珠江口外陆架海域表层沉积物重金属潜在 生态风险评价及来源分析

陈 斌¹, 尹晓娜², 姜广甲¹, 卢楚谦¹, 钟煜宏¹, 肖瑜璋¹, 叶建萍¹, 吕向立¹* (1.国家海洋局南海环境监测中心, 广东广州 510300; 2.中海油研究总院, 北京 100028)

摘要:基于2017年11月珠江口外陆架海域表层沉积物中Hg、As、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr等7种重金属元素的调查结果,应用单因子标准指数和地累积指数法评价了研究海域表层沉积物环境质量,采用 Häkanson 潜在生态风险指数评价法定量评估沉积物中重金属的潜在生态风险,并利用 Pearson 相 关性分析和主成分分析初步探究了研究海域沉积物中重金属的主要来源。结果表明:研究海域表 层沉积物中7种重金属污染物含量均达到海洋沉积物质量一类标准,地累积指数显示研究海域表 层沉积物环境整体处于清洁状态,部分站位中的 As 和 Cd 属轻度污染。总体来说,研究海域沉积 物环境属于低潜在生态风险(综合潜在生态风险系数 RI<150)。单项因子潜在生态风险由高到低 为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn,研究海域西部表层沉积物重金属 Cd 的潜在生态风险系数均值达到 中等潜在生态风险水平。Cr、Cu 和 Zn 元素具有相近来源,主要为工业产生的陆源污染物;Pb、As 和 Cd 元素来源相似,来源于陆源工业和农业污染经大气沉降及海上交通污染;而 Hg 与其他重金 属元素无明显相关。

关键词:海洋化学;沉积物;重金属;生态风险;主成分分析;珠江口

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.03.017

中图分类号:P734

文献标识码:A

文章编号:2095-4972(2021)03-0520-09

珠江口外陆架海域因其水温高、水系复杂等特点,渔业资源物种多样性极高,重要经济鱼类产卵场 密集,海洋生态环境质量倍受关注^[1-2]。近年来,受 人类活动的影响,珠江口及毗邻海域生态环境污染 严重^[3]。沉积物中的重金属是生态风险较大的潜 在危害污染物^[4],可通过海水悬浮颗粒物的吸附和 沉降作用富集到海洋沉积物中^[5]。因此,全面评价 珠江口外海表层沉积物中重金属污染程度及潜在生 态风险,可更好地掌握区域海洋环境质量。

单因子标准指数是最常用的评价海洋沉积物重 金属污染程度的方法^[6]。地累积指数(*I*gee)则利用 沉积物中某一种重金属元素的总含量与其地球化学 背景值的关系,充分考虑沉积物的粒度、物质组成等 因素^[7-8],定量评价沉积物中重金属污染^[9-11]。此 外,重金属元素毒性水平不同,海洋生物对不同重金 属的敏感和富集程度也不同^[12-13]。为综合评价重 金属污染水平,Häkanson等(1980)提出了利用潜在 生态风险指数评价重金属污染程度,充分考虑了重 金属的毒性水平和海洋生物对该重金属的敏感程 度,全面反映重金属对海洋生态系统造成的风 险^[14],是目前常用的海洋表层沉积物质量评价方法 之一^[15-17]。

在海洋沉积物污染因子的来源分析研究方面, 主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA) 受到广泛应用^[18-19],国内外已开展湖泊^[20]、河 流^[21]、海湾^[22-24]等重金属来源分析的相关研究。该 法通过降维的统计模式,将多个重金属指标重新组 合成一组新的综合指标来进行评价。

本研究以珠江口外大陆架海域为研究区,利用 单因子标准指数、地累积指数对表层沉积物中的重 金属水平进行评价;并根据不同重金属的特性对沉 积物中重金属的潜在生态风险进行评估;通过主成

收稿日期:2019-11-29

基金项目:国家海洋局南海维权技术与应用重点实验室基金重点项目资助项目(SCS1617)

作者简介:陈斌(1988—),女,工程师;E-mail: stlxbb@126.com

^{*} 通讯作者: 吕向立(1985—), 男, 工程师; E-mail: xianglilyu@163.com

分分析,探讨了研究海域表层沉积物重金属来源,以 期为珠江口毗邻海域生态环境保护提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 样品采集与分析

