

曹妃甸附近海域表层沉积物重金属含量 年际变化及污染评价

胡 琴, 李 强, 张敏霞, 任叙合

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要:根据 2008—2015 年 3 个航次对曹妃甸附近海域共 51 个采样站位的表层沉积物调查资料,分析了表层沉积物中 Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn 和 As 七种重金属的质量分数和年际变化特征,采用超标率统计法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对其重金属含量进行了评价。结果表明,研究海域表层沉积物中重金属含量总体处于较低水平,3 个航次中仅有 1 个站位的 Cu 超标,其他调查站位的重金属含量均符合第一类标准。研究海域表层沉积物中各重金属的年际变化略有差异,Cu, Pb 和 Zn 的含量相对比较稳定;Cr 的含量表现为逐年降低的趋势;Cd 和 As 的含量表现为先降低后增大的趋势;而 Hg 的含量表现为先增大后略降低的趋势。近 8 a 来总体上曹妃甸附近海域表层沉积物中重金属含量的年际变化不显著。采用地累积指数法评价显示,7 种重金属元素的 I_{geo} 多年平均大小排序为 $Cd > Pb > Hg > Cu > Cr > Zn > As$,除个别站位 Cd 受到轻度污染外,其他 6 种重金属污染程度均为清洁。采用潜在生态风险评价显示,研究海域 7 种重金属的 E_i^r 多年平均大小排序为 $Cd > Hg > As > Pb > Cu > Cr > Zn$,综合潜在风险指数等级为低生态风险水平。结合地累积指数法和潜在生态风险指数法两种评价方法得出的评价结果一致,结果表明 Cd 是曹妃甸附近海域表层沉积物中主要潜在生态风险因子。

关键词:曹妃甸;表层沉积物;重金属;年际变化;污染评价

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

文章编号:1002-3682(2018)04-0071-09

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2018.04.009

近年来由于陆源入海污染物大幅度增加,尤其是入海污染物中含有大量重金属,使得近岸海域面临着巨大的生态环境压力。根据《2015 年北海区海洋环境公报》^①,渤海近岸局部海域海水环境污染较重,大部分近岸海域典型生态系统处于亚健康状态,其中包括滦河口—北戴河生态系统。曹妃甸附近海域地处滦河口的南部、海河入海口的东部,受地表径流来水影响较大。入海污染物中携带的大量重金属不断蓄积到近岸海域的沉积物中,重金属特殊的化学特性和毒性能随食物链不断迁移,最终对人类健康和生态系统产生潜在威胁。

近年来,国内外开展了大量的关于海洋表层沉积物中重金属污染及评价的研究^[1-5]。不少学者对环渤海海域^[6-7]、渤海湾^[8-9]、渤海中部^[10]、莱州湾^[11-12]以及辽东湾^[13-14]等沉积物中重金属的污染进行了研究,还有学者针对曹妃甸围填海工程开发对近岸沉积物重金属的影响进行了评价^[15];刘宪斌等^[16]对曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境进行了分析,得出人工填海工程影响了曹妃甸近岸海域沉积环境。通过上述分析可知,对渤海典型海湾(渤海湾、辽东湾和莱州湾)的沉积物重金属研究相对较多,而对曹妃甸附近海域仅限于其表层沉积物粒度分析和围填海对近岸沉积物重金属的影响分析,关于曹妃甸附近海域表层沉积物中重金属的污染评价及其年际变化趋势的研究鲜有报道。我们根据 2008—2015 年 3 个航次的调查数据对曹妃甸附近海域表层沉积物中重金属含量进行了年际变化分析和污染综合评价,为该海域海洋环境

收稿日期:2018-07-16

资助项目:中海石油(中国)有限公司科技项目——海上油气田开发海洋环境影响研究(YXKY-2016-ZY-07)

作者简介:胡 琴(1984-),女,高级工程师,硕士,主要从事海洋工程类环境影响评价方面研究。E-mail: huqin2@cnooc.com.cn

(陈 靖 编辑)

① 国家海洋局北海分局. 2015 年北海区海洋环境公报, 2016.

