

曹妃甸表层沉积物和底栖生物重金属的 污染特征与生物积累

梁 淼^{1,2}, 李德鹏^{1,2*}, 孙丽艳^{1,2}, 钟慧颖^{1,2},
鞠茂伟^{1,2}, 陈兆林^{1,2}, 路 波^{1,2}

(1. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2. 国家海洋局 近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘 要:利用 2014-06 曹妃甸近岸海域 14 个采样站位沉积物和底栖生物体 7 种重金属(Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg 和 As)单因子污染指数、富集系数、潜在生态风险因子和生物-沉积物积累因子, 评估了曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属的污染现状、潜在生态风险水平和生物-沉积物积累程度。结果表明:曹妃甸近岸海域表层沉积物中重金属元素含量大小顺序为 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$; 空间分布上呈现靠近曹妃甸填海区域含量高、远离其区域含量低的趋势。重金属元素污染程度由高到低为 Cd, Hg, Zn, Pb, Cu, Cr, As, 其中 Cd 的污染程度为轻微污染, 其余重金属元素富集污染程度均为无污染。综合潜在生态风险等级“较低”水平, 其中 Cd 元素是较大的潜在风险因子。底栖生物生物体重金属元素含量大小顺序依次为 $Zn > Cu > As > Cd > Cr > Hg > Pb$, Cd 在 2 种双壳类贝类生物体内具有较强的累积作用, 是沉积物重金属含量的 6.64 倍, 其余均显示没有累积。

关键词:曹妃甸; 沉积物重金属; 生物积累; 潜在生态风险

中图分类号:X55

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)04-0017-12

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.04.003

陆源污染物排海的主要途径就是通过近岸海域直接输入海洋, 同时近岸海域也是污染物聚集的重要场所^[1]。针对近岸海域表层沉积物中重金属污染特征研究对判断海洋生态环境、潜在生态风险及典型底栖生物体内的生物富集规律一直倍受关注^[2-4]。重金属元素通过化学沉降过程进入海洋沉积物中, 由于其具有隐蔽性^[5]、难降解、毒性强、易于生物富集絮凝等特点^[6], 对底栖动物的生长发育、生理机能造成直接影响, 甚至导致动物死亡^[7-8]。同时, 吸附在沉积物表面的重金属在物理因素、化学因素及生物因素的多重作用下, 部分重金属元素会重新回到上覆水体中释放污染物形成二次污染, 间接影响海水水质环境和底栖动物栖息环境^[9]。海洋双壳类动物因其成体具有活动能力差、耐污能力强等特点, 是理想的海洋污染指示生物^[10]。因此研究近岸海域沉积物重金属污染物时空分布、来源及其在底栖动物体内的积累特征, 对识别、判断近岸主要污染物来源、传播途径及污染物防控具有重要的现实意义^[11]。

曹妃甸海域位于渤海湾东北部, 属于半封闭内海, 海水的交换能力较弱^[12]。近年来, 随着该区域内的填海造陆、港口开发、工业区建设等开发活动的进行, 大量生活、生产废水废物直接或间接排入近岸海域, 大量重金属也随着污水的排放进入海域, 水体中的重金属经过降解和沉降最终进入沉积物, 导致该海域生物资源和环境质量受到较大污染^[2, 8-11, 13]。为此, 本研究选择曹妃甸近岸海域表层沉积物及底栖生物中双壳类动物中的优势种毛蚶(*Arca subcrenata*)和菲律宾蛤仔(*Ruditapes philippinarum*)为研究对象, 应用单因子评价法、重金属富集因子、生物-沉积物积累因子及 Pearson 相关性分析对曹妃甸近岸海域沉积物及底栖生物体内重金属污染特征、来源和生物积累进行综合评价, 为实现曹妃甸近岸海域生态环境保护提供依据。

收稿日期:2018-05-08

资助项目:国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金——北黄海盆地沉积物碳埋藏特征研究(2017-A-150)

作者简介:梁 淼(1981-), 女, 工程师, 博士, 主要从事海洋工程生态环境影响评价方面研究。E-mail: mliang@nmemc.org.cn

* **通讯作者:**李德鹏(1981-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋工程勘察测绘方面研究。E-mail: dpli@nmemc.org.cn

(王佳实 编辑)

1 材料与方法

1.1 样品采集

2014-06,在曹妃甸近岸海域布设了 14 个表层沉积物和底栖动物调查站位(图 1),样品采集参照《海洋监测规范》(GB 17378—2007)^[14]和《海洋调查规范》(GB 12763—2007)^[15]执行。

