

惠州海域沉积物重金属污染与 潜在生态风险

杨玉峰, 梁浩亮*, 范开文, 谢文琦, 陈冰玲, 钟锦明

(惠州市海洋技术中心, 广东 惠州 516000)

摘 要: 为了解惠州近岸海域沉积物重金属的污染特征, 于 2016-08 采集表层沉积物 12 个, 分析了沉积物中 Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg, As 的含量, 采用地积累指数法(I_{geo})和潜在生态风险指数法(E_r^i)进行重金属污染现状和生态风险评价。结果表明: 参照国家《海洋沉积物质量》标准(GB 18668—2002), 惠州近岸海域沉积物质量整体良好, 沉积物中 7 种重金属元素含量符合第一、二类标准。地积累指数法和潜在生态风险指数法评价结果显示, 惠州近岸海域沉积物 7 种重金属元素的污染程度为 $Cd > Zn > As > Cu > Pb > Hg > Cr$, Cd 在所有样点都是偏中度污染及以上, Pb, Cr, Hg 三种元素皆为无污染; 沉积物中 7 种重金属元素的潜在生态风险系数(E_r^i)由高到低依次为 $Cd > Hg > As > Cu > Pb > Zn > Cr$, Cd 具有极强生态风险, 沉积物重金属处于强生态风险状态(RI 平均值为 370.22), Cd 是主要的生态风险贡献因子。沉积物中 Cu, Zn, Pb, Cr 四种元素显著相关, 具有同源性; 有机碳显著作用于沉积物重金属含量和分布。

关键词: 沉积物; 重金属; 生态风险; 惠州

中图分类号: P67

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2018)01-0080-09

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2018.01.009

重金属作为主要的环境污染物, 具有蓄积性、持久性和生物毒性等特点^[1-3]。沉积物是海洋环境中重金属的“源”^[4-5]和“汇”^[6-7]。沉积物重金属的自然来源有矿化、侵蚀、火山爆发等^[8], 人为来源则包括工业活动、污水排放、采矿、冶炼等^[8-9]。各种来源的重金属进入海水中, 经沉降到达海底; 而沉积物自身的颗粒粒径及吸附—解吸过程, 使其成为重金属的主要载体^[6, 10]。沉积环境(如 pH、Eh、盐度、有机质)的改变导致重金属释放进入水体, 造成二次污染^[4]; 重金属通过食物链累积^[5], 进而危害生物体和生态环境^[11]。基于重金属的种类、含量、分布特征, 国内外学者主要利用沉积物富集系数^[12]、地积累指数法^[11, 13]和潜在生态风险指数法^[14-17]对重金属污染和生态风险进行评价。

惠州市位于珠江三角洲区域东端, 临海县区分别为惠东县和大亚湾经济开发区(以下简称“大亚湾区”), 海洋经济发展迅速, 而环境生态风险也日益集聚。诸多学者的研究主要集中在大亚湾区海水^[18]、沉积物^[19-21]和海洋生物体^[22-23]重金属污染分析, 涉及惠东县的研究较少, 而且近年来对惠州沉积物重金属污染的综合分析评价不足。因而, 本文利用 2016 年惠州市海洋环境综合调查样品, 对惠州近岸海域沉积物重金属含量进行了分析, 并评价了沉积物重金属的污染状况和生态风险, 最后探讨了沉积物重金属的来源以及有机碳、硫化物对其分布的影响, 从而为惠州市海洋环境保护和监管提供参考依据。

收稿日期: 2017-11-23

资助项目: 惠州市 2017 年市级统筹油补资金项目——海洋渔业资源环境调查研究项目

作者简介: 杨玉峰(1982-), 男, 博士, 主要从事海洋地质与环境地质方面研究。E-mail: xmuyfyang@hotmail.com

* **通讯作者:** 梁浩亮(1976-), 男, 高级工程师, 主要从事海洋环境调查与评价方面研究。E-mail: hz805@163.com

(王佳实 编辑)

