

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*

胡 琴¹ 郭 静¹ 尹晓娜¹ 曲 亮² 曹 静¹

(1. 中海油研究总院 北京 100028; 2. 国家海洋局北海环境监测中心 青岛 266033)

摘要 根据 2006–2015 年 4 个航次对唐山附近海域共 70 个采样站位的表层沉积物调查资料, 分析了沉积物中 Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 和 As 7 种重金属的含量和年际变化特征, 并利用超标率统计法、地累积指数法和潜在生态风险指数法对其污染状况进行了评价。结果显示, 调查海域表层沉积物中重金属含量总体水平较低, 除个别站位的 Cu 和 As 超过第 I 类标准值外, 其他调查站位的重金属含量均符合第 I 类标准。2006–2015 年调查海域表层沉积物中 7 种重金属含量的年际变化略有不同, 其中, Cu、Pb、Cd 和 Zn 4 种重金属含量相对比较稳定, Hg 和 Cr 的含量表现为先升高后降低的趋势, 而 As 的变化趋势不明显。地累积指数法评价结果显示, 7 种重金属的地累积指数 (I_{geo}) 多年平均值为 Hg>Cd>Pb>Cu>As>Cr>Zn; 而潜在生态风险评价结果显示, 7 种重金属的潜在生态风险系数 (E_r^i) 多年平均值为 Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn; 两种污染评价结果一致, 均显示 Hg 是唐山附近海域表层沉积物的主要污染因子, 潜在生态风险最大。综合潜在风险指数 (RI) 年际变化范围为 44.26–153.18, 平均值为 89.92, 属于低生态风险水平; RI 年际变化基本表现为先升高后降低的趋势, 表明近年来调查海域表层沉积物重金属的污染状况有所改善。

关键词 唐山; 表层沉积物; 重金属; 年际变化; 污染评价

中图分类号 S931.3 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2017)03-0022-09

唐山附近海域地处滦河口的南部、海河入海口的北部, 受地表径流影响较大。随着近年来工农业的飞速发展, 重金属排放不断增加, 各种重金属污染物最终汇入海洋。唐山附近海域是河北省重要的海水养殖场所, 重金属易被鱼、虾、蟹和贝等海洋生物吸收, 进入到食物链中, 从而对人体健康造成危害(史国媛, 2012)¹⁾。

重金属由于其特殊的化学特性和毒性效应, 成为海洋环境中具有潜在危害的重要污染物。而海洋

沉积物作为重金属的源和汇, 其重金属的含量是水动力条件变化、沉积物的吸附作用和析出作用等共同影响的结果, 表现为比水体含量高、较稳定, 且有明显的时空分布规律(薛彬等, 2015)。近年来, 针对海域表层沉积物中重金属的分布及污染状况等已开展了大量的工作。郑懿珉等(2015)研究表明, 莱州湾表层沉积物重金属高值区在莱州湾西部海域, 受莱州湾西部的陆源性输入和湾内潮流运动规律等影响。林曼曼等(2013)对环渤海海域的研究结果显示,

* 中海石油(中国)有限公司科技项目(YXKY-2016-ZY-07)资助[This work was supported by the project of study on the marine environmental impact of offshore oil and gas field development (YXKY-2016-ZY-07)]

① 通讯作者: 胡 琴, 工程师, E-mail: huqin7321@163.com

收稿日期: 2016-03-22, 收修改稿日期: 2016-04-14

1) Shi GY. Distribution of heavy metals and migration characteristics in surface sediments of Tangshan. Master's Thesis of Hebei United University, 2012, 1–2 [史国媛. 唐山近海表层沉积物重金属分布特征及迁移规律. 河北联合大学硕士研究生学位论文, 2012, 1–2]

秦皇岛-唐山近岸海域是污染最轻的区域, 重污染地区主要分布在辽东湾葫芦岛近岸海域, 主要因素是物源和沉积物粒度等。吴斌等(2013)研究表明, 黄河口表层沉积物中重金属含量均处于较低水平, 重金属含量与细颗粒物、总有机碳之间无显著相关关系, 表明其受汛期黄河上游复杂来源的影响, 而粒度和总有机碳皆非主控因素。

目前, 不少学者对渤海海域的渤海湾(周笑白等, 2015; 王小静等, 2015; 何荣等, 2015)、渤海中部(刘明等, 2012)、莱州湾(郑懿珉等, 2015; 胡宁静等, 2011)以及辽东湾(孙钦帮等, 2015; 张现荣等, 2012)等沉积物中重金属的污染进行了研究, 但对唐山附近海域沉积物重金属的污染状况报道较少, 对其年际变化趋势的分析研究则更少。本研究根据 2006–2015 年共计 4 个航次的调查数据, 对唐山附近海域表层沉积物中重金属含量进行了年际变化分析, 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进行了污染综合评价, 为该海域生态环境的健康发展和可持续利用提供依据。

