游平原的重要组成部分。沿海滩涂资源丰富,水产养殖发达,是我国重要的贝类、紫菜养殖基地。同时,近海分布着我国重要的吕四渔场,渔业发达。启东近岸分布着滨海工业园区、电厂、港口和养殖区等。随着沿海地区社会经济快速发展,人类活动产生的大量陆源污染物通过河流排放入海,海洋开发强度加大,使得启东近海环境面临严重威胁。然而,以往研究主要集中在多环芳烃、营养盐和生物污染等<sup>[6-9]</sup>方面研究,而针对启东海域沉积物重金属的污染特征研究较少。本研究旨在分析江苏启东海域沉积物重金属含量及其空间分布,评估沉积物中重金属污染特征和潜在生态风险,以期江苏近海沉积物重金属污染的可持续治理和调控提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

江苏启东近海地处东经 121°25′40″至 121°54′30″,北纬 31°41′06″至 32°16′19″,该区域位于南黄海辐射沙洲南翼区,属于亚热带季风湿润气候,全年气温温和,四季分明,年均气温在 14.9℃左右,多年平均降水量 1 045.3 mm,周边分布有通吕河、蒿枝港河、协兴河等小型入海河流。启东海域主要受南黄海沿岸流的作用和南黄海旋转潮波系统的影响,潮汐属于正规半日潮,平均潮差在 2.5~4 m。启东地处长江入海口,三面环水,形似半岛,集黄金水道、黄金海岸、黄金大通道于一身,是出江入海的重要门户。研究海域海岸线漫长,滩涂资源丰富,水产养殖发达,近岸分布着工业区、农渔业区、港口航运区和城镇用海区<sup>[7]</sup>。

### 1.2 样品采集与分析

2016 年 5 月,在江苏启东近海布设了 10 个表层沉积物站位(如表 1 所示),采用抓斗取样器在深度 0~5 cm 的海底表层采集约 500~600 g 的沉积物样品,获得的样品立即密封在干净的聚乙烯袋,随后冷藏保存并运送到实验室。在实验分析之前进行预处理,首先对获得的样品进行冻干,然后研磨并过 200 目筛。所有样品在聚乙烯容器中使用 HF-HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>(5:4:1)的混合物进行消解,每次重复两次<sup>[10]</sup>。沉积物测试方法按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《海洋监测技术规程》(HY/T 147.1—2013)进行。As 和 Hg 的含量采用原子荧光法测定,Cu、Pb、Cr 和 Cd 的含量使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-AES)测定,Zn 含量采用火焰原子吸收分光光度法测定,重复测试样品的相对偏差小于 5%。

表 1 研究区站位及其重金属含量

Table 1 Station location and heavy metal content in the study area

站点	经度/(°)	纬度/(°)	Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )
1	121.69	32.14	0.011	7.51	21.50	23.20	54.90	37.00	0.21
2	121.76	32.02	0.005	5.59	24.00	25.00	54.90	37.50	0.22
3	121.78	32.04	0.002	6.54	19.10	27.40	55.30	50.60	0.23
4	121.87	32.14	0.016	6.52	25.70	20.00	79.00	47.50	0.20
5	121.80	31.99	0.061	14.30	19.20	25.80	82.50	43.90	0.22
6	121.88	32.06	0.015	7.59	21.80	19.80	73.00	41.70	0.16
7	121.85	31.93	0.007	6.68	18.40	20.30	64.40	32.10	0.18
8	121.95	31.98	0.025	6.84	21.30	21.40	52.90	34.50	0.18
9	121.94	31.88	0.041	10.50	25.50	18.10	63.70	37.70	0.17
10	122.02	31.92	0.041	11.80	20.40	20.30	54.00	43.80	0.16