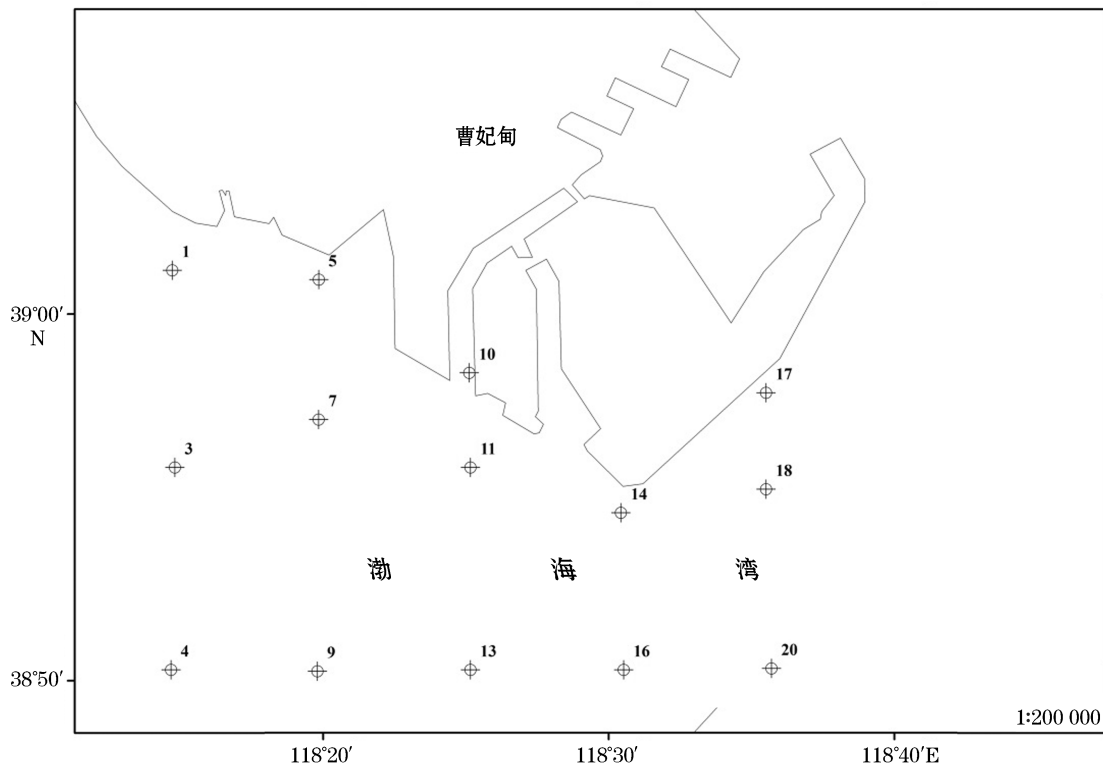


图 1 曹妃甸近岸海域采样站位分布

Fig.1 Location of sampling stations in the coastal area of Caofeidian

曹妃甸工业区围填海工程于 2003 年开始建设,至 2009 年底围堰工程基本实施完毕,2011 年底整个围填海工程基本完毕。曹妃甸填海过程中产生的悬浮物主要是围堤、海堤、港池疏浚、吹填环节产生的悬浮物。本次填海造地工程的围堤和海堤结构形式为袋装砂斜坡堤和结构抛石方案,主要是挖沙过程产生的悬浮物,悬浮物量很少,另外由于 2009 年围堰工程已经实施完毕,填海产生的悬浮物沉到海底,随着海域潮流作用,填海周边的沉积环境已经和外海相对一致,因此本次采样区沉积物与调查区远端沉积物重金属无明显区别。

1.2 样品制备与分析

表层沉积物进行取样深度为 0~10 cm。现场采集样品用聚乙烯袋和密封的磨口广口瓶装好后冷冻保存,运回实验室进行样品分析测定。沉积物分析样品的制备、消化按《海洋监测规范》(GB 17378.5—2007)第 5 部分:沉积物分析的方法^[16]执行。沉积物样品冷冻干燥后,用玛瑙研钵碾碎后过筛(测定 Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg, As 样品过筛孔径为 160 目,测定 TOC 样品过筛孔径为 80 目),四分法缩分分取 10~20 g 制备好的样品,放入样品袋以备分析测定。

采集双壳类动物时,每个站位 6 个样方,采样深度 40 cm,所取生物样品数每站不少于 20 只,用现场海水冲洗干净,装入双层聚乙烯袋中,于 4 °C 冰箱冷藏保存。样品送达实验室后,立即存入 -20 °C 冷冻,冷冻

干燥后研磨,将粉末置于棕色玻璃瓶内避光保存,待分析。

沉积物样品和双壳类底栖动物样品中 Cu、Pb、Zn、Cd 和 Cr 采用原子吸收分光光度法(AA800 原子吸收分光光度计)测定;Hg 采用原子荧光法(AFS-930 型原子荧光光度计)进行测定;As 采用原子荧光法(PF6-2 非色散原子荧光光度计)进行测定;沉积物样品中 TOC 含量采用重铬酸钾氧化—还原容量法测定。

1.3 评价方法

1.3.1 单因子污染指数法

单因子污染指数法(Single Factor Index, SFI) 计算公式为^[13]

$$I_i = C_i / S_i,$$
(1)

式中, I_i 为第 i 项因子的污染指数, C_i 为第 i 项因子的实测浓度, S_i 为第 i 项因子的评价标准。

1.3.2 富集系数法

富集系数(Enrichment Eactor, EF)是评价由于人类开发利用的活动导致表层沉积物重金属污染、富集程度的重要指标,是用来辨别重金属的污染来源和富集状况^[13]。其计算公式为

$$EF = C_s / C_n,$$
(2)

式中, EF 为某种重金属的富集系数,划分为 6 个污染级别^[17](表 1); C_s 为某种重金属的实测值; C_n 为沉积物中某种重金属的参照值,即背景值。

表 1 基于富集系数的沉积物重金属富集程度划分^[17]
Table 1 Classification of heavy metal enrichment degree in sediments based on enrichment factor^[17]

富集程度	级 别	EF 值
无	0	≤ 1
轻度	1	1~2
中度	2	2~5
偏重	3	5~20
重	4	20~40
极重	5	>40

1.3.3 重金属生态风险评价方法——潜在生态风险指数法

利用瑞典学者 Håkanson 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法(Potential Ecological Risk Index, PE-RI)^[18],来评价重金属生态风险,通过潜在生态风险指数可以综合反映沉积物中重金属的污染程度、转移规律以及对海洋生态环境的影响潜力^[19-20],其计算公式为

$$C_i^i = C_d^i / C_b^i,$$
(3)

