

如东滩涂近岸海域沉积物重金属分布特征及风险评价

周超凡^{1,2}, 矫新明^{1,2}, 董冰洁^{1,2}, 张晓昱^{1,2}, 吕赢^{1,2}, 郑江鹏^{1,2}

(1. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019; 2. 江苏省海洋环境监测预报中心, 江苏 南京 210019)

摘要: 基于2017和2019年如东滩涂近岸海域沉积物重金属调查数据, 探讨该海域沉积物重金属的分布特征, 通过重金属与环境因子的相关性分析, 研究影响重金属分布的控制因素。采用地累积指数法和潜在生态风险指数法评估其污染程度和潜在生态风险。结果表明, 铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、铬(Cr)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)平均质量分数分别为9.42, 51.3, 15.2, 55.6, 0.09, 0.006和7.71 mg/kg。整体来看, Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg的高值区主要分布在河口邻近海域。Cu、Pb、Cd、Zn、Hg、Cr的来源可能高度相似, 有机碳与粒度是其分布的主要控制因素, As的来源与分布则比较特殊。7种重金属的潜在生态风险指数排序为: Cd > Hg > As > Pb > Cu > Cr > Zn, 其中Cd是主要的生态危害因子。

关键词: 近岸海域; 沉积物; 重金属; 分布特征; 生态风险; 如东

中图分类号: X82

文献标志码: B

文章编号: 1674-6732(2022)02-0025-07

Distributions and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of the Tidal Flat Coastal Areas in Rudong

ZHOU Chao-fan^{1,2}, JIAO Xin-ming^{1,2}, DONG Bing-jie^{1,2}, ZHANG Xiao-yu^{1,2}, LV Ying^{1,2}, ZHENG Jiang-peng^{1,2}

(1. Jiangsu Provincial Environmental Monitoring Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China; 2. Jiangsu Marine Environmental Monitoring Forecasting Center, Nanjing, Jiangsu 210019, China)

Abstract: Based on the survey data of heavy metals in the sediments of the tidal flat coastal areas in Rudong City in 2017 and 2019, the distribution characteristics of heavy metals in the sediments were studied. By analyzing the relationships between heavy metals and environmental factors, the controlling factors that affect the distribution of heavy metals were discussed. The pollution characteristics and the ecological risk were evaluated by the geo-accumulation index method and Hakanson potential ecological risk index method. The results showed that the average concentrations of Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Hg and As were 9.42, 51.3, 15.2, 55.6, 0.09, 0.006 and 7.71 mg/kg, respectively. The concentrations of Cu, Zn, Pb, Cr, Cd and Hg were higher around the estuary and its adjacent areas. The main sources of Cu, Pb, Cd, Zn, Hg and Cr may be highly similar. The total organic carbon and grain-size of sediments were important factors for the distributions of heavy metals except for As. The potential ecological risk levels were Cd > Hg > As > Pb > Cu > Cr > Zn, and Cd contributed the most.

Key words: Tidal flat coastal areas; Sediment; Heavy metals; Distribution characteristics; Ecological Risk; Rudong

重金属是一类保守性、非降解的元素型污染物^[1]。地壳岩石风化、海底火山喷发等是重金属主要的天然来源, 人为来源则包括工业污水、石油燃烧释放等^[2]。调查研究表明, 随着社会经济的高速发展, 人类活动产生的重金属等污染物会进入海洋造成污染, 进而通过食物链

对人类健康造成直接危害和潜在影响^[3-5]。沉积物中重金属具有持久性、蓄积性和生物毒性等特点^[6]。相比水体重金属浓度的变动性, 海洋沉积物作为重金属储库, 对其开展研究具有重要意义。

现着重分析近年来如东滩涂近岸海域沉积物

收稿日期: 2021-10-15; 修订日期: 2021-11-04

基金项目: 江苏省环境监测科研基金资助项目(2119, 2001); 江苏省生态环境科研课题基金资助项目(2019005, 2020010, 2020009)