1 材料与方法

1.1 调查站位与时间

本研究分别于 2006 年 5 月、2011 年 5 月、2012 年

6 月和 2015 年 6 月对唐山附近海域进行了 4 个航次采集了共计 70 个表层沉积物样品; 其中 4 个航次的表层沉积物调查站位数分别为 10、21、21 和 18 个。调查海域覆盖范围在 35°30′–39°30′N、119°00′–119°50′E 之间; 调查海域水深为 12–31 m。4 个航次调查站位分布见图 1。

1.2 调查项目与分析方法

对采集的表层沉积物样品中总汞(Hg)、铜(Cu)、铅(Pb)、镉(Cd)、铬(Cr)、锌(Zn)和砷(As) 7 种重金属元素的含量进行分析。沉积物样品的采集、贮存、运输、预处理和分析方法等均严格按照《海洋监测规范》(GB17378-2007)中所规定的要求执行。Pb、Cu、Cd 和 Cr 用无火焰原子吸收分光光度法测定; Zn 用火焰原子吸收分光光度法测定; As 和 Hg 用原子荧光法测定。

1.3 评价方法

国内外目前有关沉积物中重金属评价的方法有很多, 主要有综合指数法、修正综合指数法、地累积指数法、污染指数法、单因子标准指数法、沉积物富集系数法和潜在生态风险指数法等(刘宏伟等, 2015)。其中, 应用最广的为 Hakanson (1980)提出的重金属潜在生态风险指数评价法(柴小平等, 2015; 陈燕等,

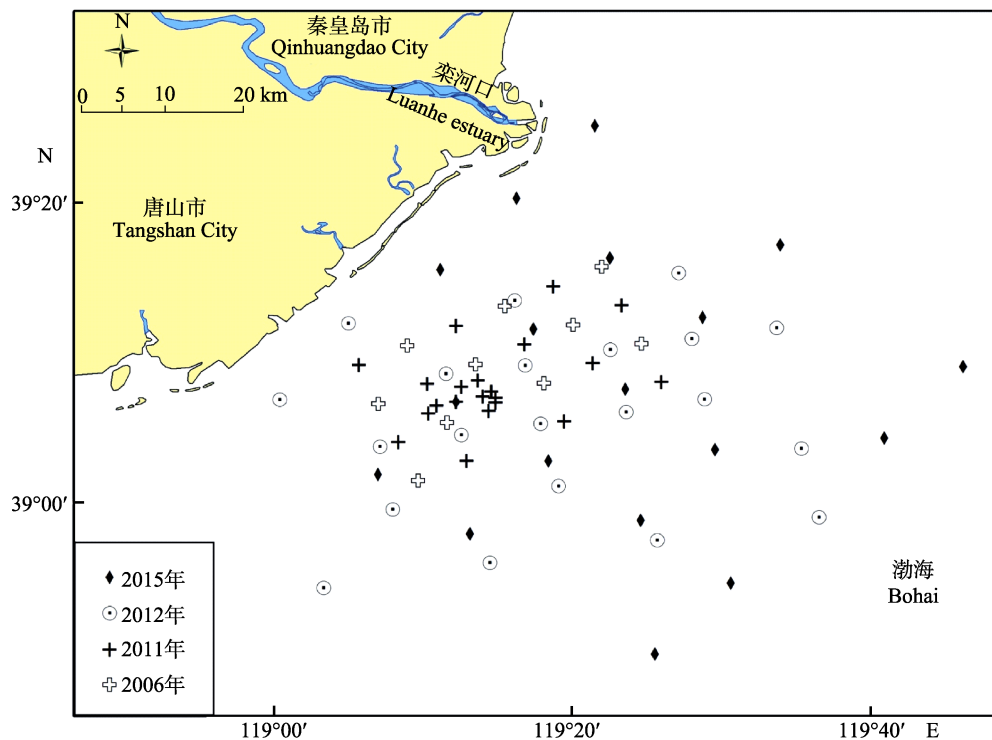


图 1 4 个航次调查站位分布

Fig.1 Distribution of survey stations in four cruises

2014; 刘宏伟等, 2015)。基于现有评价方法, 本研究采用单因子超标率统计法、地累积指数法和潜在生态风险指数法, 对调查海域表层沉积物重金属的污染状况进行评价。