于 2017 年 11 月在珠江口外陆架东部、中部和 西部海域分别布设了 23、10 和 19 个站位(图 1),采 集表层沉积物样品。

表层沉积物样品的采集、保存和运输均严格按照《海洋监测规范》^[25]执行。沉积物粒度分析采用激光法^[26],沉积物干样中 Zn、Cu、Pb、Cd、Cr 含量分析采用火焰原子吸收分光光度法^[25],Hg 和 As 含量 采用原子荧光法^[25]进行分析测定。



Fig. 1 Distribution of sampling sites on the continental shelf of the Pearl River Estuary

1.2 数据分析方法

利用单因子标准指数评价方法计算单项污染物 的环境质量指数,采用《海洋沉积物质量》^[27]中规定 的第一类海洋沉积物质量标准对研究海域表层沉积 物中的重金属水平进行评价。

地累积指数评价计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[C_j^i / (K \cdot C_b^i) \right]$$
(1)

式(1)中: C_b^i 表示重金属评价因子 i 的环境背 景值^[28], C_j^i 表示站 j 重金属评价因子 i 的实测值, K表示因不同地域沉积物地化特征可能会引起的背景 值差异而取的系数。

潜在生态风险指数法计算公式如下:

$$C_r^i = C_j^i / C_b^i \tag{2}$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_r^i \tag{3}$$

$$RI = \sum_{i=1}^{i} E_r^i \tag{4}$$

式(2)至(4)中: C_r^i 表示重金属元素 *i*的污染

系数, Eⁱ, 表示站位 r 沉积物中重金属元素 i 的潜在 生态风险系数, Tⁱ, 表示重金属元素 i 的毒性响应系 数, RI 表示沉积物中重金属综合潜在生态风险指 数, 相关评价参数见表 1, E 和 RI 值对应的潜在生 态风险程度分级见表 2。

表 1 表层沉积物重金属污染评价参数

Tab. 1 Reference values of heavy metal pollution

in surface sediments

评价因子	一类标准/(×10 ⁻⁶)	背景值/(×10 ⁻⁶)	T_r^i
Hg	0.20	0.061	40
Cu	35.0	34.0	5
Pb	60.0	24.1	5
Zn	150.0	108.0	1
Cd	0.50	0.250	30
Cr	80.0	57.9	2
As	20.0	6.58	10

注:一类标准引自文献[27],背景值引自文献[28]。

表 2 表层沉积物重金属潜在生态风险指标分级标准

Tab. 2	Classification criteria of potential ecological risk index
	of heavy metals in surface sediments

评价指数类型	范围	潜在生态风险程度分级		
	<i>E</i> <40.00	低潜在生态风险		
	$40.00 \le E < 80.00$	中等潜在生态风险		
Ε	$80.00 \leq E < 160.00$	较高潜在生态风险		
	$160.00 \leq E < 320.00$	很高潜在生态风险		
	<i>E</i> ≥320.00	极高潜在生态风险		
	<i>RI</i> <150.00	低潜在生态风险		
DI	$150.00 \le RI < 300.00$	中等潜在生态风险		
	$300.00 \le RI < 600.00$	较高潜在生态风险		
	<i>RI</i> ≥600.00	很高潜在生态风险		

以表层沉积物中重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、 Cd、Hg 和 As 的含量为变量,在 SPSS 19.0 数据统计 软件中进行 Pearson 相关性分析及主成分分析。

2 结果与讨论

2.1 粒度分析结果

海洋沉积物的粒度特征与水动力关系密切,

对沉积物的重金属含量具有一定的影响^[29],粒 度分析结果统计见表 3,结果表明研究海域西部 表层沉积物粘土含量相对较高,沉积物粒径相对 较小。

2.2 研究海域表层沉积物中重金属含量变化特征

图 2 给出研究海域表层沉积物中重金属元素含量的空间分布,研究海域东部、中部和西部沉积物 Hg 含量均值分别为 0.017×10⁻⁶(质量分数,下同)、 0.020×10⁻⁶和 0.018×10⁻⁶(表 3);沉积物 As 含量东 部和中部差别不大,均值分别为 2.83×10⁻⁶和 2.92× 10⁻⁶,而西部均值达 7.79×10⁻⁶;沉积物 Cu 含量以东 部均值最高,其次是西部,中部均值最低;沉积物 Pb 含量西部均值最高,东部和中部相差不大;沉积物 Cr 含量均值自东到西依次为 25.2×10⁻⁶、16.0×10⁻⁶、 14.8×10⁻⁶。整体来说,Hg 和 Pb 空间变化规律不明 显;Cu、Zn、Cr 呈现东部高于西部的分布特征,高值 区大多分布于海域东部;而 Cd 和 As 呈现西部高于 东部的分布趋势,高值区多分布于海域西部。

