海陵湾表层沉积物主要重金属污染特征及其来源解析

唐俊逸, 刘晋涛, 陈鼎豪, 余香英, 罗育池

(广东省环境科学研究院,广东广州 510045)

摘 要:为了解海陵湾表层沉积物主要重金属的污染特征,本研究以2017年11月海陵湾的采样调查为基础,分析了表层沉积物中铜(Cu)、铅(Pb)、锌(Zn)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)和铬(Cr)7种重金属的含量和空间分布特征,利用单因子指数、地累积指数、潜在生态风险指数和一致性沉积物质量基准等指标定量评价了沉积物中重金属的污染特征,利用相关分析和主成分分析探讨了海陵湾表层沉积物中重金属的来源。研究结果显示,除As和Cr外,其余重金属在海陵湾表层沉积物中的含量整体处于较低水平;重金属整体属无污染和轻微生态风险状态,相对污染主要以As、Cr的贡献为主,且这两种重金属的含量在部分站位处于阈值效应含量和可能效应含量之间,有25%~75%的概率引发毒性,产生有害生物效应;Cu、Zn、Cd、Hg和As之间有一定的同源性,主要受地质背景和有机质降解的控制,Pb、Cr和As还分别受到船舶废气、工业废水废气和阳江港煤炭运输的影响。

关键词:海陵湾;沉积物;重金属;污染特征;来源解析

中图分类号: P736; X82 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)03-0392-09

Pollution characteristics and sources analysis of main heavy metals in surface sediments from the Hailing bay

TANG Jun-yi, LIU Jin-tao, CHEN Ding-hao, YU Xiang-ying, LUO Yu-chi (Guangdong Provincial Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China)

Abstract: In order to understand the pollution characteristics of major heavy metals in surface sediments of Hailing bay, based on the sampling survey of Hailing bay in November 2017, this study analyzed the content and spatial distributions of seven heavy metals, and evaluated the marine sediment pollution characteristics by using indicators such as single factor pollution index, geoaccumulation index, heavy metal potential ecological risk and consensus-based sediment quality guidelines. Moreover, the sources of heavy metals in the surface sediments of Hailing bay were analyzed by using correlation analysis and principal component analysis. The results indicated that, except As and Cr, the rest of the heavy metal content in the Hailing bay surface sediments was at a low level as a whole. The heavy metals as a whole are in a state of pollution-free and slightly ecological risk in Hailing bay, and the relative pollution was mainly based on contribution of the contribution of As and Cr. The content of these two heavy metals is between TEC and PEC, with 25% ~ 75% probability of causing toxicity and harmful biological effects. There was a certain homology among the heavy metals in sediments, such as Cu, Zn, Cd, Hg and As, which were mainly controlled by geological background and degradation of organic matter. Pb, Cr and As were also affected by ship exhaust gas, industrial waste gas and coal transportation in Yangjiang port.

Key words: Hailing bay; sediments; heavy metals; pollution characteristics; source analysis

基金项目:广东省重点领域研发计划项目(2020B1111020002): "海底沉积物多参量原位环境监测设备研制及应用示范"

收稿日期:2020-03-19,修订日期:2020-07-28

作者简介:唐俊逸(1991-),男,四川西昌人,工程师,硕士,主要从事海洋生态环境保护和污染物总量控制研究, E-mail: kens_i@163.com

重金属是一种具有累积性和难降解性的典型污染物,能长期停留在水体以及沉积环境中, 具有很强的生物活性和毒性效应,能够通过生物 富集、食物链放大等过程对生物体的健康产生 危害,已成为影响海洋环境的重要污染因素。沉 积物作为污染物的重要载体,可以指示海域的污 染特征,也可以反映自然因素、人类生产活动等 对海域环境的长期影响^[1]。

海陵湾位于粤西海岸中段, 东起江城区平冈 镇海陵湾大桥, 西至阳西县溪头镇东南海岸, 北 为海陵湾近江牡蛎国家级水产种质资源保护区, 东南为海陵岛, 面积约 180 km², 湾内潮间滩地和 潮下浅滩广阔分布, 每年近江牡蛎(*Crassostrea rivularis*)的产量约为 29×10⁴ t, 占广东省总产量的 1/3^[2]。海陵湾水域开阔, 是天然深水湾, 建设有 国家一类对外开放口岸阳江港、省示范性(一 级)渔港闸坡渔港、省二级渔港溪头渔港等港口 码头, 随着沿岸经济和港口运输业的迅速发展, 重金属伴随着工业废水、船舶废气等的排放 进入海域, 给海陵湾生态环境带来了一定的 压力。