1.3.1 超标率统计法 根据《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中第 I 类标准值, 对调查海域表层沉积物重金属的含量状况进行超标率统计, 其计算公式为:

$$I_i = C_i / S_i$$

式中, I_i 为第 i 种重金属的标准指数; C_i 为第 i 种重金属的实测值; S_i 为第 i 种重金属的第 I 类标准值。当 $I_i \leq 1$ 时, 符合第 I 类标准; $I_i > 1$ 时, 含量超标。其中, 海洋沉积物质量第 I 类标准值为: $Hg \leq 0.20 \times 10^{-6}$ 、 $Cu \leq 35.0 \times 10^{-6}$ 、 $Pb \leq 60.0 \times 10^{-6}$ 、 $Cd \leq 0.50 \times 10^{-6}$ 、 $Zn \leq 150.0 \times 10^{-6}$ 、 $Cr \leq 80.0 \times 10^{-6}$ 、 $As \leq 20.0 \times 10^{-6}$ 。

1.3.2 地累积指数法 地累积指数法是由德国学

者 Muller 教授提出的, 综合考虑了自然地质过程造成的背景值的影响及人为活动对重金属污染的影响, 是一种研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标。目前被广泛应用于现代沉积物中重金属污染的评价(孙钦帮等, 2015; 江洪友等, 2013)。其计算公式如下:

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

式中, I_{geo} 为地累积指数; C_i 为第 i 种重金属的实测值; C_n^i 为第 i 种重金属背景参考值; k 为考虑到造山运动可能引起背景值波动而设定的常数, 通常取 1.5。 I_{geo} 用于沉积物中重金属污染程度评价分为 7 个等级(表 1)。重金属背景值的选定对评价结果影响较大, 而结合区域研究现状能更好地反映重金属地球化学背景值(罗先香等, 2010), 因此, 本研究采用刘宪斌等(2008)研究的渤海沉积物的重金属环境背景值上限作为本研究海域的背景值进行污染评价, 7 种重金属元素的环境背景值见表 2。

表 1 重金属的地累积指数及其污染级别

Tab.1 Index of geo-accumulation (I_{geo}) of the heavy metals and the pollution degree

污染程度 Pollution degree	清洁 Clean	轻度污染 Slight pollution	偏中度污染 Lower moderate pollution	中度污染 Moderate pollution	偏重污染 Lower heavy pollution	重污染 Heavy pollution	严重污染 Serious pollution
地累积指数 I_{geo}	≤ 0	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	>5
级别 Grade	0	1	2	3	4	5	6

表 2 沉积物中重金属的毒性系数和背景参考值

(刘宪斌等, 2008)

Tab.2 Toxicity coefficients and reference values of heavy metals in the sediments (Liu *et al.*, 2008)

项目 Items	重金属元素 Heavy metal elements						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
T_r^i	40	5	5	30	2	1	10
$C_n^i (\times 10^{-6})$	0.05	25.86	16.63	0.136	60	75	13

1.3.3 潜在生态风险指数法 潜在生态风险指数法是一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法。该方法通过分析沉积物中不同重金属污染物的释放能力和生物毒性强度, 将沉积物中污染物的含量折算为生物毒性风险。当多种重金属共存时, 采取加和的方式来衡量重金属的生物毒性。潜在生态风险指数计算公式如下:

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i = T_r^i \times C^i / C_n^i$$

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

式中, E_r^i 为重金属 i 潜在生态风险系数; T_r^i 为

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; C_f^i 为重金属 i 的污染系数; C^i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的背景参考值; RI 为重金属污染物的综合潜在风险指数。在计算 Hakanson 潜在生态风险指数时, 一般以全球工业化以前沉积物中重金属含量为背景值, 但受地质条件、水文状况、生物活动等多种因素的影响, 重金属背景值往往具有很强的区域性, 如在评价时仍以前者作为参照往往会使判断结果出现较大的偏差, 因此, 本研究参考渤海海域沉积物中重金属环境背景值上限(刘宪斌等, 2008)作为本研究海域的背景参考值(表 1)。Hakanson (1980)提出的潜在生态风险指数法包括多氯联苯(PCB)、Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 和 As 共 8 种监测项目。由于本研究未考虑 PCB, 主要针对 7 种重金属进行分析评价, 因此, 需要对综合潜在风险指数值范围进行调整(马德毅等, 2003; 刘成等, 2002)。单个重金属潜在生态风险系数 (E_r^i) 和调整后的综合潜在风险指数值所对应的污染评价等级划分见表 3。