表 3 研究海域表层沉积物粒度及重金属含量统计结果

统计因子		沉积物组分占比/%			重金属含量/(×10 ⁻⁶)						
		粘土	粉砂	砂	Hg	As	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr
研究海域 ^花 东部 5	范围	5.8~9.3	29.7~64.5	26.6~64.4	0.009~ 0.038	1.69~11.50	8.0~11.8	2.4~21.2	0.02~0.23	47.8~71.4	20.7~28.5
	均值	7.4	46.0	46.6	0.017	2.83	10.1	11.5	0.09	60.7	25.2
研究海域 中部 均	范围	1.4~2.7	26.2~62.0	36.6~72.0	0.015~ 0.030	2.03~4.46	4.3~8.2	3.5~26.3	0.08~0.23	33.5~53.3	8.6~23.0
	均值	2.0	41.1	56.9	0.020	2.92	6.4	12.0	0.13	42.8	16.0
研究海域 西部 一	范围	6.0~9.9	41.9~62.2	27.9~52.1	0.015~ 0.024	5.42~14.20	6.4~12.0	6.6~28.4	0.11~0.49	35.5~66.0	10.0~22.5
	均值	8.5	53.5	38.0	0.018	7.79	8.4	16.7	0.34	50.4	14.8

Tab. 3 Statistics results of granularity and heavy metals in surface sediments investigated

注:表中重金属含量为质量分数。

2.3 表层沉积物重金属单因子指数评价结果

利用单因子指数评价表层沉积物的环境质量, 结果发现 7 种重金属元素 Cu、Pb、Zn、Cr、Cd、Hg 和 As 的污染物环境质量指数均小于 1,说明研究海域 表层沉积物质量状况良好。

2.4 地累积指数评价结果

利用地累积指数评价时,所有站位表层沉积物

中 Hg、Cu、Pb、Zn、Cr 的 I_{geo} 值均小于 0.00,属于清洁 水平;As 的 I_{geo} 值范围介于-2.55~0.52之间,均值为 -1.35,W1、W2 和 W3 站位 I_{geo} 值介于 0.00 到 1.00 之间,属于轻度污染,均位于研究海域西部,其他站 位 As 的 I_{geo} 值均小于 0.00,属于清洁水平;Cd 的 I_{geo} 值范围介于-4.23~0.39 之间,均值为-1.45,西部海 域有 9 个站位 I_{geo} 值介于 0.00 到 1.00 之间,占总站



位数的 17.3%,属于轻度污染,其余站位 Cd 的 I_{geo}值 均小于 0.00,属于清洁水平。总体上,研究海域沉积 物整体处于清洁状态,As 和 Cd 部分站位受到轻度 污染,且均位于西部海域。

2.5 潜在生态风险评价结果

通过计算表层沉积物中重金属的污染系数, 结果发现研究海域东部仅有 E23 站 As 污染系数 大于 1.00(1.75),属于低污染,其余重金属元素污 染系数均小于 1.00;中部海域仅有 M6 站 Pb 污染 系数大于 1.00(1.09),属于低污染,其余各站位沉 积物中各重金属元素污染系数均小于 1.00;西部 海域沉积物中重金属 Hg、Cu、Zn、Cr 污染系数均小 于 1.00,As 污染系数均值为 1.18,有 14 个站位 (占西部海域站位总数的 73.7%)大于 1.00,最大 值为 2.16,出现在西部 W1 站;Pb 污染系数均值为 0.69,有 3 个站位(占西部海域站位总数的15.8%) 大于 1.00,最大值为1.18,出现在西部海域 W17 站;Cd 污染系数平均值为 1.38,有 16 个站位(占 西部海域站位总数的84.2%)大于1.00,最大值为1.96,出现在W9站,均为低污染水平,研究海域西部Cd污染系数相对较高。