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 地累积指数法

地累积指数法作为一种研究水体中沉积物重金属元素污染的定量化指标,近年来通常被用于评估沉积物重金属元素的污染程度<sup>[11-13]</sup>,设  $I_{\text{geo}}$  为累积指数<sup>[14]</sup>,

$$I_{\text{geo}}=\log_2\left(\frac{C_n}{1.5*B_n}\right).$$

式中,  $C_n$  和  $B_n$  分别是沉积物中重金属实测浓度值和地球化学背景值, 1.5 是为考虑地球岩石成岩作用和区域差异而导致的元素背景值变动而设定的系数. 本文选用江苏滩涂土壤元素的浓度作为启东近海环境中自然背景值( $B_n$ ), Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, As 和 Hg 含量分别为  $15.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $11.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $47.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $0.04\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $60.11\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $70.38\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.023\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ <sup>[15]</sup>. 根据地累积指数的数值将污染物分为 7 个类别, 数值小于等于 0 为未污染、数值属于 (0, 1] 为未污染至中度污染、数值属于 (1, 2] 为中度污染、数值属于 (2, 3] 为中度至偏重度污染、数值属于 (3, 4] 为偏重度污染、数值属于 (4, 5] 为重度污染、数值大于 5 为严重污染<sup>[16]</sup>.

1.3.2 重金属潜在生态风险指数

潜在生态风险指数法由瑞典科学家 Hakanson 最早提出<sup>[17]</sup>, 该方法是当前被用于全面反映重金属元素对生态环境潜在影响的重要方法, 其主要考虑了沉积物重金属的潜在毒性、重金属浓度、区域敏感性及其自然背景值的差异. 设  $E_{RI}$  为所有重金属元素的潜在生态风险指数,

$$E_{RI}=\sum_{i=1}^nE_i=\sum_{i=1}^nT_i\times C_i.$$

式中,  $n$  为该区域所考虑的重金属元素个数,  $E_i$  为某一类重金属元素的潜在生态风险指数,  $T_i$  为该重金属元素的毒性响应系数, 其中 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 和 As 分别为 5、5、1、2、30、40 和 10;  $C_i$  为重金属元素的污染系数, 表示单一元素污染,

$$C_i=\frac{C_{ri}}{C_{bi}}.$$

式中,  $C_{ri}$  和  $C_{bi}$  分别为重金属元素的实测值和背景值. 综合污染系数  $C_{RI}$  为:

$$C_{RI}=\sum_{i=1}^nC_i.$$

重金属污染系数及潜在生态风险评价等级如表 2 所示<sup>[18]</sup>.

表 2 海洋沉积物重金属污染系数和潜在生态风险等级划分

Table 2 Heavy metal pollution coefficient and potential ecological risk classification in the marine sediments				
单因子污染系数	综合污染系数	单因子潜在生态风险指数	综合潜在生态风险指数	污染程度/生态风险程度
<1	<8	<40	<150	低
[ 1,3)	[ 8,16)	[ 40,80)	[ 150,300)	中等
[ 3,6)	[ 16,32)	[ 80,160)	[ 300,600)	重
≥6	≥32	[ 160,320)	≥600	严重

此外, 采选用 ArcGIS 反距离加权的方法进行重金属元素浓度空间分析, 所有统计分析均采用 SPSS 20.0 软件进行.

2 结果与分析

2.1 江苏启东海域沉积物重金属含量特征

表 3 为江苏启东近岸海域沉积物中重金属元素的浓度及其相关参数, 结果显示表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cd、Cr、Hg 和 As 平均含量分别为  $21.69\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $22.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $63.46\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.19\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $40.63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.02\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $8.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 重金属元素的平均含量从大到小依次为 Zn、Cr、Pb、Cu、As、Cd、Hg, 这些元素均符合国标《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668—2002) 中的一类标准, 可以看出江苏启东海域表层沉积物质量总体较好, 未出现重金属含量超标. 此外, Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 元素浓度值与该区域自然背景值相比较, 意味着这几类元素对该区域的生态环境有一定的污染, 但污染程度不明显. 通过对启东海域 10 个调查站位沉积物重金属进行变异分析, 其变异系数范围为 12.06% ~ 86.36%, 表明启东海域表层沉积物重金属元素浓度空间分布差异较大, 以 Hg 和 As 元素最为明显. 与其他海域相比(如表 4 所示), 江苏启东近海沉积物重金属元素 Cu、Pb、Cd、Zn 和 Hg 低于长江口和渤海湾的浓度, 但均高于江苏其它海域, 这可能与该区域的工业化程度和长江入海所携带的污染物供给有关.