虽然近年来国内在各沿海省份已有较多关 于海洋沉积物重金属空间分布、污染特征、来源 分析和生态风险等方面的研究和报道,但对海陵 湾的研究却十分有限。仅丘耀文等^[3-4]应用潜在 生态风险指数法评价了 2001 年海陵湾沉积物重 金属的污染特征和潜在生态危害,受数据有效时 限的影响,已不足以反映海陵湾的实际情况。

本文通过调查分析海陵湾表层沉积物中重 金属的含量,阐明其空间分布特征,综合运用单 因子指数法、地累积指数法、潜在生态风险指数 法和一致性沉积物质量基准法定量评价海陵湾 重金属的污染特征和生物毒性效应,运用 相关分析法和主成分分析法判别重金属的主要 来源。该研究结果可为控制海陵湾重金属风 险、开展海洋生态环境保护和环境规划管理提 供科学依据。

1 材料与方法

 1.1 样品采集和处理 根据随机均匀、重点代表的站位布设原则, 于 2017年11月在海陵湾海域共布设15个沉积 物采样站位(图1),采样站位基本均匀覆盖整个 海域,且优先布设在河流入海口、港口码头、工 业园区、养殖区域等代表性水域。



Fig. 1 Sediment sampling stations of Hailing bay

采样过程中使用抓斗式采泥器进行样品采 集,取未受搅动的上层 0~3 cm 的表层沉积物贮 存于聚乙烯袋中,-20 ℃ 条件下保存。样品经冷 冻干燥处理后去除杂质,使用玛瑙研钵研磨并过 筛 [测定重金属的样品过 160 目筛,测定有机碳 (TOC)的样品过 80 目筛],充分混合均匀备用。

1.2 样品测试

样品测试严格按照《海洋监测规范 第5部分:沉积物分析》(GB 17378.5-2007)执行。

Cu、Pb、Zn、Cd和Cr:取0.1g样品放入30mL 聚四氟乙烯坩埚中,加入硝酸和高氯酸进行消 解,使用原子吸收分光光度法(AA-7000原子吸 收分光光度计)进行测定。

Hg和As:取0.1g样品放入50mL比色管中,加入硝酸和盐酸溶液进行消解,以硼氢化钾为还原剂,分别将离子态汞和三价砷转变为汞蒸 气和砷化氢气体,以氩气为载气使用原子荧光法 (AFS-230E原子荧光光度计)进行测定。

TOC: 取 0.1 g 样品放入试管中, 加入 0.1 g 硫酸银, 10 mL 重铬酸钾-硫酸标准溶液, 在加热条件下采用重铬酸钾氧化-还原容量法进行测定。

对样品进行重复测试(抽取两个样品进行 3次测试,相对标准偏差均小于5%)和标样测试 (标准物质 GBW07314, 加标回收率为 90% ~ 110%) 以保证测试结果的准确性和精度。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子指数法

单因子指数法(single factor pollution index) 是最简单的环境质量指数,利用实测数据和标准 进行对比分类,统计每个因子的超标率或达标 率、超标倍数等结果。其计算公式为:

$$P_i = C_i / S_i \tag{1}$$

式中: *P_i*为重金属 *i* 的单因子指数; *C_i*为重金 属 *i* 的含量; *S_i*为重金属 *i* 的海洋沉积物质量标准。 1.3.2 地累积指数法

地累积指数法(index of geoaccumulation, *I*geo) 是根据重金属含量与地球化学背景值对重金 属污染程度进行定量研究的方法^[5]。其计算公 式为:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(C_i / k B_i \right) \tag{2}$$

式中: *C_i*为重金属 *i* 的含量; *B_i*为重金属 *i* 的 地球化学背景值,本研究以全国海岸带重金属背 景值^[6] 作为地球化学背景值,Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、 As 和 Cr 分别为 30 mg/kg、25 mg/kg、80 mg/kg、 0.5 mg/kg、0.2 mg/kg、10 mg/kg 和 60 mg/kg; *k* 为 背景值的变动系数,一般取 1.5。地累积指数与 污染程度分级的关系如表 1 所示^[7]。