质量改善、生态环境保护提供参考依据。

1 数据来源和评价方法

1.1 样品采集和分析方法

在曹妃甸附近海域分别于 2008-10, 2012-11 和 2015-11 进行了 3 个航次调查共采集了 51 个表层沉积物样品, 其中 3 个航次的表层沉积物调查站位数分别为 11, 20 和 20 个。调查海域覆盖范围为(118°25′~119°10′E, 38°30′~39°00′N); 调查海域水深为 16~34 m。3 个航次采样站位布设如图 1 所示。

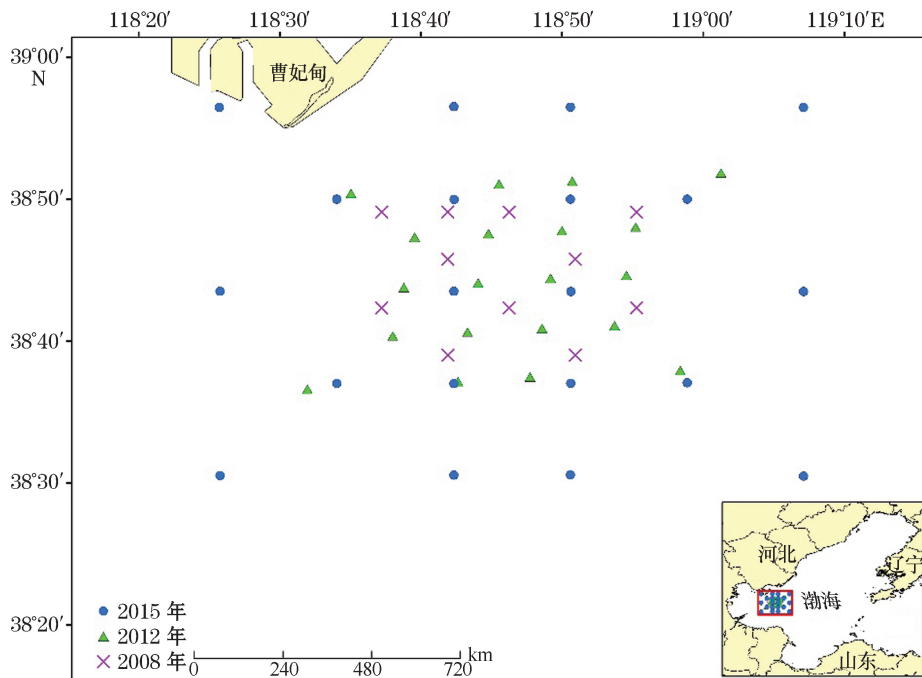


图 1 3 个航次采样站位分布

Fig.1 Distribution of sampling stations for three cruises

本研究 3 个航次的沉积物样品的采集和分析等流程均按照《海洋监测规范》(GB 17378.5—2007)^[17]中所规定的要求执行。调查项目主要有 Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn 和 As 七种重金属元素; 其中 Pb, Cu, Cd 和 Cr 的分析方法为无火焰原子吸收分光光度法; Zn 的分析方法为火焰原子吸收分光光度法; As 和 Hg 的分析方法为原子荧光法。

1.2 评价方法和评价等级

1.2.1 超标率统计法

本研究采用单因子标准指数法对调查海域表层沉积物重金属的质量状况进行超标率统计。计算公式:

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

式中: I_i 为样品中第 i 种重金属的标准指数; C_i 为样品中第 i 种重金属的实测值; S_i 为样品中第 i 种重金属的第一类标准值。根据《海洋沉积物质量》(GB 18668—2002)^[18], 当 $I_i \leq 1$ 时, 表明符合第一类标准; $I_i > 1$ 时, 表明含量超标。海洋沉积物第一类和第二类的质量标准值见表 1。

表 1 海洋沉积物质量标准^[18]
Table 1 Marine sediment quality standard^[18]

评价因子	各类海洋沉积物重金属指标标准值/ $\times 10^{-6}$						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
第一类	≤ 0.20	≤ 35.0	≤ 60.0	≤ 0.50	≤ 80.0	≤ 150.0	≤ 20.0
第二类	≤ 0.50	≤ 100.0	≤ 130.0	≤ 1.50	≤ 150.0	≤ 350.0	≤ 65.0

1.2.2 地累积指数法

地累积指数法(geo-accumulation index)目前被广泛应用于水体沉积物中重金属污染的评价^[1,19-20],该方法能定量反映水体沉积物中重金属污染状况。计算公式:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_i / (kC_n^i)], \tag{2}$$