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_i^i,$$
(4)

$$RI = \sum T_r^i \cdot C_d^i / C_b^i,$$
(5)

式中, C_i^i 为第 i 种重金属元素的污染系数, E_r^i 为第 i 种重金属元素的潜在生态风险指数, T_r^i 为毒性系数, C_d^i 为重金属含量的实测值(mg/kg), C_b^i 为重金属背景值(mg/kg), RI 为重金属综合潜在生态风险指数。

渤海湾工业化前背景值^[21]和重金属元素的毒性响应参数选取见表 2^[22],Håkanson 潜在生态风险分级标准划分见表 3^[18]。

表 2 沉积物中重金属的参考值和毒性系数^[22]
Table 2 Reference values and toxicity coefficient of heavy metals in sediments^[22]

项 目	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	Hg	As
$C_b^i / (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	26	22.4	73.6	0.15	60	0.065	15.3
T_r^i	5	5	1	30	2	40	10

表 3 潜在生态风险分级标准^[18]
Table 3 Grading standards for potential ecological risk^[18]

Häkanson 单个污染物 潜在生态风险参数 E_i^p	风险参数 E_i^p 程度分级	Häkanson 综合潜在 生态风险指数 RI	风险指数 RI 程度分级
$E_i^p < 40$	低潜在生态风险	$RI < 150$	低生态风险
$40 \leq E_i^p < 80$	中潜在生态风险	$150 \leq RI < 300$	中生态风险
$80 \leq E_i^p < 160$	较高潜在生态风险	$300 \leq RI < 600$	较高生态风险
$160 \leq E_i^p < 320$	高潜在生态风险	$RI \geq 600$	很高生态风险
$E_i^p \geq 320$	很高潜在生态风险		

注:空白处无数据

1.3.4 重金属的生物-沉积物积累因子

重金属的生物-沉积物积累因子(Biological Sediment Accumulotion Focctor, BSAF) 主要用于指示生物对水体及沉积物中重金属的生物积累程度^[23],计算公式为

$$BSAF = C_{org} / C_{sed}, \tag{6}$$

式中, C_{org} 为生物体重金属含量, C_{sed} 为沉积物重金属含量。

1.4 数据统计分析

利用数理统计软件 SPSS 22.0 对曹妃甸近岸海域沉积物重金属含量和 TOC 含量、各站位生物体内 7 种重金属的生物-沉积物积累因子和沉积物有机碳含量进行统计分析,利用双变量 Pearson 相关性分析研究各变量间的相关性,统计显著性水平 $P < 0.05$,极显著水平 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 表层沉积物中重金属元素的含量与平面分布

由表 4 可知,曹妃甸近岸海域表层沉积物中各重金属元素含量大小顺序依次为 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$ 。以渤海工业化前沉积物重金属含量作为背景值,Cd 的平均含量是背景值的 1.67 倍;其余重金属平均含量低于背景值。

由图 2 可知,Cu 和 Cd 含量的平面分布特征相似,呈现靠近曹妃甸填海区域含量高、远离其区域含量低的趋势;Pb 和 Zn 含量的平面分布呈现曹妃甸纳潮通道海域处高,外部海域低的趋势;Hg、As 和 Cr 含量的平面分布呈现由西北向东南逐渐降低的趋势。

表 4 曹妃甸近岸海域沉积物重金属含量值与背景值($mg \cdot kg^{-1}$)
Table 4 The contents and background values of heavy metals in the surface sediments in the coastal area of Caofeidian ($mg \cdot kg^{-1}$)

统计值	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
最大值	18.70	21.80	89.40	0.35	0.088	8.87	41.50
最小值	12.30	13.70	47.50	0.19	0.038	6.75	25.30
平均值	15.93	17.19	57.65	0.25	0.058	7.82	32.41
背景值	26.00	22.40	73.60	0.15	0.065	15.30	60.00