1 材料与方法

1.1 样品采集

2016-08 利用抓斗式采样器采集 12 个 0~10 cm 的表层沉积物样品,采样站位点见图 1;其中,惠东县 9 个站位(以“H”开头),大亚湾区 3 个站位(以“D”开头)。用于分析重金属的沉积物样品置于聚乙烯袋中,分析有机质和硫化物的样品则置于棕色玻璃瓶中,所有样品带回惠州市海洋技术中心实验室进行分析。

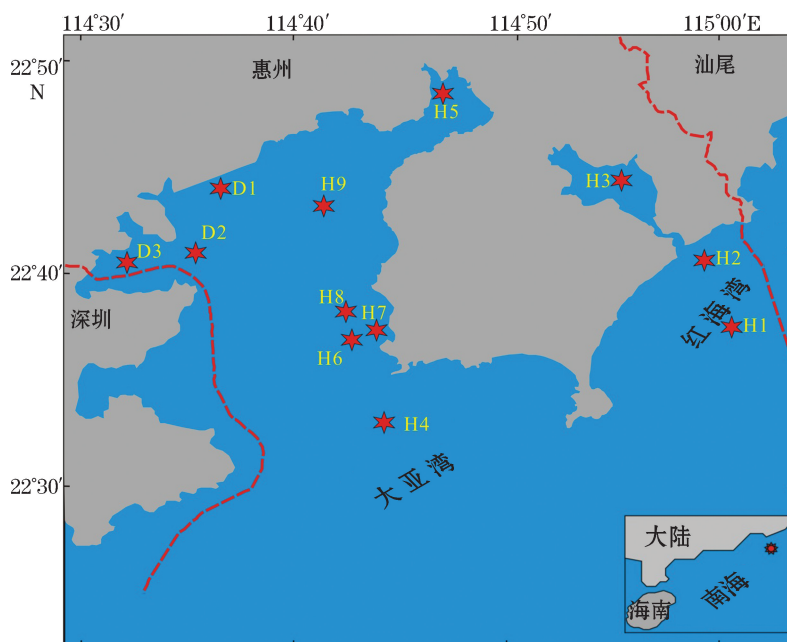


图 1 惠州近岸海域表层沉积物采样站位图

Fig.1 Sampling stations of surface sediments in Huizhou offshore area

1.2 样品分析和数据处理

惠州市海洋技术中心实验室是具有 CMA 资质(194 项检测指标)的专业实验室,对表层沉积物样品中 7 种重金属元素和有机碳、硫化物按照《海洋环境监测规范 第 5 部分 沉积物分析》(GB 17378.5—2007)^[24] 进行前处理、分析测定,其中:

1) Cu, Pb, Cd, Cr 用石墨炉原子吸收法测定; Zn 用火焰原子吸收法测定,所用仪器为 HITACHI J-2000, 检出限为 0.01~1.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$; Hg, As 用原子荧光法测定,所用仪器为:北京吉天 AFS930, 检出限为 0.001~0.01 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

2) 有机碳用重铬酸钾氧化—还原容量法测定,硫化物用碘量法测定。

在重金属分析过程中采用沉积物标准样品进行过程质量控制,7 种元素的测定值均在国家标准质的允许误差范围之内,元素检出限为 0.002~3.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$; 平行样品精密度小于 10%。实验方法准确性高,分析结果可信。

利用 IBM SPSS Statistics 22 进行描述性统计分析和 Pearson 相关分析。

1.3 评价方法

1.3.1 地积累指数法

德国学者 Müller 于 1969 年提出利用地积累指数法(I_{geo})研究重金属的污染程度^[25]。该方法被众多学

者使用^[14, 16, 26-27],以反映外源重金属在沉积物中的富集程度。计算方法为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (1.5B_i)], \tag{1}$$

式中, C_i 为沉积物中重金属*i*的测定值; B_i 为该重金属*i*的地球化学背景值,参照文献^[15-17]的内容,本研究使用广东省土壤元素背景值^[28-29],Cu,Zn,Pb,Cd,Cr,Hg,As 分别为 17.0,47.3,36.0,0.056,50.5,0.078,8.9 mg/kg;1.5 为考虑到成岩作用引入的背景值波动系数。