表 3 江苏启东海域沉积物重金属含量统计分析

Table 3 Statistical characteristics and comparative analysis of heavy metal content in Qidong coastal region of Jiangsu Province

项 目	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr
启东海域平均值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	8.39	0.022	21.69	22.13	63.46	0.19	40.63
启东海域最小值(站位)	5.59(2)	0.002(3)	18.40(7)	18.10(9)	52.90(8)	0.16(6)	30.10(7)
启东海域最大值(站位)	14.3(5)	0.061(5)	25.70(4)	27.4(3)	82.50(5)	0.23(3)	50.60(3)
启东海域标准差	2.84	0.019	2.62	3.06	11.11	0.03	5.87
启东海域变异系数/%	33.84	86.36	12.06	13.81	17.50	13.02	14.45
江苏海域背景值/(mg·kg <sup>-1</sup> )	7.38	0.023	15.02	11.40	47.15	0.04	60.11
海洋沉积物质量一类标准/(mg·kg <sup>-1</sup> )	20	0.2	35	60	150	0.5	80

表 4 江苏启东海域沉积物重金属浓度水平与其它海区的比较

Table 4 Comparison of heavy metal concentration in surface sediments of Qidong coastal region of Jiangsu Province with other areas

区域	Cu/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Cr/(mg·kg <sup>-1</sup> )	As/(mg·kg <sup>-1</sup> )	Hg/(mg·kg <sup>-1</sup> )	参考文献
大丰海域	15.02	11.40	0.04	47.15	60.11	7.38	0.023	[19]
海州湾	19.41	18.23	0.17	73.29	74.18	12.84	0.020	[20]
射阳河口	23.51	16.87	0.15	62.16	37.19	12.84	0.020	[12]
南通海岸	14.08	24.84	0.11	45.30	56.94	5.93	0.013	[6]
渤海湾	38.50	44.00	0.22	206.30	101.40	—	—	[21]
长江口	30.70	31.80	0.26	94.30	78.90	—	—	[22]
启东海域	21.69	22.13	0.19	63.46	40.63	8.39	0.022	本文

2.2 江苏启东海域沉积物重金属元素空间分布特征

在 ArcGIS 中选用反距离加权法对江苏启东近海的表层沉积物重金属含量进行空间分布图绘制(如图 1 所示),结果显示重金属 As 元素含量的变化范围为 5.59~14.29 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 8.39 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值位于蒿枝港外侧海域 4 号站位,最大值位于蒿枝港至塘芦港之间的 5 号站位,整体表现为启东北部海域低,南部海域高的空间分布趋势,其中高值区主要位于协兴河口外侧海域. 重金属 Hg 元素的含量变化范围为 0.002~0.014 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 0.022 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值位于茅家港外侧海域 3 号站位,最大值位于蒿枝港至塘芦港之间的 5 号站位,高值区位于协兴河口以南海域,整体呈现由西北向东南逐渐增加的趋势,暗示了协兴河口及其长江入海污染物是该区域沉积物中 Hg 元素增加的主要来源. 重金属 Cu 元素含量的变化范围为 18.40~25.69 mg·kg<sup>-1</sup>,平均为 21.69 mg·kg<sup>-1</sup>. 其中,最小值分布在塘芦港外侧海域 7 号站位,最大值分布在茅家港口外侧海域附近 2 号站位,除塘芦港口附近海域外,其他海域均有分布. 重金属 Pb 元素含量的变化范围为 18.10~27.39 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 22.13 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值分布在协兴河口东南侧,最大值分布在蒿枝港口外侧海域,空间上整体呈现出重金属由西北向西南减少的趋势. 重金属 Zn 元素含量的变化范围为 52.91~82.48 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 63.46 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值分布在蒿枝港口外侧的 2 号站位,最大值分布在蒿枝港至塘芦港之间的 5 号站位,整体呈现由塘芦港外侧海域向南北两侧逐渐降低的趋势. 重金属 Cr 元素含量的变化范围为 32.11~50.57 mg·kg<sup>-1</sup>,平均值为 40.63 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值分布在塘芦港口外侧海域 7 号站位,最大值分布在蒿枝港外侧 3 号站位,表明重金属污染源主要为蒿枝港. 沉积物 Cd 元素含量的变化范围为 0.16~0.23 mg·kg<sup>-1</sup>,平均为 0.19 mg·kg<sup>-1</sup>,最小值分布在协兴河口外侧 10 号站位,最大值分布在蒿枝港口外侧 2 号站位,进一步表明了蒿枝港携带污染物入海是其重要污染源.