作者简介: 周超凡(1988—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事海洋环境监测工作。

中重金属的分布特征,采用地累积指数法^[7]和潜在生态风险指数法^[8]评价其污染程度与潜在生态风险水平,以期为该海域的海洋环境污染治理提供理论依据和数据支撑。

1 研究区概况

如东地处江苏省东南部,长江三角洲北翼,是江苏省的滩涂大县,海平面以上滩涂面积为800 km²,分别占全省滩涂面积的1/9,南通市滩涂面积的1/2^[9]。如东近岸海域属于世界罕见的辐射沙洲区域,是吕泗渔场的重要组成部分,是江苏省重要的紫菜、贝类养殖区,其中文蛤资源在国内占首位。《全国海洋功能区划》(2011—2020年)显示,该区域处于农渔业区、工业与城镇用海区、港口航运区交汇区,人类开发活动密集,生态环境脆弱,同时具有河海水混合、水动力状况复杂的特点。

如东主要入海河流有栟茶河和掘苳河,2015和2017年平均入海径流量分别为 9.8×10^8 和 4.1×10^8 m³,在江苏主要入海河流径流量统计中排名靠前。主要物流港口为洋口港,渔业港口有洋口渔港、刘埠渔港、东凌渔港。詹文毅等^[10]指出,由于重金属污染,如东文蛤发生大面积死亡。张博等^[11]通过调查指出,如东滩涂养殖区沉积物中重金属处于轻微生态危害水平,且靠近排污口的区域危害程度较重,污染来源可能是工业点源排污和交通运输等^[12]。彭修强等^[13]评价南黄海南部沉积物重金属结果显示,镉(Cd)、铅(Pb)、铬(Cr)在近岸局部地区已成面状富集。

2 研究方法

2.1 监测时间、项目与点位布设

监测时间:于2017和2019年开展了3个航次的监测,其中2017年秋季监测1次,2019年春、秋季各监测1次。

监测项目:铜(Cu)、Pb、Cd、锌(Zn)、Cr、汞(Hg)、砷(As)、粒度、有机碳。

点位布设:13个沉积物点位示意图1。

2.2 采样依据与分析方法

采样依据:按照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《近岸海域环境监测规范》(HJ 442—2008)对表层沉积物进行采集、贮存与运输。

分析方法:Hg、As采用《海洋监测规范 第5部

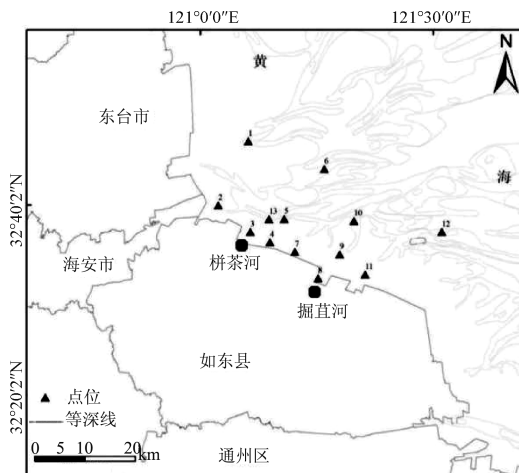


图1 沉积物点位示意

分:沉积物分析》(GB 17378.5—2007)的原子荧光法分析;Cu、Pb、Zn、Cr、Cd采用《海洋监测技术规范 第2部分:沉积物》(HY/T 147.2—2013)的电感耦合等离子体质谱法分析;粒度采用《海洋调查规范 第8部分:海洋地质地球物理调查》(GB/T 12763.8—2007)的激光粒度法分析;有机碳采用《GB 17378.5—2007》的重铬酸钾氧化-还原容量法分析。采用近海海洋沉积物(GBW07314)和黄海海洋沉积物(GBW07333)标准样品(国家海洋局第二海洋研究所)进行质量控制,按照标准物质不确定度要求进行统计分析,各类重金属误差均<不确定度的3倍,Cu回收率为76%~106%,Pb回收率为95%~102%,Cd回收率为90%~110%,Zn回收率为87%~96%,Cr回收率为95%~104%,Hg回收率为113%~119%,As回收率为95%~104%。