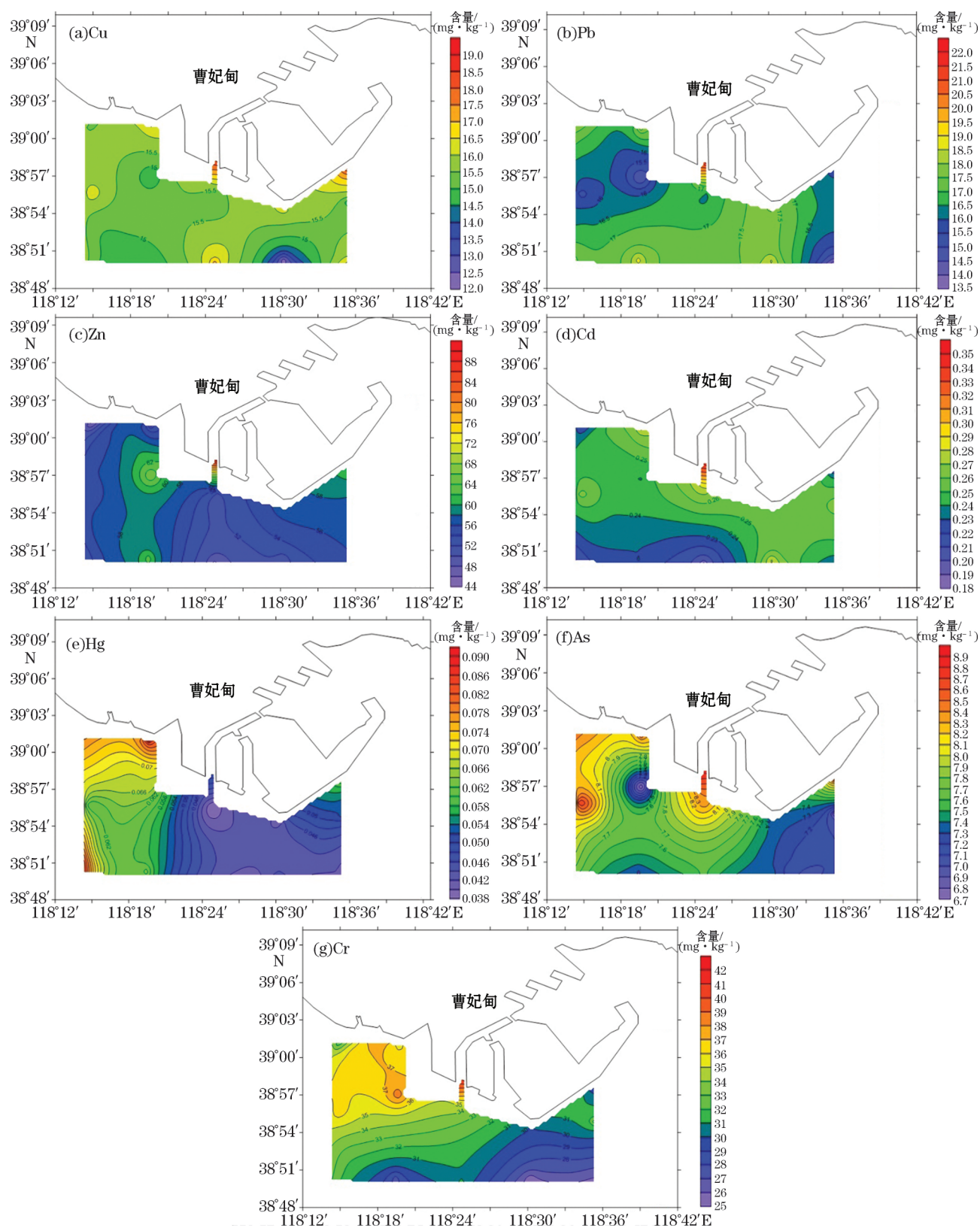


图2 曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属含量的平面分布

Fig.2 Horizontal distributions of the heavy metal contents in the surface sediments in the coastal area of Cao Feidian

2.2 表层沉积物重金属污染程度及生态风险分析

2.2.1 重金属元素污染程度分析

1)单因子污染指数

由表 5 可知,曹妃甸近岸海域表层沉积物 7 种重金属平均含量均满足海洋沉积物质量一类标准,各重金属元素单因子污染指数大小排序为 $Cd > Cu > Cr > As > Zn > Hg > Pb$ 。

表 5 曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属元素的单因子污染指数

Table 5 The single factor pollution indexes of heavy metal elements in the surface sediments in the coastal area of Caofeidian

项 目	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
最大值	0.53	0.36	0.60	0.70	0.44	0.44	0.53
统计值 最小值	0.35	0.23	0.32	0.38	0.19	0.34	0.32
平均值	0.46	0.29	0.38	0.50	0.30	0.39	0.41
海洋沉积物质量一类标准值/ ($mg \cdot kg^{-1}$)	≤ 0.20	≤ 35.0	≤ 60.0	≤ 150.0	≤ 0.50	≤ 80.0	≤ 20.0

2)富集系数

通过了解曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属元素的富集程度,探究研究区域的重金属属于人为活动还是来自地壳贡献。采用渤海湾工业化前背景值进行富集系数的计算。根据式(2)计算各种金属元素的富集系数值,结果见表 6。

由表 6 可知,Cu,Pb,Zn,Hg,As 和 Cr 富集系数平均值小于 1,其富集污染程度为无污染;Cd 的富集系数大于 1 小于 2,属于轻度富集污染,富集污染程度较高区域主要集中在曹妃甸工业区填海区附近,最高站位为 10 号站位($EF=2.33$)。各种重金属元素富集程度大小顺序: $Cd > Hg > Zn > Pb > Cu > Cr > As$ 。

表 6 曹妃甸近岸海域沉积物重金属富集系数

Table 6 The enrichment factor indexes of heavy metals in the surface sediments in the coastal area of Caofeidian

统计值	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
最大值	0.72	0.97	1.21	2.33	1.35	0.58	0.69
最小值	0.47	0.61	0.65	1.27	0.58	0.44	0.42
平均值	0.61	0.77	0.78	1.67	0.90	0.51	0.54

结合单因子污染指数和富集系数的分析结果,可见 SFI 与 EF 的评价结果一致,研究区域内 Cd 的富集污染程度为轻微污染,在曹妃甸工业区填海区附近甚至存在中度污染。陈燕珍等研究曹妃甸围填海工程开发对近岸沉积物重金属的影响也指出 Cd 元素处于偏中度的污染程度^[24],本研究结果与其是一致的。重金属来源分为 2 种:一种来源于岩石的自然风化和侵蚀以及灰尘、降雨或水质交换过程产生的许多分散污染源;另一种来源于受污染的河流、居民生活废水和工农业污水排放口等^[25-26]。根据《2014 年河北省海洋环境状况公报》^[27]指出,通过对唐山市 7 个陆源入海排污口进行监测评价,有 6 个排污口监测超标,超标污染物主要为 pH、化学需氧量、悬浮物和总磷。由此推断研究区域 Cd 元素可能在人类生产、生活活动的影响下积累明显。

通过对重金属元素含量及沉积物特征参数之间的相关分析,可以初步判断重金属元素之间的同源性^[28]。表层沉积物重金属元素具有相同的化学行为或相同的来源是由于其所处的研究区域一致,且各元素之间具有显著相关性^[29]。由表 7 可见,曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属 Cd 与 Pb,Zn 之间呈现显著正相