1.3.2 潜在生态风险指数法

瑞典学者 Håkanson 于 1980 年提出利用潜在生态风险指数法(Risk Index, RI)对沉积物重金属进行生态风险评估^[30],现已被广泛应用^[14-17]。潜在风险生态指数(RI)计算公式为

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_d^i}{C_r^i}, \tag{2}$$

式中, E_r^i 为重金属*i*的潜在生态风险系数; T_r^i 为重金属*i*的毒性响应系数; C_f^i 为重金属*i*的污染系数; C_d^i 为沉积物中重金属*i*的测定值; C_r^i 为相应重金属*i*的参比值。详见文献^[17]。

参照多位学者的研究成果^[15,17,31],本研究使用广东省土壤元素背景值^[28-29]作为参比值 C_r^i ,而 Cu,Zn,Pb,Cd,Cr,Hg,As 所对应的毒性响应系数 T_r^i 分别为 5,1,5,30,2,40 和 10。

2 结果与讨论

2.1 沉积物中重金属的含量

惠州近岸海域沉积物中重金属含量的测定结果如表 1 所示,Cu,Zn,Pb,Cd,Cr,Hg,As 的质量浓度分别为 2.93~28.4,21.1~159.3,5.74~39.5,0.24~1.26,3.51~6.33,0.01~0.08,2.64~25.4 mg/kg。参照《中华人民共和国海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[32],Cu,Zn,Pb,Cd,Cr,Hg,As 七种元素的一类标准限量值分别为 35.0,150.0,60.0,0.50,80.0,0.20,20.0 mg/kg,二类标准限量值分别为 100.0,350.0,130.0,1.50,150.0,0.50,65.0 mg/kg。由表 1 可知,惠州近岸海域沉积物中 Cu,Pb,Cr,Hg 四种元素皆为第 1 类标准;Zn,As 各有 1 个站位为第 2 类标准(分别为 H8、H1),其余站位为第 1 类标准;就 Cd 元素而言,H4,H8,H9,D2 四个站位为第 1 类标准,其余 8 个站位为第 2 类标准。由重金属元素平均值可知(表 1),惠州近岸海域沉积物质量整体良好;其中,沉积物中 Cd 为第 2 类标准,其他 6 种元素皆为第 1 类标准。

表 1 惠州近岸海域沉积物重金属、硫化物(mg/kg)和有机碳(%)含量

Table 1 Contents of heavy metals, organic carbon and sulfides in the sediments of Huizhou offshore area

站 位	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	有机碳	硫化物
H1	10.3	74.5	22.8	0.84	5.56	0.05	25.4	0.16	35.7
H2	3.06	21.1	5.74	0.53	4.66	0.01	3.87	0.02	26.9
H3	2.93	26.9	6.06	0.63	4.36	0.01	4.07	0.06	17.7
H4	5.27	38.5	11.8	0.24	4.31	0.02	7.17	0.01	42.0
H5	12.2	94.4	39.5	0.53	6.31	0.08	17.0	0.54	13.1
H6	7.14	56.4	13.4	0.89	3.51	0.02	5.53	0.12	39.6
H7	7.62	78.1	15.2	1.26	3.70	0.04	2.64	0.03	41.1
H8	14.0	159.3	27.5	0.44	6.33	0.03	11.6	0.37	38.0
H9	15.9	88.5	20.6	0.46	4.97	0.03	6.46	0.37	46.2
D1	18.3	74.3	18.5	0.53	6.16	0.03	14.3	0.23	32.3
D2	16.2	102.5	24.5	0.41	6.02	0.03	17.1	0.54	31.0
D3	28.4	114.7	30.2	0.74	5.98	0.04	6.46	0.92	30.0
平均值	11.8	77.4	19.6	0.63	5.16	0.03	10.1	0.28	32.8

与广东沿海沉积物重金属背景值^[33]相比,惠州近岸海域沉积物 Cd 含量普遍超标,超标范围为 1~8 倍,其中,超标最严重的站点为 H7 站位。沉积物 Cd 超标情况严重,这可能是由于惠州农田土壤重金属 Cd 超标近 2 倍^[29],土壤颗粒遭到风化、侵蚀,经雨水冲刷、河流搬运入海,从而导致沉积物 Cd 超标。