表 1 地累积指数与污染程度分级关系 Tab.1 The relationship between *I*_{geo} and pollution grades

I _{geo}	级别	污染程度
I _{geo} <0	0	无污染
$0 \leq I_{geo} \leq 1$	1	轻度污染
$1 \leq I_{geo} \leq 2$	2	偏中度污染
$2 \leq I_{geo} < 3$	3	中度污染
$3 \leq I_{geo} < 4$	4	偏重污染
$4 \leq I_{geo} < 5$	5	重污染
$I_{\rm geo} \ge 5$	6	严重污染

1.3.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数法(the potential ecological risk index, *RI*)是综合考虑沉积物中重金属的种类、含量和毒性水平的定量评价方法^[8]。其计算公式如下:

$$E_i^r = T_i^r \times \left(C_i/C_i^r\right) \tag{3}$$

$$RI = \sum E_i^r = \sum T_i^r \times \left(C_i/C_i^r\right) \tag{4}$$

式中: *C_i*为重金属 *i* 的含量; *C_i*为重金属 *i* 的 背景值, 与地累积指数计算选用的背景值一致, 为全国海岸带重金属背景值; *T_i*为重金属 *i* 的毒 性响应系数, Cu 为 5, Pb 为 5, Zn 为 1, Cd 为 30, Hg 为 40, As 为 10, Cr 为 2^[8]; *E_i*为重金属 *i* 的潜 在生态风险系数; *RI* 为潜在生态风险指数。重金 属污染潜在生态危害系数分级如表 2 所示^[9]。

表 2 潜在生态风险分级

1 ab.2 The classification of potential ecological fisk	Tab.2	The classification of	potential	ecological	risk
--	-------	-----------------------	-----------	------------	------

生态危害程度	E_i^r	RI
轻微生态风险	$E_{i}^{r} < 40$	<i>RI</i> <150
中等生态风险	$40 \le E_i^r \le 80$	150≤ <i>RI</i> <300
较高生态风险	$80 \leq E_i^r \leq 160$	300≤ <i>RI</i> <600
高生态风险	$160 \le E_i^r < 320$	<i>RI</i> ≥600
极高生态风险	$E_i^r \ge 320$	

1.3.4 一致性沉积物质量基准法

一致性沉积物质量基准法(consensus-based sediment quality guidelines, CBSQGs)是预测沉积 物生物毒性风险的重要评价方法^[10]。对于每一种重金属, CBSQGs 都包括阈值效应含量(threshold effect concentration, *TEC*)和可能效应含量(probable effect concentration, *PEC*)。

当沉积物中重金属含量低于 TEC 时,毒性发 生概率通常低于 25%,可认为其不会产生有害生物 效应;重金属含量高于 PEC 时,毒性发生的概率 通常高于 75%,有害生物效应发生的可能性较大。 重金属一致性沉积物基准值如表 3 所示^[11]。

表 3 重金属一致性沉积物基准值 Tab 3 CBSOGs of heavy metals

140.5	025000000000000000000000000000000000000	i cuito
丢人屋	CBS	QGs值
里金周	TEC	PEC
Cu	38.2	214.6
Pb	53.0	296.0
Zn	153.5	396.2
Cd	1.04	5.76
Hg	0.18	0.66
As	16.1	54.3
Cr	78.3	268.5

1.4 统计分析方法

利用 WPS 和 Origin 9.0 进行数据处理和图 表制作,利用 Arcgis 10.2 绘制采样站位和重金属 含量空间分布图,利用 SPSS 19.0 对测试结果进 行 Pearson 相关性分析和主成分分析(principal component analysis, PCA)。主成分分析中, Kaiser-Meyer-Olkin(*KMO*)值和 Bartlett 球形检验概率 值分别为 0.747 和 0,表示主成分分析结果可信。

2 结果与讨论

2.1 重金属空间分布特征

海陵湾表层沉积物中重金属和 TOC 的含量 及其空间分布特征的统计分析结果(表 4)显示, 重金属含量顺序为 Cr>Zn>Pb>As>Cu>Cd>Hg, 其中, Cr 的含量最高,为11.50~106.50 mg/kg,平均含量为44.90 mg/kg, Hg 的含量最低,为0.01~0.07 mg/kg,平均含量为0.02 mg/kg。与国内其他海域(表5)相比,除 As 和 Cr 外,海陵湾表层沉积物重金属含量基本处于较低水平, As 含量与渤海湾、江苏近岸海域等处于同一水平,远低于珠江口, Cr 含量与舟山海域和珠江口等处于同一水平,较渤海湾、江苏近岸海域低。