式中: I_{geo} 为地累积指数; C_i 为样品中第*i*种重金属的实测值; C_n^i 为样品中第*i*种重金属背景参考值,以渤海海域沉积物中重金属环境背景值上限^[21]作为本文的背景参考值,重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 的背景参考值分别取 0.05×10^{-6} , 25.86×10^{-6} , 16.63×10^{-6} , 0.136×10^{-6} , 60×10^{-6} , 75×10^{-6} 和 13×10^{-6} ; k 为用于校正区域背景差异的常数,通常取 1.5。地累积指数 I_{geo} 与重金属污染级别见表 2。

表 2 地累积指数 I_{geo} 与重金属污染级别
Table 2 The geo-accumulation index I_{geo} and the pollution grades of heavy metals

I_{geo}	污染程度	级 别	I_{geo}	污染程度	级 别
$I_{\text{geo}} \leq 0$	清洁	0	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	偏重度	4
$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	轻度	1	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	重度	5
$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	偏中度	2	$I_{\text{geo}} > 5$	极重度	6
$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	中度	3			

1.2.3 潜在生态风险指数法

Häkanson 潜在生态风险指数法由瑞典学者 Häkanson^[22]提出,根据沉积物中重金属的释放能力和生物毒性强度综合分析重金属的生态效应与毒理性质。目前潜在生态风险指数法广泛应用于海洋表层沉积物重金属的风险评价中^[15,23-25]。潜在生态风险指数计算公式:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i = T_r^i \times C^i / C_n^i, \tag{3}$$

式中: E_r^i 为样品中重金属*i*潜在生态风险系数; T_r^i 为样品中重金属*i*的毒性响应系数,用于反映重金属*i*的毒性水平和生物对污染物的敏感程度,重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 的毒性系数分别取 40,5,5,30,2,1 和 10; C_f^i 为样品中重金属*i*的污染系数; C^i 为样品中重金属*i*的实测浓度; C_n^i 为样品中重金属*i*的背景参考值。

$$RI = \sum_{i=1}^7 E_r^i, \tag{4}$$

式中: RI 为样品中重金属污染物的综合潜在风险指数。其中重金属背景值 C_n^i 具有很强的区域性,如果计算潜在生态风险指数时,按照 Häkanson^[22]提出的一般以全球工业化以前沉积物中重金属含量为背景值作为参照会使判断结果出现较大的偏差。因此,本文仍采用渤海海域沉积物中重金属环境背景值上限^[21]。

另外,根据 Häkanson^[22]提出的潜在生态风险指数法,其监测项目包括 8 项:PCB(多氯联苯),Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As。而本文主要对其中的 7 种重金属进行生态风险评价,故需要对 Häkanson^[22]提出的 RI 范围进行调整。单个重金属的 E_r^i 和调整后的 RI 值所对应的污染评价等级划分见表 3。

表 3 E_i^i 和 RI 值对应的生态风险程度

Table 3 The ecological risk degree corresponding to E_i^i and RI

E_i^i 范围	单项生态风险程度	RI 范围	综合潜在生态风险程度
$E_i^i < 40$	低	$RI < 130$	低
$40 \leq E_i^i < 80$	中	$130 \leq RI < 260$	中
$80 \leq E_i^i < 160$	较高	$260 \leq RI < 520$	较高
$160 \leq E_i^i < 320$	高	$RI \geq 520$	高
$E_i^i \geq 320$	很高		

2 结果与讨论

2.1 各航次表层沉积物中重金属含量

对曹妃甸附近海域 3 个航次表层沉积物中重金属含量进行统计(表 4),2008—2015 年研究海域沉积物中重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 的质量分数变化范围分别为 $(0.006 \sim 0.053) \times 10^{-6}$, $(5.4 \sim 36.5) \times 10^{-6}$, $(7.5 \sim 18.3) \times 10^{-6}$, $(0.010 \sim 0.218) \times 10^{-6}$, $(13.2 \sim 52.5) \times 10^{-6}$, $(15.5 \sim 39.7) \times 10^{-6}$ 和 $(3.5 \sim 12.2) \times 10^{-6}$,3 个航次调查重金属多年平均质量分数分别为 0.030×10^{-6} , 17.4×10^{-6} , 12.8×10^{-6} , 0.120×10^{-6} , 30.8×10^{-6} , 24.3×10^{-6} 和 7.8×10^{-6} ,本研究调查海域表层沉积物中重金属含量总体处于较低水平。超标率统计结果表明,与表 1 给出的第一类标准值相比,本研究除 2008 年有 1 个站位的 Cu 超过第一类标准值外,其他调查站位的重金属含量均符合第一类标准;该超标站位的 Cu 含量符合第二类海洋沉积物质量标准值。