2.3 数据分析与评价

使用ArcGIS 10.5软件绘制点位及重金属质量分数分布图,采用EXCEL软件处理各监测指标平均值和变异系数等。采用地累积指数法对研究区域进行重金属污染程度评价,见式(1)。

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (K \times B_n)] \quad (1)$$

式中: I_{geo} ——地累积污染指数,评价分级标准见表1; C_n ——元素 n 在沉积物中的实测质量分数,mg/kg; B_n ——元素 n 的地球化学背景值,mg/kg; K ——考虑成岩作用可能引起背景值的变动而取的系数,通常为1.5。

利用瑞典学者Hakanson提出的潜在生态风险指数法对沉积物重金属的生态风险进行评价,见式(2)—(4)。

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

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

$$RI = \sum E_r^i \quad (4)$$

式中: C_f^i ——第 i 种重金属的污染指数;
 C^i ——第 i 种重金属的实测质量分数, mg/kg;
 C_n^i ——第 i 种重金属的背景值质量分数, mg/kg;
 E_r^i ——第 i 种重金属的单因子潜在生态风险指数;
 T_r^i ——第 i 种重金属的毒性系数, 表示重金属的毒性水平和生物对重金属污染的敏感程度 (Cu, Zn, Pb, Cr, Cd, Hg, As 分别取值 5, 1, 5, 2, 30, 40, 10); RI——综合潜在生态风险指数, 评价分级标准见表 2。本文所用沉积物重金属背景值引自参考文献[14]。

表1 地累积指数分级标准

I_{geo}	级别	污染程度
≤ 0	0	无污染
0 ~ 1	1	轻度污染
1 ~ 2	2	偏中度污染
2 ~ 3	3	中度污染
3 ~ 4	4	偏重污染
4 ~ 5	5	重污染
≥ 5	6	严重污染

表2 潜在生态风险指数分级标准

单因子潜在生态风险		综合潜在生态风险	
E_r^i	风险程度	RI	风险程度
< 40	低	< 150	低
40 ~ 80	中	150 ~ 300	中
80 ~ 160	较高	300 ~ 600	较高
160 ~ 320	高	≥ 600	很高
≥ 320	很高		

3 结果与讨论

3.1 沉积物中重金属质量分数及平面分布特征

3.1.1 质量分数特征

2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积

物中重金属监测结果见表 3。由表 3 可见, Cu、Pb、Cd、Zn、Cr、Hg、As 的质量分数分别为 7.17 ~ 13.2, 13.7 ~ 17.7, 0.08 ~ 0.10, 41.4 ~ 71.7, 47.4 ~ 61.9, 0.003 ~ 0.014, 6.23 ~ 11.8 mg/kg, 平均质量分数为 9.42, 15.2, 0.09, 51.3, 55.6, 0.006, 7.71 mg/kg, 均低于《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668—2002) 一类标准值。Pb、Cd、Zn、As 平均质量分数超过背景值, 分别是背景值的 1.33, 2.14, 1.09, 1.04 倍, 表明这 4 种重金属在沉积物中有一定富集。各点位中 Cu、Hg 的质量分数均低于背景值, 有 3 个点位 Cr 的质量分数超过背景值。Cu、Cd、Pb、As 平均质量分数调查结果与文献[9]基本一致。与连云港、盐城近岸海域相比, 如东近岸海域沉积物中 Cr、Hg 平均质量分数高于海州湾北部海域(2014 年)^[15], 但 7 种重金属平均质量分数均低于盐城北部海域(2014 年)^[16]。