从变异系数来看, Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As、 Cr和TOC变异系数为0.49~0.74,均大于0.36, 属于高度变异,说明这7种重金属和TOC在各 站位的含量分布不均匀,空间差异性较大。

表 4 海陵湾沉积物重金属 (mg/kg) 和 TOC(%) 含量与空间分布统计特征

Tab.4 The statistical characteristics of heavy metals (mg/kg) and TOC (%) in sediments of Hailing bay and the comparisons with similar studies

TOC
1.44
0.04
0.59
0.40
0.68
) () (

注:变异系数无量纲,其中部分站位Cu和Cd未检出,本研究按检出限的1/2进行统计分析

表 5 不同海域表层沉积物重金属 (mg/kg) 含量比较

Tab.5 Comparison of heavy metal concentrations (mg/kg) in the surface sediments of different sea area

研究海域	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
渤海湾[12]	19.99	24.03	66.15	0.20	0.04	9.18	57.95
江苏近岸海域[13]	18.30	20.70	53.00	0.11	0.02	14.80	64.0
舟山海域 ^[14]	26.09	24.22	73.72	0.10	0.05	4.70	43.07
红海湾[9]	6.29	25.44	57.87	0.03	0.07	7.97	15.32
珠江口[15]	37.40	37.00	78.50	0.26	/	93.20	41.40

沉积物重金属和 TOC 含量的空间分布结果 (图 2)表明,海陵湾表层沉积物中 Cu、Zn、Cd、 Hg、As 和 TOC 含量的空间分布基本一致,总体 上相对高含量区域分布在九姜河口至阳江港一 带和海陵岛西南部的大角环海域。Pb 与 Cr 的空间分布不同于其他重金属,Pb 的相对高含 量区域位于溪头渔港和闸坡渔港连线与海陵湾 航道的交汇处,Cr 的相对高含量区域位于阳江 港 11#—18#泊位附近海域。 2.2 重金属污染特征

2.2.1 单因子指数法评价

以海洋沉积物质量(GB 18668-2002)第一类 标准值为参考,对海陵湾表层沉积物各站位重金属 含量进行单因子指数评价,评价结果如表 6 所示。 单因子指数评价结果显示,沉积物环境状况总体 较好,但中部海域沉积物质量相对较差,主要污染 物为 Cr 和 As,均存在超过海洋沉积物质量第一类 标准值的站位,超标率分别为 13.33% 和 6.67%。



图 2 沉积物重金属 (mg/kg) 和 TOC(%) 含量空间分布

Fig. 2 Distribution of heavy metals (mg/kg) and TOC (%) in sediments

表 6 沉积物重金属单因子指数评价结果 Tab.6 Single factor pollution index evaluation of heavy metals

チムロ	单因	子指数		海洋沉积物质量	标准值/mg·kg ⁻¹
里金周	最大值最小值		超怀平/(%)	第一类	第二类
Cu	0.52	0.03	0.00	35.0	100.0
Pb	0.62	0.06	0.00	60.0	130.0
Zn	0.45	0.05	0.00	150.0	350.0
Cd	0.26	0.04	0.00	0.50	1.50
Hg	0.33	0.03	0.00	0.20	0.50
As	1.50	0.22	6.67	20.0	65.0
Cr	1.33	0.14	13.33	80.0	150.0

2.2.2 地累积指数法评价

海陵湾沉积物重金属地累积指数结果(图 3) 显示, Cu、Pb、Zn、Cd、Hg、As和Cr的Igeo平均 值均小于 0, 说明从整体上看, 海陵湾属于无重 金属污染状态。



地累积指数顺序为 $I_{geo}(As) > I_{geo}(Cr) > I_{geo}(Pb) > I_{geo}(Zn) > I_{geo}(Cu) > I_{geo}(Cd) > I_{geo}(Hg),$

As 和 Cr 的污染程度相对较高, 在局部站位表现 为轻度污染, 污染站位比例分别为 33.33% 和 6.67%, 说明海陵湾沉积物重金属污染以 As、 Cr 的贡献为主, Pb 的 *I*geo 最大值已接近 0, 可能 也存在一定的贡献, 而 Cu、Zn、Cd、Hg 几乎无 贡献。