表 4 2008—2015 年研究海域表层沉积物重金属质量分数统计

Table 4 Statistics of heavy metal contents in the surface sediments of the study area from 2008 to 2015

年 份	统计值	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2008	最大值/ $\times 10^{-6}$	0.053	36.5	17.3	0.158	47.1	39.7	12.2
	最小值/ $\times 10^{-6}$	0.006	5.4	7.5	0.089	20.9	22.0	8.8
	均值/ $\times 10^{-6}$	0.020	16.8	12.0	0.134	33.7	30.1	10.5
	超标率/%	0	9	0	0	0	0	0
2012	最大值/ $\times 10^{-6}$	0.052	23.2	18.3	0.213	52.5	30.6	5.5
	最小值/ $\times 10^{-6}$	0.019	12.8	9.3	0.010	24.0	15.5	3.5
	均值/ $\times 10^{-6}$	0.040	17.7	13.7	0.100	40.5	21.9	4.6
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0
2015	最大值/ $\times 10^{-6}$	0.046	22.0	17.7	0.218	26.8	30.8	11.7
	最小值/ $\times 10^{-6}$	0.020	11.6	8.7	0.076	13.2	16.3	7.4
	均值/ $\times 10^{-6}$	0.035	17.3	12.4	0.143	19.4	23.5	9.5
	超标率/%	0	0	0	0	0	0	0
多年平均/ $\times 10^{-6}$		0.030	17.4	12.8	0.120	30.8	24.3	7.8

胡琴等^[23]分析了 2006—2015 年春季共计 4 个航次的唐山东部附近海域表层沉积物重金属分布特征,分析结果表明,唐山东部附近海域 4 个航次表层沉积物中重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 的多年平均值分别为 0.056×10^{-6} , 17.3×10^{-6} , 16.2×10^{-6} , 0.134×10^{-6} , 21.6×10^{-6} , 22.2×10^{-6} 和 7.6×10^{-6} 。本文 3 个航次调查结果与之相比,各金属元素含量大致处于同一数量级水平;其中 Cu,Zn 和 As 含量基本相当,Hg,Pb 和 Cd 含量有所降低,而 Cr 含量有所增大。总之,本研究在曹妃甸附近海域对表层沉积物中重金属

含量调查结果与胡琴等^[23]在唐山东部附近海域的调查结果处于同一水平。

2.2 表层沉积物中重金属含量的年际变化特征

2008—2015 年研究海域表层沉积物重金属标准指数年际变化情况见图 2。为了统一标准,本研究以《海洋沉积物质量》^[8]第一类标准值为参考标准对各航次 7 种重金属元素进行单因子标准指数评价。从图 2 可知,7 种重金属含量的年际变化略有不同。其中 Cu、Pb 和 Zn 三种重金属含量相对比较稳定,3 个航次调查结果基本持平;重金属 Cr 的含量表现为逐年降低的趋势;而重金属 Cd 和 As 的含量表现为先降低后增大的趋势,Cd 和 As 均在 2012 年监测值最小,而 2008 年和 2015 年的监测值均基本持平;重金属 Hg 的含量表现为先增大后略降低的趋势。

总之,近 8 a 来研究海域及其沿岸区域的人类活动并未引起该海域表层沉积物中重金属含量显著性增加,这可能归因于该海域表层沉积物中重金属的累积受到物理、化学和生物等多途径的影响,重金属可以沉积在海底表层沉积物上,又可以通过解吸与再悬浮等过程重新进入水体,或者通过生物摄食的方式在高营养级生物体内富集^[26],从短时间尺度上看,该海域表层沉积物中重金属的年际变化不显著。

2.3 表层沉积物重金属污染评价

2.3.1 重金属地累积指数评价

将 2008—2015 年 3 个航次各重金属元素的实测值代入式(2),计算出曹妃甸附近海域表层沉积物的地累积指数 I_{geo} ,并根据表 2 判断出其污染级别,分析结果见表 5。