总体而言,江苏启东海域沉积物重金属元素在空间上存在着显著的差异. 其中,重金属 Pb、Cr 和 Cd 元素在空间分布上呈现在蒿枝港口及其以北海域含量偏高,而南侧海域一侧重金属元素含量偏低,这表明蒿枝港口附近入海物质是该区域沉积物重金属 Pb、Cr 和 Cd 的主要污染来源,重金属 As 和 Hg 元素呈现相似的空间分布特征,表明二者存在着相似的污染来源,其主要在蒿枝港至塘芦港之间的 5 号站位和协兴河口外侧以南海域重金属呈现高值,北侧海域重金属含量相对较低,因此蒿枝港和协兴河口入海污染物可能是导致重金属 As 和 Hg 元素含量较高的原因. 此外,长江入海河口所带的污染物也是该区域 As 和 Hg 元素含量高的的重要因素. Zn 在蒿枝港至塘芦港之间的 5 号站位呈现高值,北侧海域相对较低,因此蒿枝港入海污染物可能是导致重金属含量较高的原因. Cu 除蒿枝港口附近含量较低外,其余区域均相对较高,表现为空间分布规律性较弱.

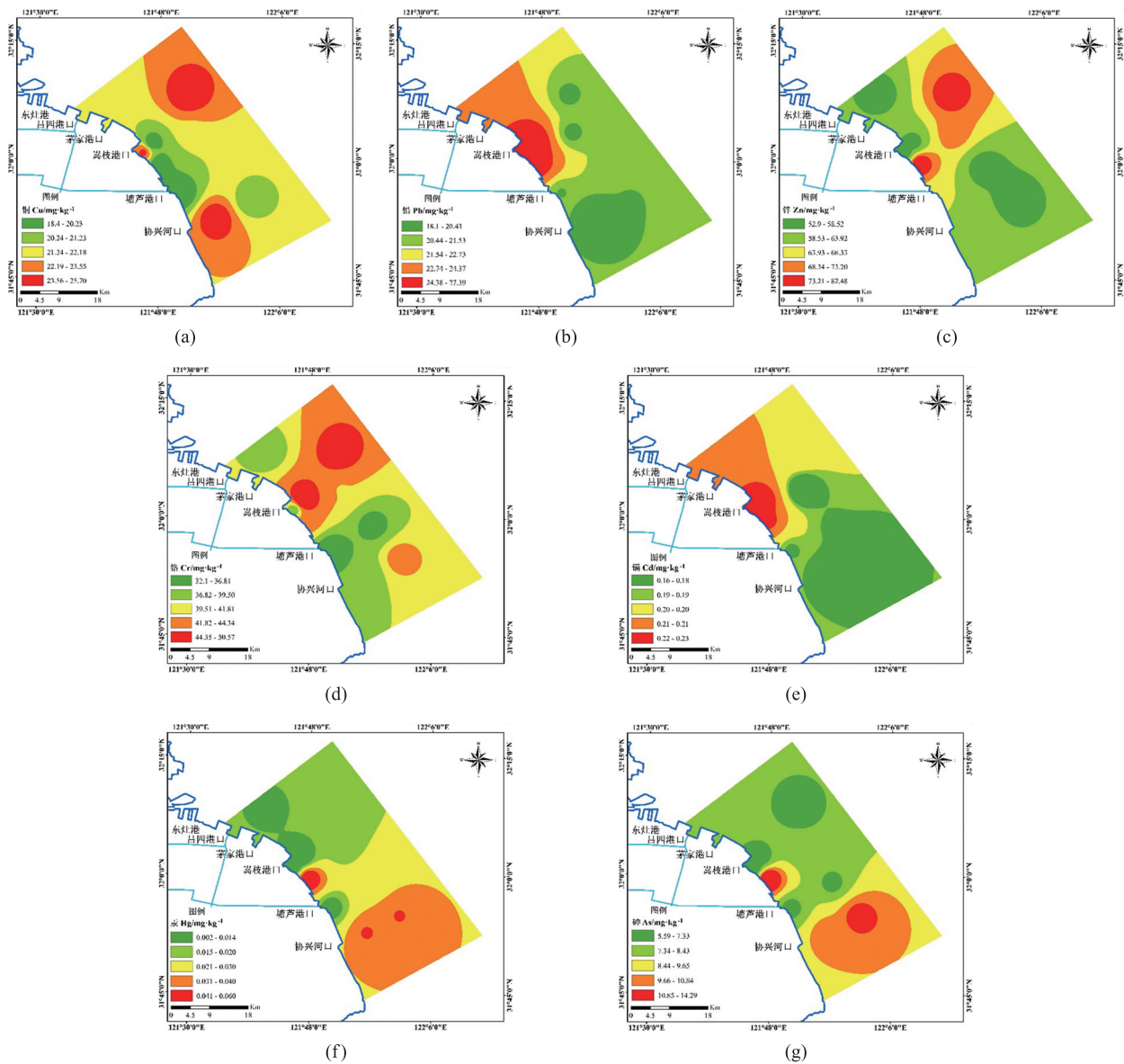


图 1 江苏启东近海沉积物重金属元素空间分布图

Fig. 1 Spatial distribution maps of heavy metals in the surface sediment of Qidong coastal region of Jiangsu Province

2.3 江苏启东海域沉积物重金属污染评估

江苏启东近海沉积物重金属元素地累积指数和污染系数结果显示(如图 2 所示),As 元素的含量范围为-0.99~0.37,平均值为-0.47. Hg 元素含量范围为-4~0.81,平均值为-1.2. Cu 元素的含量范围为-0.29~0.19,平均值为-0.06. Pb 元素的含量范围为 0.08~0.68,平均值为 0.36. Zn 元素的含量范围为-0.42~0.22,平均值为-0.18. Cr 元素的含量范围为-1.49~-0.83 之间,平均为-1.16. Cd 元素的含量范围为 1.33~1.84 之间,平均值为 1.60. 