从表4可以看出,研究海域东部和中部表层沉积物中Hg、As、Cu、Pb、Cd、Zn、Cr单项重金属元素*E*<40.00,7种重金属均属于低潜在生态风险。研究海域西部表层沉积物Cd元素*E*均值为41.31,达到中等潜在生态风险水平,其中有11个站位Cd元素 *E*<40.00,最大值出现在W11站和W18站(均为57.60),其他6种重金属(Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、As)的 *E*<40.00,属于低潜在生态风险。

研究海域所有站位的 RI 值均小于 150.00,范围 在 18.83~86.96 之间,平均值为 46.67,均属低潜在 生态风险范畴,最大值出现在西部的 W8 站。整体 上来说,空间分布(图 3)呈现出研究海域西部 RI 值 整体较东部高的规律,西部各站位 RI 均值为70.63, 东部各站位 RI 均值为 30.67。

表 4 研究海域表层沉积物中重金属的潜在生态风险指数(E)和综合潜在生态风险指数(RI)统计结果

研究海域		E							
		Hg	As	Cu	Pb	Cd	Zn	Cr	M
东部	最大值	24.92	17.48	1.74	4.40	27.60	0.66	0.98	54.86
	最小值	5.90	2.57	1.18	0.50	2.40	0.44	0.72	18.83
	均值	11.20	4.30	1.48	2.39	10.31	0.56	0.87	30.67
中部	最大值	19.67	6.78	1.21	5.46	27.60	0.49	0.79	52.47
	最小值	9.84	3.09	0.63	0.73	9.60	0.31	0.30	30.00
	均值	13.12	4.45	0.94	2.50	15.96	0.40	0.55	37.91
西部	最大值	15.74	21.58	1.76	5.89	58.80	0.61	0.78	86.96
	最小值	9.84	8.21	0.94	1.37	13.20	0.33	0.35	50.47
	均值	11.80	11.84	1.24	3.47	41.31	0.47	0.51	70.63
全海域	最大值	24.92	21.58	1.76	5.89	58.80	0.66	0.98	86.96
	最小值	5.90	2.57	0.63	0.50	2.40	0.31	0.30	18.83
	均值	11.79	7.08	1.29	2.81	22.96	0.50	0.68	46.67

Tab. 4 Statistics results of E and RI in surface sediments in the areas investigated

2.6 讨论

2.6.1 重金属污染物来源分析 Bartlett 球形检验观测值为117.77,相伴概率为0.000,小于显著性水平0.01,KMO检验值为0.640,Pearson相关性分析结果表明各重金属污染物之间并非完全

独立,部分重金属之间具有较强的相关性,例如 Cr和Cu(r=0.702)、Cr和Zn(r=0.600)、As与 Cd(r=0.527)。对研究海域表层沉积物中7种 重金属含量进行主成分分析(图4、表5),发现前 3个主成分(PC1、PC2、PC3)累积综合了原始数



据矩阵 74.263%的信息,可分析表层沉积物中重

金属的可能来源。



Fig. 4 Loading plots of each heavy metal in 3 dimentions

表	5	不同重金属含量的主成分分析计算结果
1.	0	1911 主亚两百里的工成力力 01 并非不

Tab. 5 Results of principal component analysis for contents of different heavy metals

项目	PC1	PC2	PC3
Hg	-0.207	-0.265	0.882
As	-0.653	0.491	-0.125
Cu	0.670	0.484	-0.056
Pb	-0.340	0.651	0.405
Cd	-0.730	0.341	-0.086
Zn	0.673	0.468	0.161
Cr	0.924	0.106	0.115
特征值	2.874	1.316	1.008
方差贡献率/%	41.059	18.804	14.400
累积方差贡献率/%	41.059	59.863	74.263