表 5 2008—2015 年研究海域表层沉积物重金属的 I_{geo} 及其污染级别

Table 5 The I_{geo} and pollution grades of heavy metals in the surface sediments of the study area from 2008 to 2015

年 份	统计值	I_{geo} 及污染级别						
		Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2008	最大值	-0.50,0	-0.09,0	-0.53,0	-0.37,0	-0.93,0	-1.18,0	-2.88,0
	最小值	-3.64,0	-2.84,0	-1.73,0	-1.20,0	-2.11,0	-2.03,0	-3.35,0
	均值	-1.91,0	-1.21,0	-1.06,0	-0.61,0	-1.42,0	-1.58,0	-3.10,0
2012	最大值	-0.53,0	-0.74,0	-0.45,0	0.06,1	-0.78,0	-1.56,0	-4.03,0
	最小值	-1.98,0	-1.60,0	-1.42,0	-4.35,0	-1.91,0	-2.54,0	-4.68,0
	均值	-0.91,0	-1.13,0	-0.86,0	-1.03,0	-1.15,0	-2.04,0	-4.29,0
2015	最大值	-0.71,0	-0.82,0	-0.50,0	0.10,1	-1.75,0	-1.55,0	-2.94,0
	最小值	-1.91,0	-1.74,0	-1.52,0	-1.42,0	-2.77,0	-2.47,0	-3.60,0
	均值	-1.10,0	-1.16,0	-1.01,0	-0.51,0	-2.21,0	-1.94,0	-3.24,0
平均值		-1.15,0	-1.16,0	-0.96,0	-0.72,0	-1.55,0	-1.89,0	-3.53,0

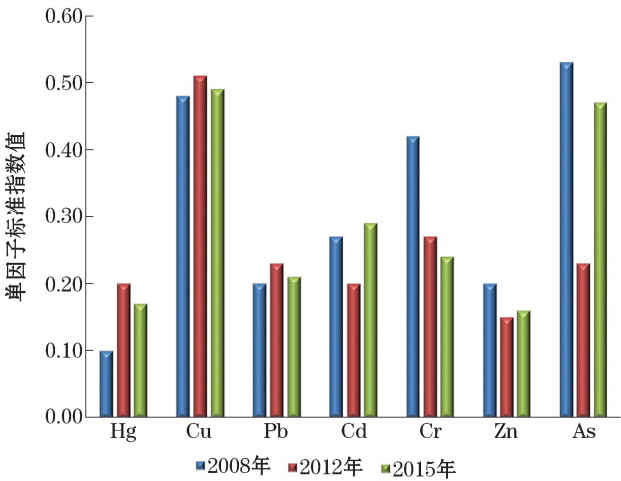


图 2 3 个航次表层沉积物重金属标准指数

Fig.2 The inter-annual variations of the standard indices of heavy metals in the surface sediments collected during the three cruises

由表 5 可知,除重金属 Cd 外,所有航次的 Hg,Cu,Pb,Cr,Zn 和 As 的 I_{geo} 均为负值,属于清洁级别,表明调查海域未受到这 6 种重金属元素的污染。2012 年和 2015 年分别有 1 个站位 Cd 为 $0 < I_{\text{geo}} < 1$,这 2 个站位污染等级属于轻度污染级别。调查海域 3 个航次的各重金属的 I_{geo} 均值均 < 0 ,其年际变化趋势与其标准指数的年际变化趋势一致。

总之,研究海域表层沉积物中 I_{geo} 最大的重金属元素为 Cd,其次是 Pb;各重金属元素的 I_{geo} 多年平均值排序为 $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$;Cd 的 I_{geo} 最大,是曹妃甸附近海域表层沉积物的主要污染因子。

2.3.2 重金属潜在生态风险评价

利用重金属的潜在生态风险指数法对各航次表层沉积物重金属的潜在生态风险进行评价(表 6)。由表 6 可知,2008—2015 年调查海域 3 个航次 7 种重金属的年平均潜在生态风险系数 E_r^i 均小于 40,根据污染评价等级划分(表 3),属于低生态风险水平。2008 年调查海域有 1 个站位的 Hg 的潜在生态风险等级均处于中等水平,其他 6 种重金属的潜在生态风险等级处于低水平;2012 年调查海域有 2 个站位的 Hg 和 3 个站位的 Cd 的潜在生态风险等级均处于中等水平,其他 5 种重金属的潜在生态风险等级处于低水平;2015 年调查海域有 5 个站位的 Cd 的潜在生态风险等级均处于中等水平,其他 6 种重金属的潜在生态风险等级处于低水平。