2.2 地积累指数评价

以广东省土壤重金属背景值为参比值,按照式(1)计算惠州近岸海域沉积物 7 种重金属的地积累指数(表 2);Cd 的平均 I_{geo} 为 2.8,33.4% 的采样点为偏重污染,58.3% 的采样点为中度污染,其余为偏中度污染;Zn 的平均 I_{geo} 为-0.1,8.3% 的采样点为偏中度污染,58.3% 的采样点为轻度污染,33.4% 为无污染;Cu,As 的情况类似,只有少数轻度污染,绝大多数无污染;Pb,Cr,Hg 三种元素皆为无污染。根据地积累指数评价(表 2),7 种重金属元素的污染程度为 $Cd>Zn>As>Cu>Pb>Hg>Cr$ 。

表 2 惠州近岸海域沉积物重金属地积累指数评价结果

Table 2 I_{geo} evaluation results of heavy metals in the sediments of Huizhou offshore area

I_{geo}	污染等级	污染程度	所占比例/%						
			Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As
$I_{geo} \leq 0$	0	无污染	91.7	33.4	100	0	100	100	66.6
$0 < I_{geo} \leq 1$	1	轻度污染	8.3	58.3	0	0	0	0	33.4
$1 < I_{geo} \leq 2$	2	偏中度污染	0	8.3	0	8.3	0	0	0
$2 < I_{geo} \leq 3$	3	中度污染	0	0	0	58.3	0	0	0
$3 < I_{geo} \leq 4$	4	偏重污染	0	0	0	33.4	0	0	0
$4 < I_{geo} \leq 5$	5	重污染	0	0	0	0	0	0	0
$I_{geo} > 5$	6	严重污染	0	0	0	0	0	0	0
平均 I_{geo}			-1.4	-0.1	-1.7	2.8	-3.9	-2.2	-0.7

2.3 潜在生态风险指数评价

惠州近岸海域沉积物重金属的潜在生态风险系数 E_r^i 和生态风险指数 RI 的计算结果如表 3 所示。Cd 的 E_r^i 值最大,其后依次为 $Hg>As>Cu>Pb>Zn>Cr$ (表 3);根据潜在生态风险指数等级划分^[17,31](表 4),Cd 具有极强生态风险,而其余 6 种重金属元素只是轻微生态风险。需要注意的是,H5 站位的 Hg 元素具有中等生态风险。

表 3 惠州近岸海域沉积物重金属潜在生态风险指数

Table 3 Potential ecological risk indexes of heavy metals in the sediments of Huizhou offshore area

站 位	潜在生态风险系数 E_r^i							RI
	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	
H1	3.02	1.58	3.16	450	0.22	23.4	28.5	510
H2	0.90	0.45	0.80	284	0.18	4.05	4.35	295
H3	0.86	0.57	0.84	338	0.17	3.64	4.57	348
H4	1.55	0.81	1.64	129	0.17	9.03	8.06	150
H5	3.59	1.99	5.48	284	0.25	42.4	19.1	357
H6	2.10	1.19	1.86	477	0.14	9.49	6.22	498
H7	2.24	1.65	2.11	675	0.15	22.2	2.96	706
H8	4.13	3.37	3.81	236	0.25	13.5	13.1	274
H9	4.68	1.87	2.85	246	0.20	12.7	7.26	276
D1	5.39	1.57	2.56	284	0.24	17.6	16.1	327
D2	4.75	2.17	3.40	220	0.24	15.1	19.1	265
D3	8.35	2.42	4.19	396	0.24	18.7	7.26	438
平均	3.46	1.64	2.73	335	0.20	16.0	11.4	370

由表 3 可知,惠州近岸海域沉积物中 7 种重金属元素的 RI 值为 149.83~706.31,平均值为 370.22;根据表 4 进行评价,惠州近岸海域沉积物重金属具有强生态风险, Cd 的贡献率为 90%。从 12 个站点的 RI 值来看, $H7>H1>H6>D3>H5>H3>D1>H2>H9>H8>D2>H4$;其中, $H7,H4$ 站位分别为很强、中等生态风险,50%的站位是强生态风险,33%的站位是中等生态风险。惠东县所布设站位的 RI 值高于平均值,而大亚湾区则反之。