PC1 方差贡献率为 41.059%,其特点表现为 Cr 具有最高正载荷(0.924),正载荷较高的还有 Cu 和 Zn,各因子间的 Pearson 相关性分析显示, Cr 和 Cu (r=0.702)、Cr 和 Zn (r=0.600)、Cu 和 Zn (r= 0.481)元素在 0.01 水平双侧显著相关,即这些重金 属元素可能具有相同的来源。具体来说, Cr 主要来 源于采矿活动和工业污染物,经陆源排污随着河流 输入海洋^[30], Cu 和 Zn 主要来源包括工业污染、冶 金、陆地土壤或岩石风化产物^[31]。因此,方差贡献 率最高的 PC1 可以说明工业污染物、陆源排污产生 的外源污染对沉积物中重金属来源的贡献。

PC2 方差贡献率为 18.804%,其中 Pb 正载荷最高。海洋中的铅主要有火山爆发、森林火灾等自然现象,及人类活动产生的铅排放后经大气沉降进入

水体^[32-33]。因本研究围绕工业污染严重的珠江口 外海进行,除此之外海域沉积物 Pb 含量的高值区 位于珠江口航线以南,该航线海上交通运输频繁,来 源于海上交通排污的可能性较大。在 PC2 中处于 正载荷的还有 As 和 Cd,相关性分析显示 Pb 与 As (r=0.323)、As 与 Cd(r=0.527)、Pb 与 Cd(r= 0.283)在 0.01 或 0.05 水平上双侧显著相关,As 在 自然环境中极少存在,受煤渣排污、农药、化肥等影 响较大,Cd 也是矿物复合肥如磷肥的主要成分,说 明 PC2 除了来源于海上交通运输,陆源工业、农业 污染经大气沉降也是研究海域表层沉积物中重金属 的重要来源。

PC3的方差贡献率为14.400%,其中Hg正载荷最高,Pearson相关性分析显示Hg与其他6项重金

属因子无显著相关性,说明 Hg 的主要来源不同于 其它重金属。Hg 易与有机质发生络合反应,生成沉 积物中的有机络合物^[34],郑江鹏等(2017)发现 Hg 与有 机质 TOC 在 0.01 的水平上存在显著相关 性^[35],李玉等(2006)研究显示有机质降解而伴随的 金属离子的释放是海水表层沉积物中重金属 Hg 的 来源^[24],说明 PC3 主要表征有机质降解的内源污 染对研究海域表层沉积物的影响。

2.6.2 Cd 潜在生态风险分析 根据 Häkanson (1980)对多个研究海域 7 种重金属毒性的综合评 价,重金属元素毒性大小依次为 Hg>Cd>As>Pb=Cu> Cr>Zn^[14],本研究结果与之基本一致,表现为 Cd>Hg> As>Pb>Cu>Cr>Zn,但本研究中 Cd 的潜在生态风险 高于 Hg。Cd 元素的毒性仅次于 Hg,是一种生物非必 需的毒副作用很强的元素。研究表明,Cd 在海洋中 极易富集于生物体内,进而通过海洋食物链进入人体 影响人类健康,对海洋生物生长和人类都存在严重威 胁^[36-37]。本研究中 Cd 的潜在生态风险大体呈现自 东向西递增的趋势,研究海域西部 Cd 的潜在生态风 险系数均值达到中等潜在生态风险,此外有研究显示 我国多处海域均存在类似 Cd 潜在生态风险偏高的情 况^[38-39]。因此有必要加强珠江口外海陆架海域尤其 是研究海域西部沉积物中 Cd 的监测频率和预警,以 避免对海洋生态系统造成更大危害。

3 结论

通过对珠江口外陆架海域表层沉积物重金属潜 在生态风险评价及来源分析研究,获得如下结论:

(1)研究海域表层沉积物中 7 种重金属含量以 单因子指数评价均符合海洋沉积物质量一类标准; 采用地累积指数评价结果则显示研究海域西部 As 和 Cd 部分站位受到轻微污染; *RI*分析结果显示所 有站位均属低潜在生态风险,但西部 *RI*值高于东 部;研究海域表层沉积物重金属单因子潜在生态风 险由高到低为 Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn,西部表层 沉积物 Cd 含量达到中等潜在生态风险水平,且西 部表层沉积物粘土含量相对较高。

(2)表层沉积物重金属含量受人类生产活动影 响较大,Cr、Cu和Zn具有相近来源,主要为工业污 染物、陆源排污产生的外源污染,Pb、As和Cd元素 来源相似,来源于海上交通及陆源工业、农业污染经 大气沉降产生的污染,Hg来源不同于其它重金属元 素,可能源于有机质降解产生的内源污染,实际来源 有待进一步调查与验证。