3.1.2 平面分布特征

用 ArcGIS 10.5 空间分析工具插值法处理重金属数据, 通过自然间断点分级法得到 8 个分级标准^[17]。2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属平面分布见图 2(a)~(g)。由图 2 可见重金属整体分布趋势表现为近岸高、离岸低, 并且高值区主要位于河口邻近海域 (As 除外), 具体分布如下: ω (Pb) 最高值位于栟茶河口 13 号点位; ω (Zn)、 ω (Hg) 最高值位于掘苴河口 8 号点位; ω (Cd)、 ω (Cu) 最高值位于栟茶河口邻近海域的 3 号点位; ω (Cr) 最高值位于太阳岛港口码头邻近海域的 12 号点位, ω (Cr) 高值区主要分布在太阳岛港口码头以及掘苴河口邻近海域; ω (As) 最高值位于研究区域中部的 10 号点位, 其分布规律与其他重金属不一致。研究表明, As 的分布受陆源影响不显著, 可能与区域地质背景含量控制等因素有关^[18]。如东近岸海域沉积物中重金属在河口邻近

表3 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属监测结果

项目	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Hg	As
平均值/(mg · kg ⁻¹)	9.42	15.2	0.09	51.3	55.6	0.006	7.71
最大值/(mg · kg ⁻¹)	13.2	17.7	0.10	71.7	61.9	0.014	11.8
最小值/(mg · kg ⁻¹)	7.17	13.7	0.08	41.4	47.4	0.003	6.23
变异系数/%	20.1	8.3	8.8	17.9	8.3	45.9	19.3
一类标准/(mg · kg ⁻¹)	35.0	60.0	0.5	150.0	80.0	0.2	20.0
背景值 ^[14] /(mg · kg ⁻¹)	15.02	11.40	0.042	47.15	60.11	0.023	7.38
海州湾北部海域平均值 ^[15] /(mg · kg ⁻¹)	20.23	29.46	0.11	84.92	42.38	0.005	9.18
盐城北部海域平均值 ^[16] /(mg · kg ⁻¹)	24.98	22.54	0.25	71.84	63.63	0.1	15.49

海域形成高值区,反映了河口区陆源污染输入可能是重金属的重要污染源。河口区以径流作用为主,由于水流平面扩散以及海水顶托作用^[19-20],重金属随泥沙迅速沉降,形成河口高值区。而离岸区域位于苏北海浪作用较大的浅滩区域,水深较浅,最浅处水深仅 1 m,低潮时可露出水面,潮水往复

流动导致沉积物不断移动。

变异系数反映了重金属空间分布的差异程度,>36% 为高度变异。变异系数越大,表明重金属分布越不均匀,可能主要受到人为来源的控制^[22]。结果显示,Hg 变异系数为 45.9%,在平面分布上为高差异性,其余重金属具有一定的空间差异性。