关性($P<0.05$),这表明他们可能具有相同的污染源。由于有机质对重金属有络合、螯合作用,使得重金属易于富集在有机质中并随着有机质发生迁移,因此重金属含量受到有机质含量高低的控制^[30]。

为了更进一步研究重金属的来源机制,本次研究加入 TOC 组分,因为 TOC 代表沉积物中有机质的含量,有机质通过吸附、络合等作用对重金属有着较高的富集性^[31]。TOC 的含量与有机质含量呈正比关系,因此 TOC 含量的变化能反映有机质的变化,TOC 是重金属迁移的主要载体^[32]。由表 7 可见,Cd、Hg 与 TOC 呈现极显著正相关性($P<0.01$),说明水体中的重金属 Cd、Hg 易与有机碳通过表面吸附、阳离子交换反应和螯合反应,形成金属有机络合物而从水体中移出^[33],并吸附于颗粒沉积物中,因此 TOC 含量是控制表层沉积物重金属 Cd、Hg 含量分布和来源的重要因素,进一步证明沉积物中的 Cd 主要来源是人为污染。

表 7 曹妃甸近岸海域表层沉积物各重金属元素和 TOC 含量间的相关系数
Table 7 The correlation coefficients between the heavy metals and the TOC concentrations in the surface sediments in the coastal area of Caofeidian

要 素	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr	TOC
Cu	1.000							
Pb	0.104	1.000						
Zn	0.382	0.419	1.000					
Cd	0.032	0.549 *	0.605 *	1.000				
Hg	0.006	0.080	-0.141	-0.131	1.000			
As	0.584 *	0.329	0.147	0.308	0.263	1.000		
Cr	0.314	0.251	0.443	0.480	0.331	0.386	1.000	
TOC	-0.041	0.062	-0.191	0.630 **	0.749 **	0.322	0.322	1.000

注:样本数为 14;* 表示双侧检验 $P<0.05$; ** 表示双侧检验 $P<0.01$

2.2.2 重金属潜在生态风险分析

由表 8 可知,7 种重金属元素平均含量的潜在生态风险指数大小顺序: $Cd>Hg>As>Pb>Cu>Cr>Zn$ 。其中,Cd 的潜在生态风险指数 E_i^p 值大于 40 但小于 80,其生态风险等级已达到“中等”;Cu、Pb、Zn、Hg、Cr 和 As 的潜在生态风险指数 E_i^p 值小于 40,生态风险等级为“较低”。综合潜在生态风险指数($RI=99.93$)小于 150,该海域重金属元素综合潜在生态风险等级“较低”,各站位 RI 值中 Cd 的贡献率最大,主要原因是表层沉积物中 Cd 的含量高于背景值,且 Cd 的污染程度较高,因此,对曹妃甸近岸海域表层沉积物中的 Cd 元素应予以重视。陈燕珍等研究曹妃甸围填海工程开发对近岸沉积物重金属的影响也指出 Cd 的生态风险指数为中等至较高等级状态^[24],本研究结果与其结果是一致的。

由图 3 可以看出,曹妃甸近岸海域表层沉积物的综合潜在生态风险指数空间分布特征均呈现靠进填海区高、远离填海区低的趋势,这可能是与曹妃甸工业区工业活动增多、陆源污染排放的增加有关。

表 8 曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属潜在生态风险指数
Table 8 The potential ecological risk indexes of heavy metals in the surface sediments in the coastal area of Caofeidian

统计值	E_i^p 值							RI 值
	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr	
最大值	3.60	4.87	1.21	70.00	54.15	5.80	1.38	124.78
最小值	2.37	3.06	0.65	38.00	23.38	4.41	0.84	78.97
平均值	3.06	3.84	0.78	50.14	35.91	5.11	1.08	99.93

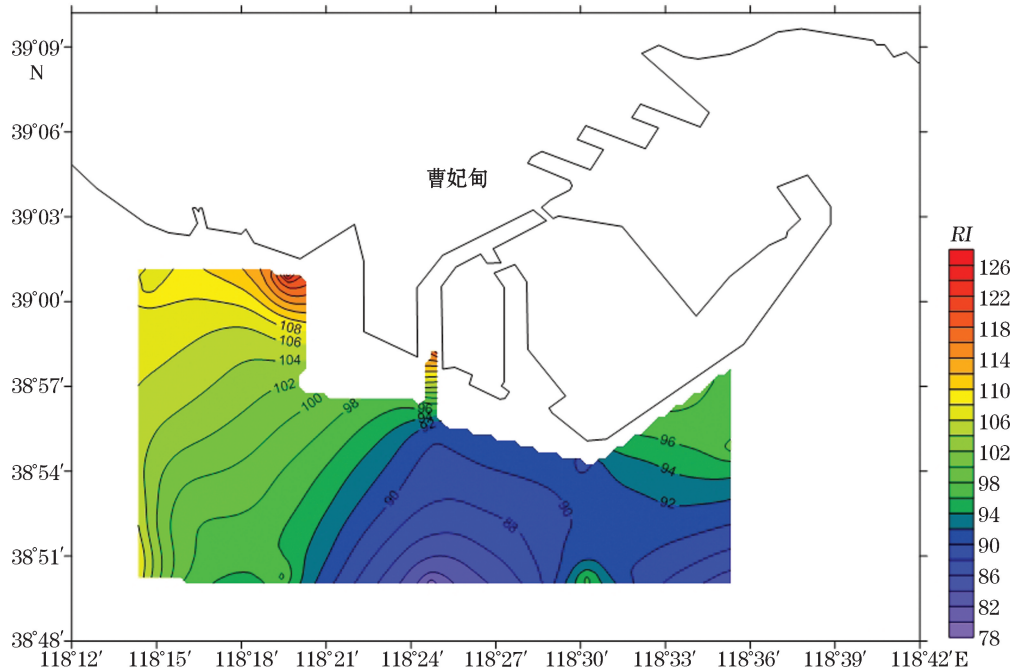


图3 曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属综合潜在生态风险指数的平面分布

Fig.3 Horizontal distributions of comprehensive potential ecological risk indexes of the heavy metals in the surface sediments in the coastal area of Cao Feidian