参考文献:

- [1] 陈法锦,陈淳青,周凤霞,等.秋季珠江口外海海域的生态环境特征[J].海洋环境科学,2017,36(6):844-852.
 CHEN F J, CHEN C Q, ZHOU F X, et al. Characteristics of the ecological environment in the seawater off the Pearl River estuary in autumn[J].
 Marine Environmental Science, 2017, 36(6): 844-852.
- [2] 唐启升. 中国区域海洋学: 渔业海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 335-440.
- TANG Q S. Regional oceanography of China seas: fisheries oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 335-440.
- [3] 韦桂秋, 王华, 蔡伟叙, 等. 近 10 年珠江口海域赤潮发生特征及原因初探[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 466-474.
 WEI G Q, WANG H, CAI W X, et al. 10-year retrospective analysis on the harmful algal blooms in the Pearl River Estuary[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(4): 466-474.
- [4] ADAMS W J, KIMERLE R A, BAMETT J W. Sediment quality and aquatic life assessment [J]. Environmental Science Technology, 1992, 26 (10): 1 865-1 875.
- [5] REES J Q, RIDGWAY J, KNOX R, et al. Sediment-borne contaminants in rivers discharging into the Humber estuary, UK[J]. Marine Pollution Bulletin, 1998, 37(3/4/5/6/7): 316-329.
- [6] 何桂芳,袁国明,林端,等.海上油田开发对海洋环境的影响:以涠洲油田为例[J].海洋环境科学,2009,28(2):198-201.
 HE G F, YUAN G M, LIN D, et al. Influence of oil-field exploitation on marine environment: a case study of Wei-zhou oil-field[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(2):198-201.
- [7] MÜLLER G. Index of Geo accumulation in sediments in Rhine River[J]. Geojournal, 1969, 2(3): 108-118.
- [8] 滕彦国, 庹先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染:选择地球化学背景的影响[J]. 环境科学与技术, 2002, 25 (2): 7-9.

TENG Y G, TUO X G, NI S J, et al. Applying geo-accumulation index to assess heavy metal pollution in sediment: influence of different geochemical background[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(2): 7-9.

- [9] 阳杰,曹玲珑,姜万钧,等.洋浦港近岸海域沉积物中重金属含量分布特征及污染评价[J].海洋湖沼通报,2012 (4):121-128. YANG J, CAO L L, JIANG W J, et al. Distribution and evaluation of heavy metal pollutions for surface sediments near port[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012 (4): 121-128.
- [10] 叶然,江再昌,郭清荣,等.洋山深水港区海域秋、冬季沉积物中重金属来源分析及生态风险评价[J].海洋通报,2015,34(1):76-82.
 YE R, JIANG Z C, GUO Q R, et al. Source analysis and ecological risk assessment on heavy metals in the sediments of the Yangshan Deepwater Harbor in autumn and winter[J]. Marine Science Bulletin, 2015, 34(1):76-82.