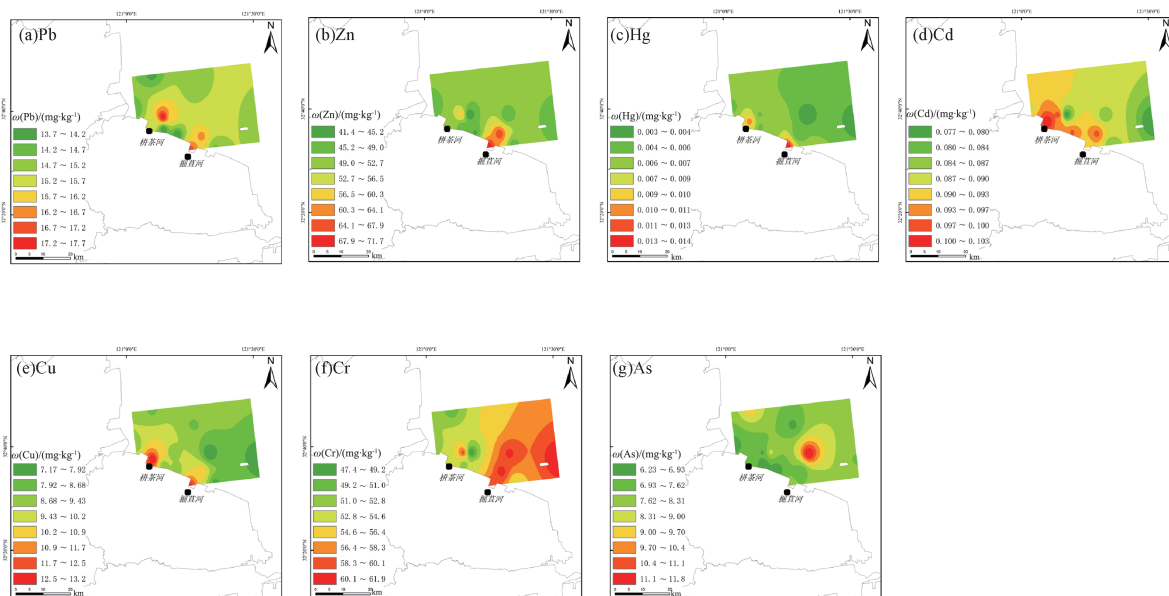


图 2 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属平面分布

3.2 沉积物中重金属、粒度及有机碳相关性分析

通过重金属之间及其与环境因子的相关性分析,可了解重金属之间的来源特点及控制因素^[22]。2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属、有机碳、粒度的相关性见表 4。

由表 4 可见,Cu、Pb、Cd、Zn、Hg、Cr 两两之间均为显著正相关,说明这 6 种重金属来源具有高度一致性。As 与其他重金属、粒度、有机碳之间没有显著相关规律,说明其来源与分布控制因素和其他 6 种重金属不同,这与 3.1.2 节中 As 分布特征的特殊性一致。

有机碳与 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr、Hg 呈显著正相关,表明有机碳对沉积物重金属的质量分数及分布有着重要影响。沉积物中重金属与有机质存在相互促进累积的作用,重金属质量分数高,微生物活性下降从而导致有机质增多。在颗粒态有机质累积作用下,减少了重金属的流失,从而对重金属产生蓄积作用^[23-24]。

2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物粒度分布见图 3。由图 3 可见,沉积物主要由砂、粉砂、黏土构成,其中砂平均占比为 72.4% (粒径为 0.063 ~ 2 mm),粉砂平均占比为 23.5% (粒径为 0.004 ~ 0.063 mm),黏土平均占比为 4.1% (粒径 < 0.004 mm)。砂含量高的 10,12 号点位位于离岸区域,黏土含量高的 8,9 号点位位于掘苴河口处。有机碳与黏土呈显著正相关,与砂呈显著负相关,说明越靠近河口区,受人类活动影响越大,黏土与有机质含量越高。砂与 Cu、Cd、Zn、Hg、Pb、Cr 呈显著负相关;粉砂与 Cu、Cd、Hg、Cr、Zn 呈显著正相关;黏土与 Cu、Pb、Zn、Hg、Cd、Cr 呈显著正相关。说明沉积物粒径越小,表面积越大,对重金属的富集作用越强^[25],而粗颗粒物则相反,反映了粒度也是沉积物重金属质量分数及分布的控制因素。

3.3 沉积物中重金属污染及生态风险评价

3.3.1 地累积指数法评价

2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积

表 4 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属、粒度、有机碳的相关性^①

要素	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	有机碳	砂	粉砂	黏土
Cu	1										
Zn	0.828**	1									
Pb	0.781**	0.901**	1								
Cd	0.763**	0.689**	0.534**	1							
Cr	0.578**	0.717**	0.654**	0.691**	1						
Hg	0.681**	0.460**	0.382*	0.512**	0.326*	1					
As	-0.075	0.109	0.043	-0.155	-0.023	-0.166	1				
有机碳	0.836**	0.774**	0.746**	0.601**	0.569**	0.407*	0.030	1			
砂	-0.571**	-0.463**	-0.396*	-0.606**	-0.437**	-0.435**	0.120	-0.578**	1		
粉砂	0.442**	0.328*	0.258	0.544**	0.340*	0.369*	-0.122	0.427**	-0.976**	1	
黏土	0.776**	0.719**	0.681**	0.603**	0.590**	0.496**	-0.078	0.848**	-0.760**	0.599**	1