表 3 潜在生态风险指数法的污染评价等级划分
Tab.3 Classification and evaluation of heavy metal pollution based on the potential ecological risk index

E_r^i 范围 Ranges of E_r^i	单个重金属污染物生态风险程度分级 Degree classification of ecological risk for single heavy metal	综合潜在风险指数范围 Ranges of RI	综合潜在生态风险程度分级 Degree classification of the comprehensive potential ecological risk
$E_r^i < 40$	低 Low	RI < 130	低 Low
$40 \leq E_r^i < 80$	中 Moderate	$130 \leq \text{RI} < 260$	中 Moderate
$80 \leq E_r^i < 160$	较高 Considerable	$260 \leq \text{RI} < 520$	较高 Considerable
$160 \leq E_r^i < 320$	高 High	RI ≥ 520	高 High
$E_r^i \geq 320$	很高 Very high		

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属含量分析

2006–2015 年唐山附近海域表层沉积物中重金属含量的调查统计结果见表 4。由表 4 可知, 4 个航次调查海域沉积物中重金属 Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 和 As 的含量变化范围分别为 $(0.016\text{--}0.136) \times 10^{-6}$ 、 $(3.1\text{--}41.9) \times 10^{-6}$ 、 $(3.3\text{--}28.8) \times 10^{-6}$ 、 $(0.062\text{--}0.343) \times 10^{-6}$ 、 $(3.5\text{--}33.7) \times 10^{-6}$ 、 $(3.1\text{--}34.0) \times 10^{-6}$ 和 $(2.0\text{--}21.5) \times 10^{-6}$, 4 次调查重金属多年平均含量分别为 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} , 调查海域表层沉积物中重金属含量总体水平较低。超标率统计结果显示, 与《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)中第一类标准值相比, 除 2006 年和 2012 年分别有 1 个站位的 Cu、2011 年有

1 个站位的 As 超过第一类标准值外, 其他调查站点的重金属含量均符合第一类标准; 超标站位的 Cu 和 As 含量均符合第二类标准。

林曼曼等(2013)调查了环渤海海域沉积物重金属分布特征, 分析结果显示, 秦皇岛–唐山近岸海域沉积物中的重金属 Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 和 As 的平均值分别为 0.018×10^{-6} 、 14.83×10^{-6} 、 18.93×10^{-6} 、 0.092×10^{-6} 、 45.02×10^{-6} 、 45.25×10^{-6} 和 6.87×10^{-6} 。本研究 4 个航次调查结果与之相比, 各金属元素含量基本处于同一数量级水平; 其中, Hg、Cu、Cd 和 As 含量略大, Pb 含量略小, 而 Cr 和 Zn 含量降低明显。

从重金属含量平面分布角度分析, 不同重金属同一个航次的平面分布有较大差异, 而同一种重金属不同航次调查的平面分布也略有差异。本研究以重金属 Hg 和 Cd 为例进行描述。2006 年和 2011 年调查海域

表 4 2006–2015 年调查海域表层沉积物重金属含量的统计特征

Tab.4 Statistical characteristics of heavy metal contents in surface sediments of the survey area from 2006 to 2015

年份 Year	统计值 Statistic	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2006	最小值 Minimum ($\times 10^{-6}$)	0.018	7.0	10.2	0.093	8.1	10.8	5.3
	最大值 Maximum ($\times 10^{-6}$)	0.075	36.5	28.8	0.343	20.4	26.0	8.6
	均值 Average ($\times 10^{-6}$)	0.051	15.4	17.6	0.158	12.0	16.4	7.0
	超标率 Over-standard rate (%)	0	10	0	0	0	0	0
2011	最小值 Minimum ($\times 10^{-6}$)	0.017	3.1	3.3	0.062	3.5	3.1	9.0
	最大值 Maximum ($\times 10^{-6}$)	0.136	20.6	23.4	0.234	27.3	34.0	21.5
	均值 Average ($\times 10^{-6}$)	0.062	14.7	15.6	0.137	20.3	22.7	11.9
	超标率 Over-standard rate (%)	0	0	0	0	0	0	5
2012	最小值 Minimum ($\times 10^{-6}$)	0.053	11.1	11.1	0.082	20.2	16.5	2.0
	最大值 Maximum ($\times 10^{-6}$)	0.116	41.9	24.6	0.147	33.7	30.0	5.8
	均值 Average ($\times 10^{-6}$)	0.083	20.3	18.2	0.118	27.4	23.1	3.3
	超标率 Over-standard rate (%)	0	5	0	0	0	0	0
2015	最小值 Minimum ($\times 10^{-6}$)	0.016	12.7	9.2	0.062	14.3	16.8	6.3
	最大值 Maximum ($\times 10^{-6}$)	0.027	23.7	17.8	0.227	28.3	30.2	9.9
	均值 Average ($\times 10^{-6}$)	0.022	17.8	13.7	0.136	21.5	24.0	8.0
	超标率 Over-standard rate (%)	0	0	0	0	0	0	0
多年平均 Multi-year average		0.056	17.3	16.2	0.134	21.6	22.2	7.6