表 6 2008—2015 年研究海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价结果

Table 6 The Assessment of potential ecological risk of heavy metals in the surface sediments of the study area from 2008 to 2015

年 份	统计值	E_r^i							RI
		Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As	
2008	最大值	42.40	7.06	5.20	34.85	1.57	0.53	9.38	91.33
	最小值	4.94	1.03	2.26	19.61	0.70	0.29	6.75	45.92
	均值	15.62	3.26	3.61	29.58	1.12	0.40	8.05	61.65
2012	最大值	41.92	4.49	5.50	46.99	0.94	0.41	4.21	94.92
	最小值	15.52	2.47	2.78	2.21	0.43	0.21	2.71	34.03
	均值	31.60	3.43	4.13	22.14	0.71	0.29	3.55	65.85
2015	最大值	37.44	4.25	5.32	48.09	0.89	0.41	9.00	94.06
	最小值	16.08	2.24	2.60	16.76	0.44	0.22	5.69	56.36
	均值	27.68	3.34	3.74	31.54	0.65	0.31	7.31	74.52
平均值		26.62	3.36	3.86	27.43	0.77	0.32	6.00	68.34

2008—2015 年研究海域 3 个航次 7 种重金属的多年平均潜在生态风险系数 E_r^i 值顺序为 $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn}$,其中 Cd 的多年平均潜在生态风险系数 E_r^i 最大为 27.43,是曹妃甸附近海域主要的潜在生态风险因子,其次是 Hg 的均值为 26.62。与 7 种重金属多年平均含量大小排序相比,潜在生态风险系数 E_r^i 的排序基本呈逆序排列;分析原因可能是 Cd 和 Hg 等元素的毒性响应系数 T_r^i 比较大,其毒性水平以及生物对其敏感程度较高。

2008—2015 年研究海域综合潜在风险指数 RI 年际变化范围为 34.03~94.92,平均值为 68.34。根据表 3 的综合潜在生态风险程度分级,从整体上来说,调查海域的综合潜在生态风险属于低生态风险水平;其中 Cd 和 Hg 在综合潜在生态风险指数中的平均贡献率达到 80%,说明 Cd 和 Hg 是该调查海域潜在的生态风险因子。从年际变化趋势来看,2008 年和 2012 年调查航次的 RI 均值相当,2015 年调查航次的 RI 均值略大。分析原因主要是 2015 年调查范围较前 2 次大,且有几个调查站位离陆域较近,可能受曹妃甸陆源重金属输入的影响,使得离岸较近的几个站位 RI 值偏大,从而使 2015 年调查航次的 RI 的均值较前 2 次略大。

由重金属地累积指数法和潜在生态风险指数法的评价结果均表明,Cd 是曹妃甸附近海域表层沉积物主

要的污染因子,其潜在生态风险最大。

3 结 论

本研究根据 2008—2015 年 3 个航次对曹妃甸附近海域共 51 个采样站位的表层沉积物调查资料,分析了表层沉积物中 Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn 和 As 七种重金属的含量和年际变化特征,并采用超标率统计法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对其重金属含量进行了评价,得出结论:

1) 2008—2015 年曹妃甸附近海域表层沉积物中 7 种重金属含量总体处于较低水平, 3 个航次共计 51 个调查站位中仅有 1 个站位的 Cu 超标, 其他调查站位的重金属含量均符合第一类标准。

2) 研究海域表层沉积物中各重金属的年际变化略有差异, Cu, Pb 和 Zn 的含量相对比较稳定; Cr 的含量表现为逐年降低的趋势; Cd 和 As 的含量表现为先降低后增大的趋势; 而 Hg 的含量表现为先增大后略降低的趋势。近 8 a 来总体上曹妃甸附近海域表层沉积物中重金属含量的年际变化不显著。