①**表示在 0.01 级别(双尾),相关性显著;*表示在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

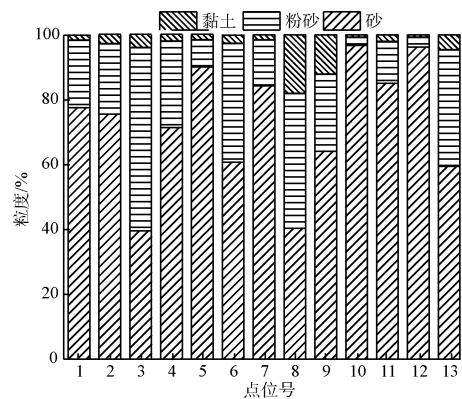


图 3 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物粒度分布

物中重金属地累积指数统计结果见表 5。由表 5 可见,7 种重金属污染程度由高到低依次为: Cd、Pb、Zn、As、Cr、Cu、Hg。从单个重金属来看,Cd 污染程度最高,平均地累积指数为 0~1,总体污染级别为轻度污染;Pb 平均地累积指数<0,但栟茶河口邻近海域 13 号点位的地累积指数为 0~1;Zn 平均地累积指数<0,但掘苴河口邻近海域 8 号点位的地累积指数为 0~1;As 平均地累积指数<0,但研究区域中部 10 号点位的地累积指数为 0~1。因此,Pb、Zn、As 总体属于无污染—轻度污染;Cr、Cu、Hg 平均地累积指数均<0,表明未受到污染。

表 5 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属地累积指数法评价结果

统计指标	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Hg	As
平均值	-1.28	-0.17	0.52	-0.48	-0.70	-2.55	-0.54
最大值	-0.77	0.05	0.71	0.02	-0.54	-1.29	0.09
最小值	-1.65	-0.32	0.29	-0.77	-0.93	-3.49	-0.83

3.3.2 潜在生态风险指数法评价

2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属潜在生态风险指数统计结果见表 6。由表 6 可见,重金属单因子潜在生态风险从高到低依次为: Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr、Zn。其中,Cd 的单因子潜在生态风险指数为 55.1~73.6(在 40~80 之间),因此 Cd 全部点位属于中生态风险。Hg、Cu、Pb、Zn、Cr、As 全部点位的单因子潜在生态风险指数均<40,属于低生态风险。

综合潜在生态风险指数为 84.0~116.4,平均值为 98.8(<150),因此研究区域属于低生态风险。7 种重金属中,Cd 的贡献占比最大(平均占比

为 65.4%)。由于 Cd 的生物毒性极强、生物累积性强^[26],结合地累积指数评价结果,Cd 是该区域最主要的生态危害因子。

根据已有研究成果^[12,15,22,27-28]并结合研究区域实际情况,陆源污染输入是沉积物中重金属的重要来源。Zn 的主要来源为工业排污;挥发性金属 Hg 主要通过大气沉降进入海洋;As 的来源包括农业农药的使用以及生活洁厕剂、洗洁精的使用等;Cd 的来源主要是化肥农药的生产与施用,同时燃油排放也产生微量的 Cd;Pb 是交通运输排放的标志元素。

2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属综合潜在生态风险指数分布见图 4。

由图 4 可见,重金属综合潜在生态风险指数平面分布特征为近岸高、离岸低,栟茶河、掘苴河河口的邻近海域风险相对较高,建议加强所有重金属尤其是

Cd 的陆源污染排放监管与溯源治理,主要对化肥农药的生产与施用以及港口航运、港口疏浚等人为活动加强管控。

表 6 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属潜在生态风险指数评价结果

统计指标	单因子潜在生态风险指数 (E_i^r)							综合潜在生态风险指数 (RI)
	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	Hg	As	
平均值	3.14	6.68	64.6	1.09	1.85	11.1	10.5	98.8
最大值	4.40	7.77	73.6	1.52	2.06	24.6	16.0	116.4
最小值	2.39	5.99	55.1	0.88	1.58	5.36	8.45	84.0