重金属 Hg 的平面分布特征表现为由北向南逐渐降低；2012 年调查海域 Hg 的平面分布呈西低东高；2015 年调查海域 Hg 的平面分布呈中部高、四周低的趋势。而重金属 Cd 的平面分布表现为：2006 年为四周高中部低；2011 年和 2012 年为四周低中部高；2015 年呈北部向南部逐步升高的趋势。从重金属 Hg 和 Cd 的平面分布可以看出，Hg 和 Cd 在近岸处的含量并没有明显高于其他海域，因此，推测陆源排污不是 Hg 和 Cd 的主要来源。重金属 Hg 和 Cd 的含量分布受人类活动影响较小，其含量分布可能主要受地质构造活动、岩石风化、侵蚀及水动力作用等自然过程的影响(陈燕等, 2014)。

2.2 表层沉积物中重金属含量的年际变化特征

为统一尺度对比 2006–2015 年唐山海域表层沉积物各重金属元素含量的年际变化特征，以《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)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，其年际变化情况见图 2。从图 2 可以看出，7 种重金属含量的年际变化略有不同。其中，Cu、Pb、Cd 和 Zn 4 种重金属含量相对比较稳定，4 个航次调查结果基本持平；而重金属 Hg 和 Cr 的含量表现为先升高后降低的趋势，特别是 2015 年 Hg 的含量明显低于前 3 个航次；重金属 As 在 2011 年监测值最大，2012 年监测值最小，而 2006 年和 2015 年的监测值基本持平。

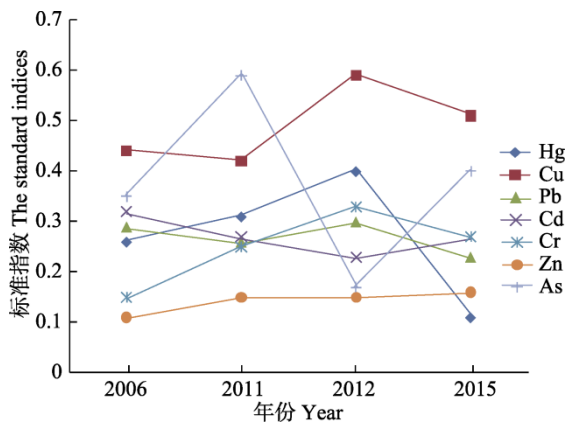


图 2 调查海域表层沉积物中重金属标准指数的年际变化
Fig.2 The inter-annual variations of the standard indices of heavy metals in surface sediments of the survey area

总体来说，近 10 年来调查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明显增加，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(吴斌等, 2013)，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(I_{geo})评价

将 2006–2015 年 4 个航次各重金属元素的实测值代入地累积指数计算公式，得出唐山附近海域表层沉积物的 I_{geo} (表 5)。由表 5 可见，唐山附近海域表层沉积物中重金属的 I_{geo} 年际变化趋势与其标准指数的年际变化趋势一致。所有航次的 Cr 和 Zn 的 I_{geo} 均为负值，属于清洁级别，表明调查海域未受到这 2 种重金属元素的污染。 $0 < I_{geo} < 1$ 的重金属有：2006 年 1 个站位的 Pb 和 2 个站位的 Cd、2011 年 6 个站位的 Hg、1 个站位的 Cd 和 1 个站位的 As、2012 年 11 个站位的 Hg 和 1 个站位的 Cu、2015 年 2 个站位的 Cd，这些站位污染属于轻度污染级别；其他调查站位的 I_{geo} 均为负值，属于清洁级别。除 2012 年 Hg 的 I_{geo} 均值大于 0 外，其他各航次的 7 种重金属的 I_{geo} 均值均小于 0。总体而言，调查海域各重金属元素的 I_{geo} 多年平均值为 $Hg > Cd > Pb > Cu > As > Cr > Zn$ ，Hg 的 I_{geo} 最大，是唐山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