2.3 底栖生物对沉积物中重金属的生物积累

由表9可知,在2种双壳类贝类生物体中,Cu,Pb,Zn,Cd,Hg,Cr和As含量均满足《海洋生物质量》(GB 18421—2001)^[34]的一类标准,各重金属元素含量大小顺序为 $Zn > Cu > As > Cd > Cr > Hg > Pb$,但与沉积物中各重金属元素含量呈现 $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$ 特征不一致。可见,沉积物中重金属的含量高低不是海洋双壳类动物对重金属的积累程度主要决定因素。

重金属吸收的生物性和非生物性因子是决定沉积物中重金属的生物积累程度主要因素之一,其中生物性因子包括生物体对营养性矿物的需求量、生物-沉积物积累因子等,非生物因子包括重金属的存在形态、由于化学、物理因子变化而引起的金属可溶性等^[35-36]。最常用的判别沉积物中的重金属是否能够在生物体内积累的因子是生物-沉积物积累因子^[23]。当 $BSAF > 2$,表示积累程度较大; $1 < BSAF < 2$,出现轻度积累; $BSAF < 1$,表示没有积累^[23]。本研究表明(表10),重金属Cd在2种双壳类贝类生物体内具有较强的累积作用,其平均值分别为1.66和1.69,生物体内的含量是沉积物重金属含量的6.64倍,其余重金属元素在2种双壳类贝类生物体内均显示没有累积:一方面双壳类贝类属于滤食性贝类,当其滤食有机质悬浮颗粒的同时,吸收了悬浮颗粒物吸附的重金属离子,导致了重金属元素在体内的积累^[33];另一方面由于双壳类贝类排出重金属镉的生物学半衰期要长于其他重金属^[37],进而出现Cd在2种双壳类贝类生物体内轻度积累现象。

将2种双壳类贝类对7种重金属的生物-沉积物积累因子值分别与沉积物中TOC进行相关性分析,结果见表11。由表11可知,毛蚶体内Pb,Zn,Cd的BSAF值与沉积物中的TOC呈现正相关性,表明沉积物中TOC直接影响着重金属Pb,Zn,Cd在生物体内的积累程度。Eimers等^[38]通过稳定同位素示踪试验,提出了沉积物中有机质的增加,使其重金属的保留能力增强。由此可以推断,毛蚶对重金属Pb,Zn,Cd的保留能力增强,而生物可利用性降低;菲律宾蛤仔体内的7种重金属的BSAF值与沉积物中的TOC呈现负相关性,说明重金属菲律宾蛤仔不易吸收利用重金属,生物积累作用较低。

表 9 曹妃甸近岸海域底栖生物体重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 9 Heavy metal contents in benthos in the coastal area of Caofeidian ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

种 类	拉丁名	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
毛蚶	<i>Arca subcrenata</i>	3.99	0.04	5.84	0.41	0.04	0.45	0.26
菲律宾蛤仔	<i>Ruditapes philippinarum</i>	4.34	0.04	5.86	0.41	0.03	0.43	0.25

表 10 曹妃甸近岸海域重金属的生物-沉积物积累因子

Table 10 The biota-sediment accumulation factors of heavy metals in the coastal area of Caofeidian

种 类	Cu	Pb	Zn	Cd	Hg	As	Cr
毛蚶	0.25	0.003	0.11	1.66	0.48	0.06	0.008
菲律宾蛤仔	0.27	0.002	0.10	1.69	0.49	0.05	0.008

表 11 沉积物的 TOC 与两种双壳类动物的 BSAFs 的 Pearson 相关系数

Table 11 The Pearson correlation coefficients between the TOC in sediments and the BSAFs in two types of bivalves

参 数	Cu		Pb		Zn		Cd		Hg		As		Cr	
	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔	毛蚶	菲律宾蛤仔
TOC	-0.359	-0.045	0.016	-0.013	0.346	-0.343	0.034	-0.098	-0.412	-0.223	-0.359	-0.253	-0.198	-0.641 *

注: * 置信度(双侧)为 0.05 时相关性显著

3 结 论

本文通过对 2014-06 曹妃甸海域沉积物和底栖生物体 7 种重金属(Cu,Pb,Zn,Cd,Cr,Hg,As)单因子污染指数、富集系数、潜在生态风险因子和生物-沉积物积累因子研究,评估了曹妃甸海域表层沉积物重金属的污染现状、潜在生态风险水平和生物-沉积物积累程度,获得的主要研究结果如下:

1)曹妃甸近岸海域表层沉积物重金属含量均满足海洋沉积物质量一类标准,其大小顺序依次为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$ 。重金属空间分布上呈现靠近曹妃甸填海区域含量高、远离其区域含量低的趋势。

2)曹妃甸近岸海域沉积物各重金属污染程度由高到低为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{As}$,其中 Cd 的富集污染程度呈现轻微污染,结合生态潜在风险分析,Cd 的潜在生态风险等级已达到“中等”,说明此海域主要污染因子为 Cd。

3)曹妃甸近岸海域底栖生物生物体重金属元素含量大小顺序为 $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Cr} > \text{Hg} > \text{Pb}$,重金属 Cd 在 2 种双壳类贝类生物体内具有较强的累积作用,生物体内的含量是沉积物重金属含量的 6.64 倍。其余重金属元素在 2 种双壳类贝类生物体内均显示没有累积。

参考文献(References):

[1] LIN L H, WEI H J, HUANG H M. Contamination status and bioaccumulation of the heavy metals in the surface sediments and benthos in Daya Bay[J]. Ecological Science, 2017, 36(6): 173-181. 林丽华,魏虎进,黄华梅. 大亚湾表层沉积物和底栖生物中重金属的污染特征与生物积累[J]. 生态科学, 2017, 36(6): 173-181.