2.2.3 潜在生态风险分析

潜在生态风险分析的结果(表 7)表明, Cu、 Pb、Zn、Cd、Hg、As和Cr的 E_i^r 最大值均小于40, 说明各站位均属于轻微生态风险。潜在生态风 险系数顺序为 $E_i^r(As) > E_i^r(Cd) > E_i^r(Hg) > E_i^r(Pb) >$ $E_i^r(Cr) > E_i^r(Cu) > E_i^r(Zn)$ 。除Pb外,与丘耀文等^[3] 对海陵湾沉积物重金属生态风险的排序(未测 定As)基本一致,随着近年来阳江港的进一步开 发,其泊位数量和港口吞吐量不断增加,船舶废 气排放量增多可能是导致 $E_i^r(Pb)$ 排序上升的主 要原因。

表 7 沉积物重金属潜在生态风险指数

Tab.7 The risk indices E_i^r and potential ecological risk factors RI of heavy metals

重	金属	最大值	最小值	平均值	生态风险等级
	Cu	3.05	0.17	1.24	轻微生态风险
	Pb	7.38	0.66	2.89	轻微生态风险
	Zn	0.84	0.10	0.45	轻微生态风险
E_i^r	Cd	7.80	1.20	4.32	轻微生态风险
	Hg	13.20	1.20	4.20	轻微生态风险
	As	30.06	4.41	11.99	轻微生态风险
	Cr	3.55	0.38	1.50	轻微生态风险
I	RI	47.44	9.69	26.58	轻微生态风险

As、Cd、Hg的潜在生态风险系数相较于其他重金属较高,这是因为,尽管这3种重金属的含量属于较低的水平,但毒性系数相对较高,导致其生态风险系数较高。从潜在生态风险指数来看,*RI*最大值均小于150,说明海陵湾整体上属于轻微生态风险。

2.2.4 毒性效应预测

按照一致性沉积物质量基准对海陵湾表层 沉积物的生物毒性风险进行了划分(图 4),结果 显示,所有站位 7 种重金属含量均低于 *PEC*,说 明海陵湾发生生物中毒的概率不大。Cu、Pb、 Zn、Cd和Hg在所有站位的含量均低于TEC,这5种重金属引发毒性的概率低于25%,可认为其不会产生有害生物效应,As和Cr分别有26.67%和13.33%的站位处于TEC和PEC之间,即As在九姜河口至阳江港一带和海陵岛西南部的大角环海域,Cr在阳江港11#—18#泊位附近和面前海局部海域有25%~75%的概率引发毒性,产生有害生物效应,需要引起一定的重视。

2.3 重金属来源解析

2.3.1 相关性分析

海陵湾海域表层沉积物重金属的 Pearson 相 关性分析结果(表 8)表明, Cu、Zn、Cd、Hg之间 呈显著性正相关(p<0.01), 说明这 4 种重金属可 能具有相同的来源及相似的迁移输运路径^[16]。As 与 Zn(p<0.01)、Cu(p<0.05)呈显著正相关性, 由 于 Cu、Zn、Cd、Hg 具有一定的同源特性, 推测 As 可能与它们也具有相似的来源途径, 但 As 与 Cd、Hg 无显著相关性, 表明 As 还可能存在其他 来源。Pb 和 Cr 与其余重金属之间均无显著相 关性, 说明 Pb 和 Cr 具有其他独特的来源。

TOC 代表沉积物中有机质的含量,对重金属 有很强的吸附和络合能力^[17]。海陵湾沉积物 TOC 的含量为 0.04% ~ 1.44%,除 Pb、Cr 外, TOC 与其他重金属均在 0.01 或 0.05 水平上表现出显 著正相关性,说明 TOC 是影响 Cu、Zn、Cd、Hg、 As 分布的重要因素。

2.3.2 主成分分析

海陵湾表层沉积物中 7 种重金属与 TOC 的 主成分分析结果(表 9、图 5)显示, PC1、PC2 和 PC3 的方差贡献率分别为 60.78%, 13.85% 和 11.36%, 3 个主成分的累计方差贡献率已达到 85.99%(>85%), 表示这 3 个主成分已足以反映 其环境指标所能提供的绝大部分信息。