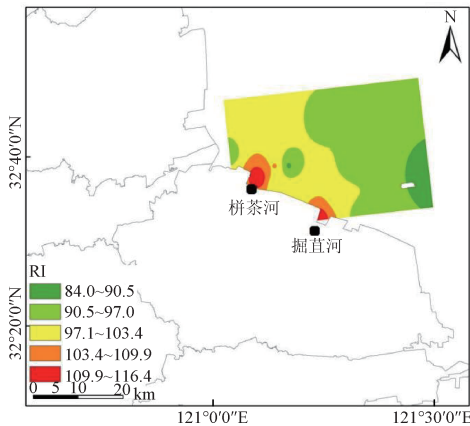


图 4 2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中重金属综合潜在生态风险指数分布

4 结论

(1)2017 和 2019 年如东滩涂近岸海域表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd、Hg、As 的质量分数平均值分别为 9.42,51.3,15.2,55.6,0.09,0.006 和 7.71 mg/kg。平面分布上整体呈现近岸高、离岸低的特点,并且在河口邻近海域形成高值区(As 除外),反映了河口区陆源污染输入可能是沉积物中重金属的重要污染源。

(2)相关性分析结果显示,Cu、Pb、Cd、Zn、Hg、Cr 两两之间均为显著正相关,说明 6 种重金属来源具有高度一致性。有机碳、黏土均与 Cu、Cd、Zn、Pb、Cr、Hg 呈显著正相关,说明有机碳与粒度是其分布的主要控制因素,As 的来源与分布则比较特殊。

(3)地累积指数法评价结果表明,Cd 污染程度最高,7 种重金属污染程度由高到低依次为:Cd、Pb、Zn、As、Cr、Cu、Hg。单因子潜在生态风险指数评价结果表明,7 种重金属生态风险水平由高到低依次为:Cd、Hg、As、Pb、Cu、Cr、Zn,其中 Cd 是该区

域最主要的生态危害因子。综合潜在生态风险指数法评价结果表明,研究区域属于低生态风险,风险相对较高的区域主要分布在栟茶河、掘苴河河口的邻近海域。

[参考文献]

[1] 王长友. 东海 Cu、Pb、Zn、Cd 重金属环境生态效应评价及环境容量估算研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2008.

[2] 王亚梦. 莱州湾南岸典型河口沉积物重金属空间分布特征及来源解析[D]. 济南:山东师范大学,2020.

[3] 王萧,张文思,迟光希,等. 辽东湾及其附近海域重金属污染研究进展[J]. 环境化学,2019,38(10):2317-2326.

[4] 周超凡,矫新明,毛成贵,等. 灌河口近岸海域春季海洋环境现状调查[J]. 广东海洋大学学报,2018,38(5):27-34.

[5] 王菊英,姚子伟. 海洋生态环境监测技术方法[M]. 北京:海洋出版社,2018:2-3.

[6] BASTAMI K D, BAGHERI H, KHEIRABADI V, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments along southeast coast of the Caspian Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 81(1):262-267.

[7] MULLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine river[J]. Geo 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] 廖勇,黄厚见,李磊,等. 江苏如东贝类养殖区重金属的含量分布特征及潜在生态风险评价[J]. 中国环境监测,2012,28(6):4-9.

[10] 詹文毅,王南平,叶辉,等. 江苏如东文蛤大面积死亡原因探究[J]. 海洋水产研究,2003,24(4):62-65.

[11] 张博,郑青松,赵耕毛,等. 基于 GIS 和地统计学的滩涂增殖养殖区沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学,2011,30(3):376-379.

[12] 李磊,王云龙,蒋玫,等. 江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性[J]. 环境科学,2012,33(8):2607-2613.