惠州近岸海域沉积物重金属的潜在生态风险指数等级评价结果(表 4),与地积累指数评价结果(表 2)不同,主要区别在于 Hg 和 Zn 两种元素。 Hg 在沉积物中的富集程度比 Zn 低,然而其毒性水平和水体敏感性则反之。这反映了不同来源重金属元素在沉积物中蓄积的同时,其生态效应有所差异^[15-16,27],需要引起重视。

表 4 沉积物重金属潜在生态风险等级

Table 4 Potential ecological risk grades of heavy metals in the sediments

E_i^r	RI	潜在生态风险程度
$E_i^r < 40$	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_i^r < 80$	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i^r < 160$	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_i^r < 320$	$RI \geq 600$	很强
$E_i^r \geq 320$		极强

注:空白处无数据

2.4 沉积物重金属来源及其影响因素

从图 1 和表 1 可以看出,惠州近岸海域沉积物重金属含量具有较明显的空间变异特征。如 $H3$ 站位在惠东县考洲洋内部(半封闭海湾), $H1$ 站位离岸较远,而 $H3$ 站位的重金属含量明显低于 $H1$ 站位;同样,靠近陆岸的 $H7$ 站位 5 种重金属含量较 $H8$ 站位低,而 Cd 含量则反之。这与不同站位沉积物重金属的自然来源、陆源入海污染物种类、浓度有关^[15, 20-21]。因而,本文分析了沉积物重金属的来源及其影响因素。

诸多学者利用沉积物重金属之间的 Pearson 相关分析,以了解重金属的来源^[16-17,33]。由表 5 可知, Cu, Zn, Pb, Cr 四种元素两两显著正相关($P < 0.05$),而且 Pb 和 Hg, Cr 和 As 皆显著正相关($P < 0.05$),这反映了沉积物重金属之间关系密切,来源相同或相似。不同海洋功能区的重金属含量存在明显差异,其中, $H3$ 站位处于惠东考洲洋养殖区, $H5$ 处于文体休闲娱乐区, $H6, H7, H8$ 三个站位处于石化排污口附近, $D1$ 处于航道区, $D2$ 处于港口区;这与其他学者对大亚湾区及周边海域的研究结果相一致^[18-21, 34-35],反映了近岸工业、航运、养殖业的海污染物排放导致沉积物重金属超标。

沉积物重金属的含量受到环境因素的重要影响^[4]。由于惠州市“海洋渔业资源环境调查项目”(包括水环境、沉积物、生物体质量、水文动力、生态、渔业资源)已经于 2017-11 开始实施(尚未完成),本文参照毛志刚等^[17]、丘耀文等^[18]的研究,仅分析有机碳和硫化物对沉积物重金属分布的影响。沉积有机碳和硫化物含量如表 1 所示,其中,有机碳含量为 0.01%~0.92%,平均值为 0.28%;硫化物含量为 13.1~46.2 mg/kg,平均值为 32.8 mg/kg。

有机碳与 Cu, Pb, Zn, Cr 皆是显著正相关($P < 0.05$, 样本量 $n = 12$, 表 5),这是由于重金属可以通过吸附、阳离子交换和螯合反应与有机碳结合^[36],故有机碳是影响沉积物重金属分布的重要因素^[17,37]。而硫化物与 7 种重金属元素皆未相关($P > 0.05$; 表 5),这与李飞等的研究结果^[37]不同,反映了沉积物重金属的分布可能受到多种环境因素(如沉积物粒径)或多因素协同作用的影响。

表 5 沉积物重金属元素之间及其与有机碳、硫化物的相关分析
Table 5 Correlation analysis among heavy metals, organic carbon and sulfides in the sediments

	Cu	Zn	Pb	Cd	Cr	Hg	As	有机碳	硫化物
Cu	1								
Zn	0.705 *	1							
Pb	0.682 *	0.790 **	1						
Cd	-0.077	-0.043	-0.092	1					
Cr	0.672 *	0.666 *	0.756 **	-0.448	1				
Hg	0.341	0.431	0.823 **	0.200	0.479	1			
As	0.256	0.348	0.569	-0.174	0.662 *	0.561	1		
有机碳	0.887 **	0.695 *	0.801 **	-0.160	0.697 *	0.440	0.255	1	
硫化物	0.070	0.161	-0.211	0.118	-0.342	-0.315	-0.169	-0.226	1