[2] DALLINGER R. Strategies of metal detoxification in terrestrial invertebrates[C]// University of Innsbruck. In Ecotoxicology of Metals in

- Invertebrates. Lewis Floridar: Boca Raton, 1993: 246-332.
- [3] XU Y, WANG Q L, LI X, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical bays in the Bohai Sea. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(3): 428-438. 许艳, 王秋璐, 李潇, 等. 环渤海典型海湾沉积物重金属环境特征与污染评价[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(3): 428-438.
- [4] JARUP L. Hazards of heavy metal contamination[J]. *British Medical Bulletin*, 2003, 68(1): 167-182.
- [5] SUN Q B, ZHANG C, WU L G, et al. Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in Honghai Bay[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(5): 843-849. 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.
- [6] XU Y D, WEI X, YANG J M, et al. Contaminant characteristics and ecological risk assessment on pollution by seven heavy metals in surface sediments in Shandong coastal areas[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 651-658. 徐艳东, 魏潇, 杨建敏, 等. 山东近岸海域表层沉积物 7 种重金属污染特征和生态风险评估研究[J]. *海洋与湖沼*, 2015, 46(3): 651-658.
- [7] ZHANG X J, ZHAO S, FENG C H, et al. Distribution and accumulation factors of heavy metals in organisms in southern Bohai Bay[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(3): 267-271. 张晓举, 赵升, 冯春晖, 等. 渤海湾南部海域生物体内的重金属含量与富集因素[J]. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 267-271.
- [8] LI L Y, WANG Z L, WEI X H, et al. Distribution of dissolved heavy metals in the surface water in the west area of the Southern Yellow Sea in winter[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 201-209. 李劳钰, 王宗灵, 魏修华, 等. 南黄海西部冬季表层水中的溶解态重金属分布特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 201-209.
- [9] 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 Science*, 2017, 35(3): 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(3): 382-391.
- [10] DÍAZ-DE A M, GALINDO-RIAÑO M D, CASANUEVA-MARENCO M J, et al. Assessment of the metal pollution, potential toxicity and speciation of sediment from Algeciras Bay (south of Spain) using chemometric tools[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 190(1-3): 177-187.
- [11] PAN K, WANG W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 421-422: 3-16.
- [12] SUO A N, ZHANG M H, YU Y H, et al. Post project environmental retrospective evaluation of reclamation in Caofeidian[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2012, 28(2): 105-111. 索安宁, 张明慧, 于永海, 等. 曹妃甸围填海工程的环境影响回顾性评价[J]. *中国环境监测*, 2012, 28(2): 105-111.
- [13] CHABUKDHARA M, NEMA A K. Assessment of heavy metal contamination in Hindon River sediments: a chemometric and geochemical approach[J]. *Chemosphere*, 2012, 87(8): 945-953.
- [14] National Technical Administration Committee of Ocean Standardization. Marine monitoring code: part 3 Sampling, storage and transportation; GB 17378.3—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 1-13. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范: 第 3 部分 样品采集、贮存与运输; GB 17378.3—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 1-13.
- [15] National Center of Ocean Standards and Metrology. Marine survey specification: part 6 Marine life survey; GB/T 12763.6—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007. 国家海洋标准计量中心. 海洋调查规范: 第 6 部分 海洋生物调查; GB/T 12763.6—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] National Technical Committees of Ocean Standardization. Marine monitoring code: part 5 Sediment analysis; GB 17378.5—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2008: 1-95. 全国海洋标准化技术委员会. 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: 1-95.
- [17] SUTHERLAND R A. Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, oahu, Hawaii[J]. *Environmental Geology*, 2000, 39(6): 611-627.
- [18] HÄKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [19] LIU C, WANG Z Y, HE Y, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5): 33-37. 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 33-37.
- [20] TANG Y J. Application of Håkanson index method assessing ecological risk of heavy metal from sediments in the water[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(3): 66-69. 唐银健. Håkanson 指数法评价水体沉积物重金属生态风险的应用进展[J]. *环境科学导刊*, 2008, 27(3): 66-69.
- [21] ZHOU X B, MEI P Y, PENG L L, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sedi-