2006–2015 年调查海域 4 个航次表层沉积物重金属的潜在生态风险系数(E_r^i)和综合潜在生态风险指数(RI)两项指标见表 6。4 次调查 7 种重金属的多年平均 E_r^i 大小为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$ ；其中，Hg 的 E_r^i 为 44.87 (>40)，属中等生态风险水平，是唐山附近海域主要的生态风险因子；其他 6 种重金属的 E_r^i 均小于 40，属于低生态风险水平。

2006 年调查海域 60% 站位中 Hg 以及 20% 站位中 Cd 的潜在生态风险均处于中等水平，其他 5 种重金属的潜在生态风险处于低水平；2011 年调查海域 62% 站位中 Hg 以及 10% 站位中 Cd 的潜在生态风险均处于中等水平，其他 5 种重金属的潜在生态风险处于低水平；2012 年调查海域 100% 站位中 Hg 的 E_r^i 均大于 40，处于中等生态风险水平，其他 6 种重金属的潜在生态风险处于低水平；2015 年调查海域 17% 站位中 Cd 的 E_r^i 处于中等生态风险水平，其他 6 种重金属的潜在生态风险处于低水平。

表 5 2006–2015 年调查海域表层沉积物重金属的地累积指数

Tab.5 I_{geo} of heavy metals in surface sediments of the survey area from 2006 to 2015

年份 Year	统计值 Statistic	地累积指数 I_{geo}						
		Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2006	最小值 Minimum	-2.06	-2.46	-1.29	-1.13	-3.47	-3.38	-1.88
	最大值 Maximum	0	-0.09	0.21	0.75	-2.14	-2.11	-1.18
	均值 Average	-0.56	-1.33	-0.50	-0.37	-2.91	-2.78	-1.48
2011	最小值 Minimum	-2.15	-3.65	-2.92	-1.72	-4.68	-5.18	-1.12
	最大值 Maximum	0.86	-0.91	-0.09	0.20	-1.72	-1.73	0.14
	均值 Average	-0.27	-1.40	-0.68	-0.57	-2.15	-2.31	-0.71
2012	最小值 Minimum	-0.50	-1.81	-1.17	-1.31	-2.16	-2.77	-3.29
	最大值 Maximum	0.63	0.11	-0.02	-0.47	-1.42	-1.91	-1.75
	均值 Average	0.15	-0.93	-0.45	-0.79	-1.72	-2.28	-2.56
2015	最小值 Minimum	-2.23	-1.61	-1.44	-1.72	-2.65	-2.74	-1.63
	最大值 Maximum	-1.47	-0.71	-0.49	0.15	-1.67	-1.90	-0.98
	均值 Average	-1.77	-1.12	-0.86	-0.58	-2.07	-2.23	-1.29
多年平均 Multi-year average		-0.41	-1.17	-0.62	-0.61	-2.06	-2.34	-1.36

表 6 2006–2015 年调查海域表层沉积物重金属的潜在生态风险系数和综合潜在风险指数

Tab.6 The potential ecological risk factor (E_r^i) and comprehensive potential ecological risk index (RI) of heavy metals in surface sediments of the survey area from 2006 to 2015

年份 Year	统计值 Statistic	潜在生态风险系数 E_r^i							综合潜在风险指数 RI
		Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As	
2006	最小值 Minimum	14.32	1.36	3.07	20.45	0.27	0.14	4.09	52.06
	最大值 Maximum	59.76	7.06	8.66	75.66	0.68	0.35	6.63	123.29
	均值 Average	41.01	2.99	5.28	34.75	0.40	0.22	5.39	90.04
2011	最小值 Minimum	13.52	0.60	1.00	13.63	0.12	0.04	6.92	48.10
	最大值 Maximum	108.80	3.98	7.04	51.62	0.91	0.45	16.54	153.18
	均值 Average	49.71	2.85	4.69	30.31	0.68	0.30	9.14	97.67
2012	最小值 Minimum	42.08	2.15	3.34	17.98	0.67	0.22	1.55	81.66
	最大值 Maximum	92.80	8.10	7.40	32.43	1.12	0.40	4.44	136.00
	均值 Average	65.00	3.97	5.58	26.30	0.93	0.31	2.59	104.68
2015	最小值 Minimum	12.96	2.46	2.77	13.59	0.48	0.22	4.85	44.26
	最大值 Maximum	21.76	4.58	5.35	50.07	0.94	0.40	7.62	80.39
	均值 Average	17.99	3.44	4.11	29.97	0.72	0.32	6.19	62.74
多年平均 Multi-year average		44.87	3.31	4.90	30.03	0.69	0.29	5.83	89.92