注: $n=12$; * 为 $P<0.05$, ** 为 $P<0.01$;空白处无数据

3 结 论

本文对惠州近岸海域沉积物 7 种重金属元素的含量进行了测定,分析了重金属的污染特征和潜在生态风险,进一步探讨了沉积物重金属的来源及其影响因素。

1)惠州近岸海域沉积物重金属 Cu,Zn,Pb,Cd,Cr,Hg,As 含量的平均值分别为 11.8,77.4,19.6,0.63,5.16,0.03,10.1 mg/kg,Cu,Pb,Cr,Hg 四种元素符合沉积物质量第一类标准,Zn,Cd,As 等元素符合第一、二类标准。

2)地积累指数评价结果表明,7 种重金属元素的污染程度为 $Cd>Zn>As>Cu>Pb>Hg>Cr$ 。所有样点都有不同程度的 Cd 污染,Zn,As,Cu 的污染程度较低,Pb,Cr,Hg 等皆为无污染。

3)潜在生态风险指数评价显示,惠州近岸海域沉积物重金属 RI 平均值为 370.22,总体处于强生态风险状态,Cd 是主要的生态贡献因子。潜在生态风险系数 E_i^r 为 $Cd>Hg>As>Cu>Pb>Zn>Cr$,Cd 具有极强生态风险,其余 6 种重金属元素为轻微生态风险。惠州近岸海域 7 种重金属元素在沉积物中蓄积,其生态效应存在差异,值得引起关注。

4)沉积物 7 种重金属元素间相关分析表明,Cu,Zn,Pb,Cr 具有同源性。有机碳是决定沉积物重金属含量和分布的重要因素。对沉积物重金属来源的研究,需进一步结合环境因素、入海污染源特征进行综合分析。

参考文献(References):

[1] CHEN X, LI S Z, YUAN D K, et al. Distribution characteristics of sediment heavy metals in Bohai Bay and its effect factors[J]. Advances in Marine Sciences, 2017, 35(1): 382-391. 陈秀,李爽兆,袁德奎,等. 渤海湾沉积物重金属的分布特征及影响因素[J]. 海洋科学进展, 2017, 35(1): 382-391.

[2] 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 Sciences, 2015, 33(4): 520-529. 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): 520-529.

[3] 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.