3) 采用地累积指数法评价知, 研究海域 7 种重金属元素的 I_{geo} 多年平均值排序为 $Cd > Pb > Hg > Cu > Cr > Zn > As$, 除个别站位 Cd 受到轻度污染外, 其他 6 种重金属污染程度均为清洁。采用潜在生态风险评价知, 研究海域 7 种重金属的 E_{ri}^d 多年平均值排序为 $Cd > Hg > As > Pb > Cu > Cr > Zn$, 综合潜在风险指数等级为低生态风险水平。结合地累积指数法和潜在生态风险指数法两种评价方法得出的评价结果一致, 结果表明 Cd 是曹妃甸附近海域表层沉积物中主要潜在生态风险因子。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] LI X Y, HE X Y, LUO W C, et al. Distribution and potential ecological risk evaluation of heavy metals in surface sediments of Fangcheng Bay of Guangxi[J]. Marine Environmental Science, 2016, 35(5): 712-717. 李啸宇, 何祥英, 罗万次, 等. 广西防城湾表层沉积物重金属的分布及其潜在生态风险评价[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(5): 712-717.
- [3] ZHOU X B, MEI P W, 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 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.
- [4] YANG M F, ZHENG S H, LIN Y Q, et al. Status and risk assessment of sediment samples on the mud-flat culture areas of Xipi village in Sansha Bay[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2015, 37(3): 202-210. 杨妙峰, 郑盛华, 林永青, 等. 三沙湾溪邛村滩涂养殖区沉积物质量状况及风险评价[J]. 福建水产, 2015, 37(3): 202-210.
- [5] NOBI E P, DILIPAN E, THANGARADJOU T, et al. Geochemical and geo-statistical assessment of heavy metal concentration in the sediments of different coastal ecosystems of Andaman Islands, India[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(2): 253-264.
- [6] 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.
- [7] ZHANG L, QIN Y W, ZHENG B H, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(8): 1676-1684. 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. 环境科学学报, 2011, 31(8): 1676-1684.
- [8] 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.
- [9] WANG L P, LEI K, QIAO Y Z, et al. Distribution and ecological risk assessment of four common metals in coastal sediment of Bohai bay along Tianjin city, China[J]. Marine Environmental Science, 2017, 36(5): 693-698. 王丽平, 雷坤, 乔艳珍. 天津渤海湾近岸海域沉积物中 4 种常见重金属的分布及其风险分析[J]. 海洋环境科学, 2017, 36(5): 693-698.