2006–2015 年调查海域综合潜在风险指数(RI)年际变化范围为 44.26–153.18, 平均值为 89.92。根据表 3 的综合潜在生态风险程度分级, 从整体来说, 调查海域的综合潜在生态风险属于低生态风险水平; 其中, Hg 在 RI 中的平均贡献率达到 50%。2011 年和 2012 年调查结果显示, 有少数调查站位的 RI 大于 130, 小于 260, 属于中等生态风险水平。从年际变化趋势来看, 2012 年 RI 最高, 为 104.18; 2015 年 RI 最低, 为 62.74; RI 年际变化基本表现为先升高后降低, 表明近年来调查海域表层沉积物重金属的污染

状况有所改善。从空间分布上看, RI 处于中等生态风险水平的站位主要分布在调查海域的西南部近岸海域; 根据《河北省海洋功能区划(2011-2020)》, 该处海域主要海洋功能区类型为港口航运区和农渔业区, 这可能与近岸的港口航运区的污水排放以及船舶的燃油污染等有关, 排海污染物中大量重金属通过吸附、沉降等物理、化学过程, 最终沉积于海底, 从而影响该处海域表层沉积物中重金属的潜在生态风险。

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显示, Hg 是唐山附近海域表层沉积物主

要的污染因子,潜在生态风险最大;而 Cd 在重金属污染排序中排在第 2 位,调查海域主要受到 Hg、Cd 这两种重金属的影响。两种评价结果对 7 种重金属的污染排序略有不同,这主要是因为地累积指数法仅仅评价重金属富集的程度,而潜在生态风险指数法还综合考虑了重金属生物毒性的差异,不同重金属元素在生态风险评价中具有不同的贡献值(张晓举等, 2014)。

3 结论

2006–2015 年对唐山附近海域表层沉积物中重金属进行的 4 个航次调查结果显示,重金属 Hg、Cu、Pb、Cd、Cr、Zn 和 As 的多年平均含量分别为 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} ,调查海域表层沉积物中重金属含量总体水平较低。除个别站位的 Cu 和 As 超过第 I 类标准值外,其他调查站位的重金属含量均符合第 I 类标准;超标站位的 Cu 和 As 含量均符合第 II 类标准。

2006–2015 年调查海域表层沉积物中 7 种重金属含量的年际变化略有不同。其中, Cu、Pb、Cd 和 Zn 4 种重金属含量相对比较稳定,而 Hg 和 Cr 的含量表现为先增大后降低, As 的变化趋势不明显。总体来说,近 10 年来调查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明显增加。

地累积指数法评价结果显示,2006–2015 年调查海域 7 种重金属元素的 I_{geo} 多年平均值排序为 $Hg > Cd > Pb > Cu > As > Cr > Zn$,其中, Cr 和 Zn 均属于清洁级别,其他指标少数站位受到轻度污染。潜在生态风险评价结果显示,7 种重金属的潜在生态风险系数 E_r^i 多年平均值排序为 $Hg > Cd > As > Pb > Cu > Cr > Zn$ 。综合潜在风险指数 RI 年际变化范围为 44.26–153.18,平均值为 89.92,属于低生态风险水平;RI 年际变化基本表现为先升高后降低的趋势,表明近年来调查海域表层沉积物重金属的污染有所改善。采用地累积指数法和潜在生态风险指数法得出的评价结果具有一致性,污染评价结果显示, Hg 是唐山附近海域表层沉积物主要的污染因子,潜在生态风险最大。

参 考 文 献

Chai XP, Hu BL, Wei N, *et al.* Distribution, sources and assessment of heavy metals in surface sediments of the Hangzhou Bay and its adjacent areas. *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. *环境科学学报*, 2015, 35(12): 3906–3916]

Chen Y, Xu ZZ, Hu YY, *et al.* Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments along coast of Qinhuangdao. *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. *海洋环境科学*, 2014, 33(1): 66–70]

Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001

He R, Liu Y. Investigation and assessment of heavy metal pollution in the nearshore aquaculture area of northern Tianjin City. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2015(4): 149–154 [何荣, 刘洋. 天津北部近岸增殖区重金属污染的调查与评价. *海洋湖沼通报*, 2015(4): 149–154]

Hu NJ, Shi XF, Liu JH, *et al.* Distributions and impacts of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay. *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. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 63–72]

Jiang HY, Liu XB, Zhang QF, *et al.* Distribution and risk analysis of heavy metals and as in the surface sediment of Tianjin offshore area. *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. *海洋科学*, 2013, 37(9): 82–89]