在 PC1 中, Cu、Zn 和 Cd 均具有较大的正向 载荷, 均超过 0.9, Hg 和 As 的正向载荷也大于 0.7, 表明这 5 种重金属具有相同的来源, 与相关 性分析结果一致。通过与全国海岸带重金属背 景值的对比可以看出, 除 As 外, 这些重金属的最 大值均低于背景值, 说明 Cu、Zn、Cd、As、Hg 受 人类影响的因素小, 主要受地质背景的控制, 可 能是表生作用下岩石风化进入海域水体进而发



图 4 沉积物重金属生物毒性风险

Fig. 4 Biological toxicity risk of heavy metals in sediments

生沉积。这与丘耀文等^[3]得出的海陵湾陆源污 染不是该海域重金属污染的最主要途径的结论 相一致。此外, PC1 在 TOC 上也具有较高的正 向载荷,进一步说明 TOC 对重金属有很强的吸 附和络合能力,且相关性分析中 TOC 与这 5 种 重金属都呈显著正相关,推测伴随有机质降解产 生的金属离子释放效应可能是沉积物中 Cu、Zn、 Cd、As、Hg 的又一来源。

在 PC2 中, Pb 具 有 较 大 的 正 向 载 荷, 为 0.847, 其余重金属的载荷均较小。Pb 的相对高

含量区域位于溪头渔港和闸坡渔港连线与海陵 湾航道的交汇处,随着阳江港深水泊位、闸坡渔 港示范性(一级)渔港、溪头渔港二级渔港的建 设,港区吞吐量不断加大。船用燃料油是炼油的 残余产物,其内含有一定量的 Pb 等重金属元素 伴随着船舶废气排放进入大气环境进而沉降至 水体和沉积物中^[18]。推测海陵湾沉积物中的 Pb 主要来源于船舶、渔船等废气的排放。

在 PC3 中, Cr 具有较大的正向载荷, 为 0.796。 Cr 主要来自电镀、金属冶炼、机械制造和化工行

表 8 沉积物中重金属和有机碳的相关性分析

Tab.8 Correlation analysis among heavy metals and TOC of sediments

指标	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr	тос
Cu	1							
Pb	0.103	1						
Zn	0.915**	0.040	1					
Cd	0.858**	0.297	0.888**	1				
Hg	0.875**	-0.006	0.730**	0.661**	1			
As	0.637*	0.010	0.664**	0.480	0.444	1		
Cr	0.309	0.073	0.321	0.368	0.088	0.135	1	
有机碳	0.837**	0.145	0.903**	0.907**	0.623*	0.644**	0.313	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关;*表示在0.05水平(双 侧)上显著相关, n=15

表 9	变量主成分分析的荷载和成分矩阵

Tab.9 Load and composition matrix of variable principal component analysis

	PC1	PC2	PC3	PC4
Cu	0.965	-0.079	-0.037	-0.129
Pb	0.149	0.847	-0.484	0.073
Zn	0.962	-0.086	0.039	0.07
Cd	0.924	0.220	-0.039	-0.124
Hg	0.798	-0.266	-0.180	-0.390
As	0.700	-0.230	-0.056	0.641
Cr	0.366	0.450	0.796	-0.010
TOC	0.932	0.041	-0.003	0.094
方差贡献率/(%)	60.78	13.85	11.36	7.62
累计贡献率/(%)	60.78	74.63	85.99	93.61



图 5 主成分分析三维载荷

Fig. 5 Principal component analysis 3D load map

业产生的工业污水^[19-20],阳江港临港工业园中分 布有广东广青金属科技有限公司、广东世纪青 山镍业有限公司、阳江翌川金属科技有限公司 等金属冶炼和加工公司,受其原料、生产工艺的 影响,Cr伴随工业废水、粉尘及废渣等的排放进 入海域。推测海陵湾沉积物中的Cr主要来源于 阳江港临港工业园区中金属公司生产排放的废 水和废气等。

尽管 PC4 的方差贡献率仅为 7.62%, 但在 PC4 中 As 具有较大的正向载荷, 为 0.641, 进一步验 证了 As 可能存在其他来源的相关性分析结果。 阳江港的货物结构中主要以煤炭及制品、金属 矿石、粮食等为主^[21], As 作为煤炭中的一种有害 物质, 在阳江市东北或北北东常风向风力的作用 下进入阳江港西南向附近的沉积物中, 这与其含 量的相对高值区分布区域吻合, 推测海陵湾沉积 物中的 As 很可能受到阳江港煤炭运输的影响。