- ments of Bohai Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(3): 452-456. 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.
- [22] BORG H, JONSSON P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments[J]. Marine Pollution Bulletin, 1996, 32: 8-21.
- [23] FU W C, MENG F P, WANG Z F, et al. Heavy metals in the intertidal sediments and two marine bivalves along the Beibu Bay: contamination status and bioaccumulation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013, 33(5): 1401-1409. 付文超, 孟范平, 王志峰, 等. 北部湾潮间带沉积物和双壳类动物中的重金属: 污染特征与生物积累[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1401-1409.
- [24] CHEN Y Z, SUN Q B, WANG Y, et al. Impact of the sea reclamation project in Caofeidian on the heavy metals contents in sediments[J]. Marine Environmental Science, 2015, 34(3): 402-405. 陈燕珍, 孙钦帮, 王阳, 等. 曹妃甸围填海工程开发对近岸沉积物重金属的影响[J]. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 402-405.
- [25] BIRCH G F, EVEN DEN D, TEUTSCH M E. Dominance of point source in heavy metal distributions in sediments of a major Sydney estuary (Australia)[J]. Environmental Geology, 1996, 28(4): 169-174.
- [26] MATTHIESSEN P, REED J, JOHNSON M. Sources and potential effects of copper and zinc concentrations in the estuarine waters of Essex and Suffolk, United Kingdom[J]. Marine Pollution Bulletin, 1999, 38(10): 908-920.
- [27] Hebei Oceanographic Bureau. 2014 Hebei Province marine environment bulletin[EB/OL].(2015-04-27)[2018-05-07]. http://www.soa.gov.cn/xw/dfdwdt/dfjg/201504/t20150427_37142.html. 河北省海洋局. 2014 年河北省海洋环境状况公报[EB/OL].(2015-04-27)[2018-05-07]. http://www.soa.gov.cn/xw/dfdwdt/dfjg/201504/t20150427_37142.html.
- [28] ZHOU B, LIU W, LIU Y G, et al. Potential ecological risk analysis of heavy metals in surface sediments from typical ecologically regions of south Bohai Bay[J]. Marine Environmental Science, 2013, 32(4): 533-537. 周斌, 刘伟, 刘友刚, 等. 渤海湾南部典型生态区表层沉积物重金属潜在生态风险分析[J]. 海洋环境科学, 2013, 32(4): 533-537.
- [29] QIAO YONGMIN. Environmental geochemistry of heavy metals in sediments of coastal area of East Guangdong Province[D]. Guangzhou: Jinan University, 2004. 乔永民. 粤东近岸海域沉积物重金属环境地球化学研究[D]. 广州: 暨南大学, 2004.
- [30] AUBERT H, PANDA M. Trace elements in soil[M]. LIU Z, ZHU Z Q, TANG L H, et al, Trans. Beijing: Science Press, 1982. 奥贝尔 H, 潘塔 M. 土壤中的微量元素[M]. 刘铮, 朱其清, 唐丽华, 等, 译. 北京: 科学出版社, 1982.
- [31] QIU Y, ZHU L S, LI M Q. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay, China[J]. Marine Science Bulletin, 2005, 17(1): 69-76.
- [32] GUGGENBERGER G, GLASER B, ZECH W. Heavy metal binding by hydrophobic and hydrophilic dissolved organic carbon fractions in a Spodosol A and B horizon[J]. Water, Air and Soil Pollution, 1994, 72(1-4): 111-127.
- [33] REUTER J H, PERDUE E M. Importance of heavy metal-organic matter interactions in nature waters[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1977, 41(2): 325-334.
- [34] BAUDO R, GIESY J P, MUNTAU H. Sediments: chemistry and toxicity of in-place pollutants[M]. Florida: Inorganic Sediment Chemistry and Elemental Speciation, 1990.
- [35] National Center of Ocean Standards and Metrology. Marine quality: GB 18421—2001[S]. Beijing: China Standard Press, 2002. 国家海洋标准计量中心. 海洋生物质量: GB 18421—2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [36] WATANABE T, KIRON V, SATOH S. Trace minerals in fish nutrition[J]. Aquaculture, 1997, 151(1/4): 185-207.
- [37] ZHANG S N. Studies on the bioaccumulation kinetics of heavy metals by economic shellfish[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003. 张少娜. 经济贝类对重金属的生物富集动力学特征的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [38] EIMERS M C, EVANS R D, WELBOURN P M. Partitioning and bioaccumulation of cadmium in artificial sediment systems: application of a stable isotope tracer technique[J]. Chemosphere, 2002, 46(4): 543-551.

Pollution Characteristics and Bioaccumulation of Heavy Metals in Surface Sediments and Benthos in the Coastal Area of Caofeidian

LIANG Miao^{1,2}, LI De-peng^{1,2}, SUN Li-yan^{1,2}, ZHONG Hui-ying^{1,2}, JU Mao-wei^{1,2},
CHEN Zhao-lin^{1,2}, LU Bo^{1,2}

(1. *National Marine Environmental Monitoring Centre*, Dalian 116023, China;

2. *Key Laboratory for Ecological Environment in Coastal Areas*, SOA, Dalian 116023, China)

Abstract: By using single factor pollution index, enrichment factor, potential ecological risk factor and biota-sediment accumulation factor of 7 heavy metals (Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Hg and As) in the surface sediments and benthos collected from 14 sampling stations in the coastal area of Caofeidian in June of 2014, the pollution status of heavy metals in the surface sediments, the potential ecological risk level and the biota-sediment accumulation degree in the coastal area of Caofeidian are assessed. The results show that the contents of heavy metals in the surface sediments of the study area are in the following order of $Zn > Cr > Pb > Cu > As > Cd > Hg$, and the spatial distributions of the heavy metal contents show that the contents of heavy metals tend to be higher near the Caofeidian reclamation area and lower far away from this area. The pollution degrees of the heavy metals degree from high to low: $Cd > Hg > Zn > Pb > Cu > Cr > As$, of which the pollution degree of Cd belongs to slight pollution and others are all pollution-free. The comprehensive potential ecological risk grades of the heavy metals in the coastal area of Caofeidian are at a low level, but Cd could be the highest potential ecological risk factor. The contents of heavy metals in benthos are in the following order of $Zn > Cu > As > Cd > Cr > Hg > Pb$, of which Cd shows a relatively higher bioaccumulation in two types of bivalve shellfish organisms and all others show no significant bioaccumulation.

Key words: Caofeidian; heavy metals in sediments; bio-accumulation; potential ecological risk

Received: May 8, 2018