- [4] ESSLEMONT G. Heavy metals in seawater, marine sediments and corals from the Townsville section, Great Barrier Reef Marine Park, Queensland[J]. *Marine Chemistry*, 2000, 71(3-4): 215-231.
- [5] GUÉDRON S, TISSERAND D, GARAMBOIS S, et al. Baseline investigation of (methyl) mercury in waters, soils, sediments and key foodstuffs in the Lower Mekong Basin: The rapidly developing city of Vientiane (Lao PDR)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2014, 143: 96-102.
- [6] RATH P, PANDA U C, BHATTA D, et al. Use of sequential leaching, mineralogy, morphology and multivariate statistical technique for quantifying metal pollution in highly polluted aquatic sediments—A case study: Brahmani and Nandira Rivers, India[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 163(2-3): 632-644.
- [7] FERATI F, KEROLLI-MUSTAFA M, KRAJA-YLLI A. Assessment of heavy metal contamination in water and sediments of Trepça and Sitnica rivers, Kosovo, using pollution indicators and multivariate cluster analysis[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187(6): 338.
- [8] SHANG Z, REN J, TAO L, et al. Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River, China[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2015, 187(79): 1-10.
- [9] CHATTERJEE M, FILHO E V S, SARKAR S K, et al. Distribution and possible source of trace elements in the sediment cores of a tropical macrotidal estuary and their ecotoxicological significance[J]. *Environment International*, 2007, 33(3): 346-356.
- [10] FUKUE M, YANAI M, SATO Y, et al. Background values for evaluation of heavy metal contamination in sediments[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 136(1): 111-119.
- [11] HAN D, CHENG J, HU X, et al. Spatial distribution, risk assessment and source identification of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 115(1-2): 141-148.
- [12] LI G, HU B, BI J, et al. Heavy metals distribution and contamination in surface sediments of the coastal Shandong Peninsula (Yellow Sea)[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 76(1-2): 420-426.
- [13] CHEN X, LI S Z, YUAN D K, et al. Distribution characteristics of sediment heavy metals in Bohai Bay and its effect factors[J]. *Advances in Marine Sciences*, 2017, 35(1): 382-391. 陈秀, 李爽兆, 袁德奎, 等. 渤海湾沉积物重金属的分布特征及影响因素[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 382-391.
- [14] KE X, GUI S, HUANG H, et al. Ecological risk assessment and source identification for heavy metals in surface sediment from the Liaohe River protected area, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 175: 473-481.
- [15] FANG M, WU Y J, LIU H, et al. Distribution, sources and ecological risk assessment of heavy metals in sediments of the Yangtze River Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(2): 563-569. 方明, 吴友军, 刘红, 等. 长江口沉积物重金属的分布、来源及潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(2): 563-569.
- [16] 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 Sciences*, 2015, 33(4): 520-529. 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): 520-529.
- [17] MAO Z G, GU X H, LU X M, et al. Pollution distribution and potential ecological risk assessment of heavy metals in sediments from the different eastern dredging regions of Lake Taihu[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(1): 186-193. 毛志刚, 谷孝鸿, 陆小明, 等. 太湖东部不同类型湖区疏浚后沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(1): 186-193.
- [18] QIU Y W, YAN W, WANG Z D, et al. Distributions of heavy metals in seawater, sediments and organisms at Daya Bay and their ecological harm[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, 24(5): 69-76. 丘耀文, 颜文, 王肇鼎, 等. 大亚湾海水、沉积物和生物体中重金属分布及其生态危害[J]. *热带海洋学报*, 2005, 24(5): 69-76.
- [19] GU Y G, WANG Z H, FANG J, et al. Heavy metal distribution and ecological risk assessment in surface sediments of Daya Bay[J]. *Journal of Instrumental Analysis*, 2009, 28(4): 449-453. 谷阳光, 王朝晖, 方军, 等. 大亚湾表层沉积物中重金属分布特征及潜在生态危害评价[J]. *分析测试学报*, 2009, 28(4): 449-453.
- [20] CAO L L, WANG J H, HUANG C G, et al. Chemical form, control factor and risk assessment of trace heavy metals in superficial sediment of Daya Bay[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(6): 1988-1999. 曹玲珑, 王建华, 黄楚光, 等. 大亚湾表层沉积物重金属元素形态特征、控制因素及风险评价分析[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(6): 1988-1999.
- [21] XU S N, LI C H, XU J J, et al. Pollution by heavy metals in the petrochemical sewage waters of the sea area of Daya Bay and assessment on potential ecological risks[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(6): 2075-2084. 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 等. 大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价[J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2075-2084.
- [22] YANG M L, LIN Q, WANG Z H, et al. Analysis on the content and variation trend of heavy metal in the marine organisms in Daya Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2004, 23(1): 41-43. 杨美兰, 林钦, 王增焕, 等. 大亚湾海洋生物体重金属含量与变化趋势分析[J]. *海洋环境科学*, 2004, 23(1): 41-43.