- [13] 彭修强, 项立辉, 郭娜, 等. 南黄海南部海域表层沉积物重金属来源解析及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3628–3638.
- [14] 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.
- [15] 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]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(2): 99–106.
- [16] 欧阳凯, 闫玉茹, 项立辉, 等. 盐城北部潮间带表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(2): 256–263.
- [17] 卢霞, 范礼强, 包诗玉, 等. 海州湾连岛周边海域沉积物重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2020, 39(4): 570–575.
- [18] 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.
- [19] 刘志杰, 李培英, 张晓龙, 等. 黄河三角洲滨海湿地表层沉积物重金属区域分布及生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(4): 1182–1188.
- [20] 宋晓娟, 贺心然, 陈斌林, 等. 灌河口海域表层沉积物中重金属的污染变化及潜在生态危害[J]. 海洋科学, 2013, 37(5): 25–32.
- [21] 马群, 赵庚星. 集约农区不同土地利用方式对土壤养分状况的影响[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1834–1844.
- [22] 李飞, 徐敏. 海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1035–1040.
- [23] LOSKA K, WIECHUŁA D. Application of principal component analysis for the estimation of source of heavy metal contamination in surface sediments from the Rybnik reservoir[J]. Chemosphere, 2003, 51(8): 723–733.
- [24] 王浩, 章明奎. 污染土壤中有机质和重金属互相作用的模拟研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2009, 35(4): 460–466.
- [25] BORG H, JONSSON P. Large-scale metal distribution in Baltic sea sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32(1): 8–21.
- [26] 段一明, 张戈, 于大海. 辽东湾西北部海域沉积物重金属含量分析及污染评价[J]. 海洋开发与管理, 2020, 37(1): 39–45.
- [27] 张伟燕, 马龙, 吉力力·阿不都外力, 等. 博尔塔拉河地表水重金属来源分析及其污染评价[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 100–106.
- [28] 蓝巧娟, 吴彦, 闫彬, 等. 三峡库区(万州段)消落区沉积物重金属污染评价及来源分析[J]. 环境工程, 2018, 36(8): 193–197.

(上接第24页)

- [28] HENDERSON R K, BAKER A, MURPHY K R, et al. Fluorescence as a potential monitoring tool for recycled water systems: A review[J]. Water Research, 2009, 43(4): 863–881.
- [29] XU R H, OU H S, YU X B, et al. Spectroscopic characterization of dissolved organic matter in coking wastewater during biotreatment: full-scale plant study[J]. Water Science & Technology, 2015, 72(8): 1411–1420.
- [30] 王斯扬. 典型行业废水及环境污染物的藻类毒性效应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- [31] 张瑛, 曹迪, 胡丽萍, 等. 某石化废水的综合毒性评价及其处理工艺对毒性的削减规律研究[J]. 生态毒理学报, 2017, 12(5): 109–118.
- [32] KOHLER A, HELLWEG S, ESCHER B I, et al. Organic Pollutant Removal versus Toxicity Reduction in Industrial Wastewater Treatment: The Example of Wastewater from Fluorescent Whitening Agent Production[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(10): 3395–3401.
- [33] 那春红. 典型二级处理及深度处理组合工艺对工业废水毒性削减性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- [34] DENG M J, ZHANG Y, QUAN X, et al. Acute toxicity reduction and toxicity identification in pigment contaminated wastewater during anaerobic-anoxic-oxic (A/A/O) treatment process[J]. Chemosphere, 2017, 168: 1285–1292.
- [35] MA K, QIN Z, ZHAO Z Q, et al. Toxicity evaluation of wastewater collected at different treatment stages from a pharmaceutical industrial park wastewater treatment plant[J]. Chemosphere, 2016, 158: 163–170.
- [36] YU X, ZUO J N, LI R X, et al. A combined evaluation of the characteristics and acute toxicity of antibiotic wastewater[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2014, 106: 40–45.

栏目编辑 王 湜 谭 艳