- [10] LIU M, ZHANG A B, FAN D J, et al. Environmental quality of heavy metals in surface sediments in the central region of the Bohai Sea [J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(2): 279-290. 刘明, 张爱滨, 范德江, 等. 渤海中部底质沉积物重金属环境质量[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(2): 279-290.
- [11] ZHENG Y M, GAO M S, LIU S, et al. Distribution patterns and ecological assessment on heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2015, 34(3): 354-360. 郑懿珉, 高茂生, 刘森, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. *海洋环境科学*, 2015, 34(3): 354-360.
- [12] HU N J, SHI X F, LIU J H, et al. Distributions and impacts of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2011, 29(1): 63-72. 胡宁静, 石学法, 刘季花, 等. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 63-72.
- [13] SUN Q B, CHEN Y Z, SUN L Y, et al. Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the western waters of Liaodong Bay[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2015, 34(1): 73-79. 孙钦帮, 陈燕珍, 孙丽艳, 等. 辽东湾西部海域表层沉积物重金属的含量分布与污染评价[J]. *应用海洋学报*, 2015, 34(1): 73-79.
- [14] ZHANG X R, ZHANG Y, YE Q, et al. Environment quality of Liaodong Bay and pollution evolution of heavy metals[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(2): 21-29. 张现荣, 张勇, 叶青, 等. 辽东湾北部海域沉积物重金属环境质量和污染演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 21-29.
- [15] 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.
- [16] LIU X B, LI M S, LIANG M Y, et al. Grain size features and sedimentary environment of surficial sediments in the Caofeidian offshore area[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2016, 35(3): 507-514. 刘宪斌, 李孟沙, 梁梦宇, 等. 曹妃甸近岸海域表层沉积物粒度特征及其沉积环境[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2016, 35(3): 507-514.
- [17] National Ocean Standardization Technical Committee. The specification for marine monitoring; Part 5 Sediment analysis; GB 17378.5—2007[S]. Beijing: China Standard Press, 2007. 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, 2007.
- [18] National Ocean Standardization Technical Committee. Marine sediment quality; GB 18668—2002[S]. Beijing: China Standard Press, 2002. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋沉积物质量: GB 18668—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [19] CHEN L, LI T J, YANG W F, et al. Distribution and sources of heavy metals in surface sediments, northern South China Sea[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(3): 464-470. 陈亮, 李团结, 杨文丰, 等. 南海北部近海沉积物重金属分布及来源[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 464-470.
- [20] JIANG H Y, LIU X B, ZHANG Q F, et al. Distribution and risk analysis of heavy metals and as in the surface sediment of Tianjin offshore area[J]. *Marine Sciences*, 2013, 37(9): 82-89. 江洪友, 刘宪斌, 张秋丰, 等. 天津近岸海域沉积物重金属及砷分布与生态风险分析[J]. *海洋科学*, 2013, 37(9): 82-89.
- [21] LIU X B, JIANG Z P, ZHANG G Y, et al. Potential ecological risk evaluation of heavy metals in the inter tidal zone sediments of Tanggu, Tianjin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 731-735. 刘宪斌, 姜中鹏, 张光玉, 等. 天津塘沽潮间带沉积物中重金属的潜在生态危害评价[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 731-735.
- [22] HÄKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975-1001.
- [23] HU Q, GUO J, YIN X N, et al. The inter-annual variations of the concentration and the pollution assessment of heavy metals in the surface sediments in the adjacent sea water of Tangshan in spring[J]. *Progress in fishery sciences*, 2017, 38(3): 1-9. 胡琴, 郭静, 尹晓娜, 等. 唐山附近海域春季表层沉积物重金属含量年际变化及污染评价[J]. *渔业科学进展*, 2017, 38(3): 1-9.
- [24] 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): 3906-3916. 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): 3906-3916.
- [25] CHEN Y, XU Z Z, HU Y Y, et al. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments along coast of Qinhuangdao[J]. *Marine Environmental Science*, 2014, 33(1): 66-70. 陈燕, 许自舟, 胡莹莹, 等. 秦皇岛海域表层沉积物重金属含量分布特征及生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2014, 33(1): 66-70.
- [26] WU B, SONG J M, LI X G. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe Estuary[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(4): 1324-1332. 吴斌, 宋金明, 李学刚. 黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征[J]. *环境科学*, 2013, 34(4): 1324-1332.

The Inter-annual Variations and Pollution Assessment of Heavy Metal Contents in the Surface Sediments of the Sea Area Near Caofeidian

HU Qin, LI Qiang, ZHANG Min-xia, REN Xu-he

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

Abstract: Based on the investigations of surface sediments at 51 sampling stations of three cruises carried out in the sea area near Caofeidian from 2008 to 2015, the contents and inter-annual variations of seven heavy metals such as Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn and As in the surface sediments are analyzed, and the contents of the heavy metals are evaluated by means of over-standard rate statistics, geo-accumulation index and potential ecological risk index. The results show that the heavy metal contents in the surface sediments of the study area are generally at a low level. At all but one sampling station of the three cruises the content of Cu is over standard, and at other stations the contents of the heavy metals are all in accord with the first category of criteria. The inter-annual variations of the heavy metal contents in the surface sediments of the study area are slightly different, of which the contents of Cu, Pb and Zn are relatively stable; the content of Cr tends to decrease year by year; the contents of Cd and As tend to decrease first and then increase; and the content of Hg tends to increase first and then decrease slightly. In the last 8 years, the inter-annual variations of the heavy metal contents in the surface sediments of the study area are generally not significant. The evaluation by means of geo-accumulation index shows that the multi-year averages of geo-accumulation indexes I_{geo} of the 7 heavy metals are in the order of $\text{Cd} > \text{Pb} > \text{Hg} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn} > \text{As}$. Except for the slight pollution of Cd at some individual stations, the pollution levels of the other six heavy metals are all clean. The assessment by means of potential ecological risk index shows that the multi-year averages of potential ecological risk index of the 7 heavy metals in the study area are in the order of $\text{Cd} > \text{Hg} > \text{As} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cr} > \text{Zn}$ and the comprehensive potential risk index grade belongs to a low ecological risk level. All these results indicate that Cd is the main potential ecological risk factor in the surface sediments of the sea area near Caofeidian.

Key words: Caofeidian; surface sediments; heavy metals; inter-annual variations; pollution assessment

Received: July 16, 2018