- [11] 左平, 汪亚平, 闵凤阳, 等. 深圳湾近岸海域表层沉积物中重金属污染评价[J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 648-651. ZUO P, WANG Y P, MIN F Y, et al. Assessment on heavy metals pollution in coastal surface sediments of Shenzhen Bay[J]. Marine Environmental Science, 2009, 28(6): 648-651.
- [12] 柳学周,徐永江,兰功刚,等. 几种重金属离子对半滑舌鳎胚胎发育和仔稚鱼的毒性效应[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(2): 33-42.
 LIU X Z, XU Y J, LAN G G, et al. Genetic diversities in the tongue sole (*Cynoglossus semilaevis* Günther) as revealed by isozyme analysis[J].
 Marine Fisheries Research, 2006, 27(2): 33-42.
- [13] 宁军号,白伟,宋坚,等.4种重金属离子对偏顶蛤的急性毒性效应[J].大连海洋大学学报,2016,31(3):290-294. NING J H, BAI W, SONG J, et al. Acute toxicity of four kinds of heavy metal ions to clam *Modiolus modiolus*[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2016, 31(3): 290-294.
- [14] HÄKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [15] 兰圣迎,石荣贵,张敬怀,等.北部湾油田海域沉积物重金属生态危害评价[J].油气田环境保护,2014,24(6):14-17. LAN S Y, SHI R G, ZHANG J H, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the oil field area in Beibu Gulf[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2014, 24(6): 14-17.
- [16] 王恩康,孙永根,夏鹏,等. 钦州湾南部表层沉积物重金属分布及生态危害评价[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(2): 284-294.
 WANG E K, SUN Y G, XIA P, et al. Distribution characteristics and ecological risk assessment of heavymetals in the surface sediments in southern waters of Qinzhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2017, 35(2): 284-294.
- [17] 徐艳东,魏潇,夏斌,等.莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J].海洋科学进展, 2015, 33(4): 520-528.
 XU Y D, WEI X, XIA B, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the eastern Laizhou Bay[J]. Advances in Marine Science, 2015, 33(4): 520-528.
- [18] 胡宁静,石学法,黄朋,等. 渤海辽东湾表层沉积物中金属元素分布特征[J]. 中国环境科学,2010,30(3):380-388.
 HU N J, SHI X F, HUANG P, et al. Distribution of metals in surface sediments of Liaodong Bay, Bohai Sea[J]. China Environmental Science, 2010, 30(3): 380-388.
- [19] PETRONIO B M, CARDELLICCHIO N, CALACE N, et al. Spatial and temporal heavy metal concentration (Cu, Pb, Zn, Hg, Fe, Mn, Hg) in sediments of the Mar Piccolo in Taranto (Ionian Sea, Italy) [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223(2): 863-875.
- [20] 张杰,郭西亚,曾野,等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2 202-2 210.
 ZHANG J, GUO X Y, ZENG Y, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in river sediments from Lake Taihu Basin[J].
 Environmental Science, 2019, 40(5): 2 202-2 210.
- [21] 宁增平, 蓝小龙, 黄正玉, 等. 贺江水系沉积物重金属空间分布特征、来源及潜在生态风险[J]. 中国环境科学, 2017, 37(8): 3 036-3 047. NING Z P, LAN X L, HUANG Z Y, et al. Spatial distribution characteristics, sources and potential ecological risk of heavy metals in sediments of the Hejiang River[J]. China Environmental Science, 2017, 37(8): 3 036-3 047.
- [22] 柴小平,胡宝兰,魏娜,等. 杭州湾及邻近海域表层沉积物重金属的分布、来源及评价[J]. 环境科学学报, 2015, 35(12): 3 906-3 916.
 CHAI X P, HU B L, WEI N, et al. Distribution, sources and assessment of heavy metals in surface sediments of the Hangzhou Bay and its adjacent areas[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(12): 3 906-3 916.
- [23] DELVALLS T A, FORJA J M, GONZA E LEZ-MAZO E, et al. Determining contamination sources in marine sediments using multivariate analysis[J]. Trac Trends in Analytical Chemistry, 1998, 17(4): 181-192.
- [24] 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.
 LI Y, YU Z M, SONG X X, et al. Application of principal component analysis (PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments[J]. Environmental Science, 2006, 27(1):137-141.
- [25] 国家海洋局.海洋监测规范:第5部分 沉积物分析: GB 17378.5—2007[S]. 北京:中国标准出版社, 2008. State Oceanic Administration. The specification for marine monitoring-Part 5: Sediment analysis: GB 17378.5-2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [26] 国家海洋局.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[S].北京:中国标准出版社,2008.
 State Oceanic Administration. Specifications for oceanographic survey-Part 8: marine geology and geophysics survey:GB/T 12763.8-2007[S].
 Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [27] 国家海洋局.海洋沉积物质量: GB 18668—2002[S].北京:中国标准出版社, 2002. State Oceanic Administration. The quality of marine sediments: GB 18668-2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002.
- [28] 张远辉, 杜俊民. 南海表层沉积物中主要污染物的环境背景值[J]. 海洋学报, 2005, 27(4): 161-166.

ZHANG Y H, DU J M. Background values of pollutants in sediments of the South China Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2005, 27(4): 161-166.

[29] 陈静生,王飞越,陈江麟. 论小于 63 μm 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转换模型研究[J]. 环境科学学报, 1994, 14(4): 419-425.