3 结论

(1)海陵湾表层沉积物中 Cu、Pb、Zn、Cd、 Hg、As和 Cr的平均含量分别为 7.40 mg/kg、 14.50 mg/kg、35.80 mg/kg、0.07 mg/kg、0.02 mg/kg、 11.98 mg/kg和 44.90 mg/kg,除 As和 Cr外,其余 重金属含量整体处于较低水平。重金属的空间 分布具有明显的差异性,Cu、Zn、Cd、Hg和 As 含量在九姜河口至阳江港一带和海陵岛西南部 的大角环海域较高,Pb含量在溪头渔港和闸坡 渔港连线与海陵湾航道的交汇处较高,Cr含量 在阳江港 11#—18#泊位附近海域较高。

(2)地累积指数和潜在性生态风险指数评价 结果表明,海陵湾沉积物重金属整体属于无污染 和轻微生态风险状态,相对污染主要以As、Cr 的贡献为主。一致性沉积物质量基准评价结果 表明,仅As和Cr在部分站位处于TEC和PEC 之间,需要引起一定的重视,其余重金属含量均 小于TEC,不会产生有害生物效应。

(3)相关性分析和主成分分析综合显示, Cu、Zn、Cd、Hg、As和TOC呈显著正相关性,表 现出同源性,主要受地质背景和有机质降解的控 制,此外,As还可能受到阳江港煤炭运输的影 响。Pb和Cr均具有独特的来源,分别为船舶、

参考文献:

- [1] 郭西亚,高 敏,张 杰,等. 阳澄湖沉积物重金属空间分布 及生物毒害特征[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 802-811.
- [2] 李 婷,朱长波,李俊伟,等.海陵湾口海水水质的综合分析 与评价[J].南方水产科学,2018,14(3):49-57.
- [3] 丘耀文,朱良生.海陵湾沉积物中重金属污染及其潜在生态 危害[J].海洋环境科学,2004,23(1):22-24.
- [4] 丘耀文,朱良生,黎满球,等.海陵湾沉积物重金属与粒度分 布特征[J].海洋通报,2004,23(6):49-53.
- [5] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. Geology Journal, 1969, 2(3): 108-118.
- [6] 全国海岸带办公室《环境质量调查报告》编写组.中国海岸带和海涂资源综合调查专业报告集[M].北京:海洋出版社, 1989.
- [7] MÜLLER G. Die Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: Eine Bestandsaufnahme[J]. Chemiker Zeitung, 1981, 105: 157-164.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [9] 孙钦帮,张 冲,乌立国,等.广东红海湾表层沉积物重金属 含量的空间分布特征与污染状况评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(5): 843-849.
- [10] MACDONALD D D, INGERSOLL C G, BERGER T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, 39(1):

20-31.

- [11] APITZ S E, BARBANTI A, BERNSTEIN A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. Journal of Soils and Sediments, 2007, 7(5): 326-341.
- [12] 朱爱美,张 辉, 崔菁菁,等. 渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 134-144.
- [13] 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.
- [14] 方利江, 葛春盈, 蒋 红, 等. 舟山海域表层沉积物重金属分布、来源及潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(5): 769-775.
- [15] 倪志鑫,张霞,蔡伟叙,等.珠江口沉积物中重金属分布、形态特征及风险分析[J].海洋环境科学,2016,35(3):321-328.
- [16] 时运红, 李明远, 李 波, 等. 深圳湾沉积物重金属污染时空 分布特征[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 186-191, 208.
- [17] 张起源,刘谞承,赵建刚,等.广东沿海沉积物重金属含量及 风险评价[J].中国环境科学,2018,38(12):4653-4660.
- [18] 冯淑慧,朱祉熹, BECQUE R,等.中国船舶和港口空气污染 防治白皮书[EB/OL]. http://nrdc.cn/information/informationin fo?id=91.2014-10/2020-03-19
- [19] 李 萌, 熊尚凌, 陈 伟, 等. 浙北海域表层沉积物中重金属 的含量特征、来源和污染评价[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(1): 14-20.
- [20] 张伯镇, 雷 沛, 潘延安, 等. 重庆主城区次级河流表层沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(7): 2185-2192.
- [21] 俞志伟. 阳江港码头投资项目可行性分析[D]. 广州: 华南理 工大学, 2012.