- [23] YI B, ZHOU P, ZHOU J J, et al. Distribution and quality assessment of Hg, Pb, Cd and As in marine organisms from Daya Bay during 2007~2010[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(2): 226-231. 易斌, 周鹏, 周俊杰, 等. 大亚湾海域 2007~2010 年海洋生物体内 Hg、Pb、Cd 和 As 含量及生物质量评价[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(2): 226-231.
- [24] National Commission on Marine Standardization Technology. The specification for marine monitoring; Part 5 Sediment analysis; GB 17378.5—2007[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2007. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋环境监测规范: 第 5 部分 沉积物分析: GB 17378.5—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [25] MÜLLER G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. *Geojournal*, 1969, 2(3): 108-118.
- [26] ZHU L, LIU J, XU S, et al. Deposition behavior, risk assessment and source identification of heavy metals in reservoir sediments of Northeast China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 142: 454-463.
- [27] LIU C, SHAO S G, FAN C X, et al. Pollution status and risk assessment of heavy metal in the sediment of the severe polluted confluence area of Lake Chaohu[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(4): 1031-1037. 刘成, 邵世光, 范成新, 等. 巢湖重污染汇流湾区沉积物重金属污染特征及风险评价[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(4): 1031-1037.
- [28] WEI F C, CHEN J S, WU Y Y. The background value of soil elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990. 魏复盛, 陈静生, 吴燕玉. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [29] CAI L, XU Z, REN M, et al. Source identification of eight hazardous heavy metals in agricultural soils of Huizhou, Guangdong Province, China[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2012, 78(3): 2-8.
- [30] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [31] XU Z Q, NI S Z, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115. 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [32] National Marine Environmental Monitoring Center. Marine sediment quality; GB 18668—2002[S]. Beijing: Standards Press of China, 2002. 国家海洋环境监测中心. 海洋沉积物质量: GB 18668—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [33] HE Y Q, WEN W Y. Distribution and concentrations of some heavy metals in the offshore bottom sediments, Guangdong Province[J]. *Tropic Oceanology*, 1982, 1(1): 62-75. 何悦强, 温伟英. 广东沿海底质某些重金属含量及其分布规律的探讨[J]. *热带海洋学报*, 1982, 1(1): 62-75.
- [34] YI H. The analysis of the heavy metal change trend in Dayawan Sea[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, 39(14): 111-113. 易华. 大亚湾海域重金属变化趋势分析[J]. *广东化工*, 2012, 39(14): 111-113.
- [35] PENG B, PENG J X, SUN K F. A review on heavy metals contamination in Daya Bay and adjacent waters[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(3): 170-180. 彭勃, 彭加喜, 孙凯峰. 大亚湾及邻近海域重金属污染的研究进展[J]. *生态科学*, 2015, 34(3): 170-180.
- [36] BORG H, JONSSON P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, 32(1): 8-21.
- [37] LI F, XU M. Source characteristics and contamination evaluation of heavy metals in the surface sediments of Haizhou Bay[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1035-1040. 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.

Heavy Metal Pollution and Potential Ecological Risk in the Sediments of Huizhou Offshore Area

YANG Yu-feng, LIANG Hao-liang, FAN Kai-wen, XIE Wen-qi, CHEN Bing-ling,
ZHONG Jin-ming

(*Marine Technology Center of Huizhou, Huizhou 516000, China*)

Abstract: To know the pollution characteristics of heavy metals in the sediments of Huizhou offshore area, the contents of 7 heavy metals (i.e., Cu, Zn, Pb, Cd, Cr, Hg and As) in 12 surface sediment samples collected from Huizhou offshore area in August, 2016 are determined, and then the pollution status and potential ecological risks of the heavy metals are evaluated by means of geo-accumulation index (I_{geo}) and potential ecological risk index (E_r^i) methods. The results show that according to the National Standard for Marine Sediment Quality (GB 18668—2002), the quality of the marine sediments in Huizhou offshore area is generally good and the contents of the 7 heavy metals in the sediments meet the first and second class criteria. The evaluation by the two methods mentioned above shows that the pollution level of the 7 heavy metals in the sediments of Huizhou offshore area follows the order of $\text{Cd} > \text{Zn} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cr}$, of which Cd belongs to moderate pollution and above at all sampling stations, whereas Pb, Cr and Hg belong to no pollution. The potential ecological risk index E_r^i of the 7 heavy metals in the sediments follows, from high to low, the order of $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Zn} > \text{Cr}$, indicating that the heavy metals in the sediments are in a high potential ecological risk (their RI equals to 370.22), of which Cd has extremely strong ecological risk and is the major contribution factor of ecological risk. Cu, Zn, Pb and Cr in the sediments show a significant correlation, implying that they are homologous. The organic carbon plays a significant role in the content and distribution of heavy metals in the sediments.

Key words: sediment; heavy metal; ecological risk; Huizhou

Received: November 23, 2017