重金属元素污染程度由高到低依次为 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Hg、Cr,除了 Cd 元素污染度属于中度污染外,其它重金属元素在启东海域显示无污染特征. 重金属污染因子与地累积指数呈现一致的趋势,Cd 的污染度较高,其它元素污染程度较低.

2.4 江苏启东海域沉积物重金属潜在生态风险评价

沉积物重金属元素单因子污染系数( $C_i$ )和综合污染系数( $C_{RI}$ )评价结果如表 5 所示,结果显示  $C_i$  和  $C_{RI}$  值由高到低依次表现为 Cd、Pb、Cu、Zn、As、Hg、Cr,其中除了重金属 Cd 元素的  $C_i$  值范围为 1.16~5.02,处于中等或重度污染水平外,其它重金属元素  $C_i$  值含量范围为 0~3,处于低中度污染水平.  $C_{RI}$  分析结果显示,江苏启东近海沉积物重金属元素  $C_{RI}$  值范围为 10.36~15.73,平均值为 12.09,按照污染等级标准,该海域沉积物重金属污染处于中低水平. 可见 Cd 在江苏启东海域重金属污染贡献量最大,主要是与该区域

工业和农业活动有关,如制造合金业、颜料、充电电池,使用杀虫剂和油漆等.

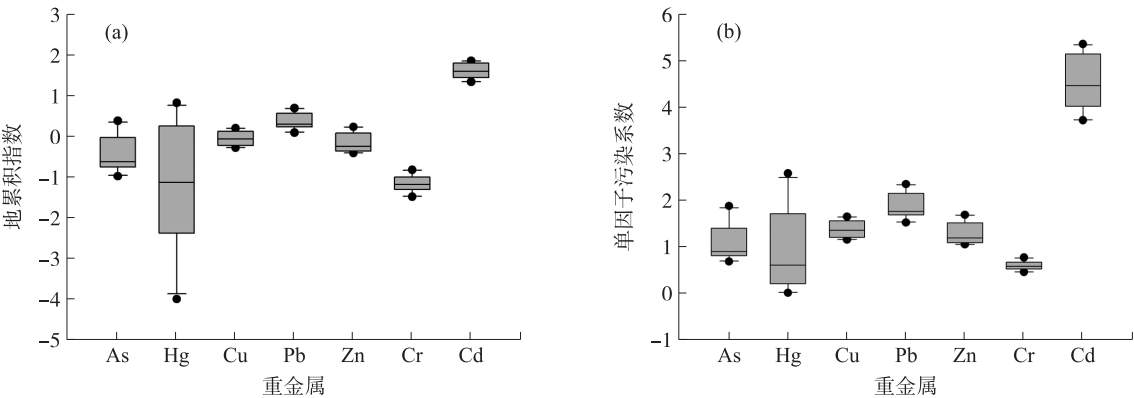


图 2 启东近海沉积物中重金属的地累积指数和污染因子  
Fig. 2 Geoaccumulation index and contamination factor of heavy metals in the sediment of Qidong coastal region of Jiangsu Province