CHEN J S, WANG F Y, CHEN J L, et al. Relation of aquatic particulate grain size to heavy metals concentrations in eastern Chinese rivers [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 1994, 14(4): 419-425.

- [30] 陈敏. 化学海洋学[M]. 北京: 海洋出版社, 2009. CHEN M. Chemical oceanography[M]. Beijing: China Ocean Press, 2009.
- [31] 胡宁静,刘季花,黄朋,等. 渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量[J]. 海洋学报, 2012, 34(2): 92-100.
 HU N J, LIU J H, HUANG P, et al. The distribution and riskassessment of metals in surface sediments of the Laizhou Bay in the Bohai Sea[J].
 Haiyang Xuebao, 2012, 34(2): 92-100.

· 528	3.
-------	----

- [32] 刘明, 范德江, 郑世雯, 等. 渤海中部沉积物铅来源的同位素示踪[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 36-47.
 LIU M, FAN D J, ZHENG S W, et al. Tracking lead origins in the central Bohai Sea based on stable lead isotope composition[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 36-47.
- [33] NRIAGU J O. Tales told in lead[J]. Science, 1998, 281(5 383): 1 622-1 623.
- [34] 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.
 WANG H, ZHANG M K. Simulated study on interactions between heavy metals and organic matter in contaminated soil[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2009, 35(4): 460-466.
- [35] 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): 1 514-1 522. ZHENG J P, JIAO X M, FANG N J, et al. Sources and risk assessment of heavy metals in sediments in Jiangsu coastal areas[J]. China Environmental Science, 2017, 37(4): 1 514-1 522.
- [36] 李玉环,林洪. 镉对海湾扇贝的急性毒性研究[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(6): 80-83. LI Y H, LIN H. Acute toxicity of cadmium to *Argopecten irradiams*[J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(6): 80-83.
- [37] 王夔. 生命科学中的微量元素[M]. 北京:中国计量科学出版杜, 1996.
 WANG K. Trace elements in life science[M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1996.
- [38] 马德毅,王菊英.中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评价[J].中国环境科学,2003,23(5):521-525.
 MA D Y, WANG J Y. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China[J]. China Environmental Science, 2003, 23(5): 521-525.
- [39] 周笑白,梅鹏蔚,彭露露,等. 渤海湾表层沉积物重金属含量及潜在生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2015, 24(3): 452-456. ZHOU X B, MEI P Y, PENG L L, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay [J]. Ecology and Environment Sciences, 2015, 24(3): 452-456.

Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in the sediments of continental shelf and their sources off the Pearl River Estuary

CHEN Bin¹, YIN Xiaona², JIANG Guangjia¹, LU Chuqian¹, ZHONG Yuhong¹, XIAO Yuzhang¹, YE Jianping¹, LÜ Xiangli^{1*}

(1. South China Sea Environment Monitoring Center, SOA, Guangzhou 510300, China;

2. China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100028, China)

Abstract: The concentrations of heavy metal elements (Hg, As, Cu, Pb, Cd, Zn and Cr) in the surface sediments were investigated on the continental shelf off the Pearl River Estuary in November 2017. Based on the field data, the sediment environment was evaluated using single factor standard index and Geo-accumulation index. Further, quantitative assessment on the potential ecological risk of these heavy metals was performed using the Häkanson index. The dominant sources were also determined with Pearson correlation analysis and principal component analysis. The results demonstrated that 7 heavy metals in all samples met the national first-class standard of marine sediment quality. Overall, the environment of surface sediments was generally clean but slightly polluted by As (5.8% stations) and Cd (17.3% stations) according to the geo-accumulation index. Relatively low potential ecological risk was observed in the study area with *RI* value lower than 150. The potential ecological risk for Cd was medium (41.31) in the western areas. We also found that sources of Cr, Cu and Zn were similar and potentially from industrial and terrestrial pollutants. Pb, As and Cd were derived from pollutants from inland, marine transportation and agriculture. However, the sources of Hg showed little relationship with other heavy metals.

Key words: marine chemistry; sediments; heavy metal; potential ecological risk; principal component analysis; Pearl River Estuary

DOI: 10.3969/J.ISSN.2095-4972.2021.03.017