表 5 江苏启东海域沉积物重金属元素单因子( $C_i$ )和综合因子污染系数( $C_{RI}$ )  
Table 5 Heavy metal  $C_i$  and  $C_{RI}$  in sediment sediments of Qidong coastal region of Jiangsu Province

项 目	单因子污染系数( $C_i$ )/(mg·kg <sup>-1</sup> )							综合污染系数( $C_{RI}$ )
	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	
平均值	1.14	0.98	1.44	1.94	1.35	4.57	0.68	12.09
最小值(站位)	0.76(2)	0.09(3)	1.23(7)	1.59(9)	1.12(8)	3.76(6)	0.53(7)	10.36
最大值(站位)	1.938(5)	2.63(5)	1.71(4)	2.40(3)	1.75(5)	5.38(3)	0.84(3)	15.73

江苏启东近海沉积物重金属潜在生态风险指数如表 6 所示,结果显示单因子潜在生态风险指数( $E_i$ )值由高到低依次为 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr、Zn,除了重金属 Hg 元素  $E_i$  平均值为 39.085,仅有 5 号站位大于 80,总体处于中低生态风险. 重金属元素 Cd 的  $E_i$  值范围为 112.86~161.43,平均值为 139,总体处于中等或重度的生态风险外,其它重金属元素的  $E_i$  值均低于 30,沉积物重金属潜在生态风险较低. 江苏启东近海沉积物综合潜在生态风险指数  $E_{RI}$  值范围为 165.92~299.80,平均值为 207.07,处于中等的潜在生态风险. 而在这些重金属元素中,Cd 的污染系数和潜在生态风险指数均较高,表明重金属 Cd 元素是江苏启东近海沉积物污染的主要元素,也是该区域潜在生态风险高的主要贡献元素.

表 6 江苏启东近海沉积物重金属潜在生态风险指数  
Table 6 Potential ecological risk index of heavy metals in sediments of Qidong coastal region of Jiangsu Province

项 目	单因子潜在生态风险指数( $E_i$ )/(mg·kg <sup>-1</sup> )							综合潜在生态风险指数( $E_{RI}$ )
	As	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	
平均值	11.36	39.09	7.22	9.71	1.35	137	1.35	207.07
最小值(站位)	7.58(2)	3.78(3)	6.13(7)	7.94(9)	1.12(8)	112.86(6)	1.07(7)	165.92
最大值(站位)	19.38(5)	105.22(5)	8.56(4)	12.02(3)	1.75(5)	161.43(3)	1.68(3)	299.80

3 结论

本文选取江苏启东近海表层沉积物样品,结合空间分析、地累积指数方法和潜在生态风险指数方法,研究了海域重金属的污染、空间分布和生态风险. 结果表明:

- (1)江苏启东近岸海域沉积物重金属元素的质量符合 GB 18668—2002《海洋沉积物质量》规定的一类标准,沉积物质量总体呈现好的状态. 但通过与该区域自然背景值相比,As、Cu、Pb、Zn 和 Cd 含量均高于其重金属元素含量的背景值,表明这些元素对该区域生态环境状况存在着轻微的污染.
- (2)江苏启东近海表层沉积物重金属元素在空间分布上存在着显著的差异,其中重金属 Pb、Cr 和 Cd 元素总体呈现出由北向南递减的趋势,表现为蒿枝港口以北海域重金属含量偏高,南侧海域一侧海域重金属含量较低,而重金属 As、Hg 均在蒿枝港至塘芦港之间和协兴河口外侧以南海域重金属呈现高值,可能与蒿枝港、协兴河口和长江入海河口所带的污染物有关.

(3)江苏启东近海沉积物重金属元素污染程度由高到低依次为Cd、Pb、Cu、Zn、As、Hg、Cr,除了重金属Cd元素污染度属于中度污染外,其它重金属元素在启东海域显示无污染特征. 重金属综合污染系数和综合潜在生态风险指数平均值分别为12.09和207.07,沉积物重金属污染处于中低生态风险水平.

#### [参考文献](References)

- [1] 王颖,季小梅. 中国海陆过渡带——海岸海洋环境特征与变化研究[J]. 地理科学,2011,31(2):129-135.
- [2] XU G, PEI S F, LIU J, et al. Surface sediment properties and heavy metal pollution assessment in the near-shore area, north Shandong Peninsula[J]. Marine Pollution Bulletin, 2015, 95(1):395-401.
- [3] KUMAR, BALWANT, SINGH, et al. Pathways of heavy metals contamination and associated human health risk in Ajay River basin, India[J]. Chemosphere: Environmental Toxicology and Risk Assessment, 2017.
- [4] CHAPMAN P M, WANG F Y, ADAMS W J, et al. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids[J]. Environmental Science and Technology, 1999, 33(22):3937-3941.
- [5] WRIGHT P, MASON C F. Spatial and seasonal variation in heavy metals in the sediments and biota of two adjacent estuaries, the Orwell and the Stour, in eastern England[J]. Science of the Total Environment, 1999, 226(2/3):139-156.
- [6] HUANG R Q, LIU Q, ZHAO Y F, et al. Pollution status of polycyclic aromatic hydrocarbons in surface sediments off the Jiangsu coastal zone, East China: A case study of Rudong[J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 166:112253.
- [7] 周超凡,袁广旺,彭模,等. 江苏启东邻近海域氮磷营养盐分布特征、组成及营养水平评价[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(1):104-110.
- [8] 华秀红,王进,韩岚,等. 启东海域海洋生物污染调查评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2006, 29(1):89-92.
- [9] 季晓,徐钊,刘材材,等. 江苏启东近岸海域大型底栖动物群落健康评价[J]. 海洋渔业, 2016, 38(4):348-363.
- [10] FRANCO-URIA A, LÓPEZ-MATEO C, ROCA E, et al. Source identification of heavy metals in pastureland by multivariate analysis in NW Spain[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/2/3):1008-1015.
- [11] OZKAN E Y, BUYUKISIK B. Geochemical and statistical approach for assessing heavy metal accumulation in the southern black sea sediments[J]. Ekoloji, 2012, 21(83):11-24.
- [12] ZHAO Y F, XU M, LIU Q, et al. Study of heavy metal pollution, ecological risk and source apportionment in the surface water and sediments of the Jiangsu coastal region, China: A case study of the Sheyang Estuary[J]. Marine Pollution Bulletin, 2018, 137:601-609.
- [13] DAI L J, WANG L Q, LI L F, et al. Multivariate geostatistical analysis and source identification of heavy metals in the sediment of Poyang Lake in China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 621:1433-1444.
- [14] BUCCOLIERI A, BUCCOLIERI G, CARDELLICCHIO N, et al. Heavy metals in marine sediments of Taranto Gulf (Ionian Sea, Southern Italy)[J]. Marine Chemistry, 2006, 99(1/2/3/4):227-235.
- [15] 陈邦本,胡蓉卿,陈铭达. 江苏海涂土壤环境元素的自然背景值[J]. 南京农业大学学报, 1985, 8(3):54-60.
- [16] ABRAHIM G M S, PARKER R J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, 136(1/2/3):227-238.
- [17] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8):975-1001.
- [18] 丁喜桂,叶思源,高宗军. 近海沉积物重金属污染评价方法[J]. 海洋地质动态, 2005(8):31-36, 38.
- [19] CHEN Y, LIU Q, XU M, et al. Inter-annual variability of heavy metals pollution in surface sediments of Jiangsu coastal region, China: Case study of the Dafeng Port[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 150:110720.
- [20] 孟昆,徐敏,徐文健,等. 海州湾北部沉积物重金属来源解析及污染评价[J]. 南京师大学报(自然科学版), 2018, 41(2):99-106.
- [21] WU G H, SHANG J M, PAN L, et al. Heavy metals in surface sediments from nine estuaries along the coast of Bohai Bay, Northern China[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 82(1/2):194-200.
- [22] ZHANG W, FENG H, CHANG J, et al. Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes. [J]. Environmental Pollution, 2009, 157(5):1533-1543.

[责任编辑:陈 庆]