Lin MM, Zhang Y, Xue CT, *et al.* Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments of the area of circum-Bohai Bay and ecological environment assessment. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 41–46 [林曼曼, 张勇, 薛春汀, 等. 环渤海海域沉积物重金属分布特征及生态环境评价. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 41–46]

Liu C, Wang ZY, He Y, *et al.* Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay. *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. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 33–37]

Liu HW, Du D, Ma Z, *et al.* Distribution pattern and contamination assessment of heavy metals in surface sediments of Beidaihe near-shore area. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(7): 47–51 [刘宏伟, 杜东, 马震, 等. 北戴河近岸海域表层沉积物重金属分布特征及污染评价. *海洋地质前沿*, 2015, 31(7): 47–51]

Liu M, Zhang AB, Fan DJ, *et al.* Environmental quality of heavy metals in surface sediments in the central region of the Bohai Sea. *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. *中国环境科学*, 2012, 32(2): 279–290]

Liu XB, Jiang ZP, Zhang GY, *et al.* Potential ecological risk evaluation of heavy metals in the inter tidal zone sediments of Tanggu, Tianjin. *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. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 731-735]
- Luo XX, Zhang R, Yang JQ, *et al.* Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(2): 262-269 [罗先香, 张蕊, 杨建强, 等. 莱州湾表层沉积物重金属分布特征及污染评价. 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269]
- Ma DY, Wang JY. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 521-525 [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. 中国环境科学, 2003, 23(5): 521-525]
- Sun QB, Chen YZ, Sun LY, *et al.* Concentration distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediments in the western waters of Liaodong Bay. *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. 应用海洋学学报, 2015, 34(1): 73-79]
- Wang XJ, Li L, Gao JJ, *et al.* Geochemical speciation and environmental assessment of heavy metals in surface sediments in functional zones of southwest Bohai sea, China. *Oceanaologia Et Limnologia Sinica*, 2015, 46(3): 517-525 [王小静, 李力, 高晶晶, 等. 渤海西南部近岸功能区表层沉积物重金属形态分析及环境评价. 海洋与湖沼, 2015, 46(3): 517-525]
- Wu B, Song JM, Li XG. Environmental characteristics of heavy metals in surface sediments from the Huanghe estuary. *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. 环境科学, 2013, 34(4): 1324-1332]
- Xue B, He YN, Hu HM, *et al.* Research on the distribution characteristic and potential ecological risks of heavy metal pollution in the surface sediments of Jintang Islands. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2015, 34(3): 238-243 [薛彬, 何依娜, 胡红美, 等. 金塘岛海域表层沉积物重金属分布特征与潜在生态风险研究. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2015, 34(3): 238-243]
- Zhang XJ, Yu HY, Ding L, *et al.* Pollution of heavy metals in the surface sediments and potential ecological risk from Shihe Rivers in Qinhuangdao. *Environmental Monitoring in China*, 2014, 30(1): 1-5 [张晓举, 于海洋, 丁龙, 等. 秦皇岛石河口海域沉积物重金属污染及生态风险评价. 中国环境监测, 2014, 30(1): 1-5]
- Zhang XR, Zhang Y, Ye Q, *et al.* Environment quality of Liaodong Bay and pollution evolution of heavy metals. *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. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(2): 21-29]
- Zheng YM, Gao MS, Liu S, *et al.* Distribution patterns and ecological assessment on heavy metals in the surface sediments of Laizhou Bay. *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. 海洋环境科学, 2015, 34(3): 354-360]
- Zhou XB, Mei PW, Peng LL, *et al.* Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay. *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. 生态环境学报, 2015, 24(3): 452-456]

(编辑 马瑾艳)

Inter-Annual Concentration Variations and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments in the Adjacent Sea Water of Tangshan in Spring

HU Qin¹Ⓐ, GUO Jing¹, YIN Xiaona¹, QU Liang², CAO Jing¹

(1. China National Offshore Oil Corporation Research Institute, Beijing 100028;

2. North China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266033)

Abstract Current study surveyed 70 sampling stations through four cruises in the adjacent seawater near Tangshan between 2006 and 2015. The contents and inter-annual variation characteristics of seven heavy metals: Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn and As in the surface sediment were analyzed. The single-factor exceeding rate, geo-accumulation index (I_{geo}) and the comprehensive potential ecological risk index (RI) were used to evaluate the pollution degree. The results showed that the overall levels of the heavy metal contents in the surface sediment were low in the survey areas. Specifically, Cu and As contents in several stations exceeded the first class standard value, whereas the contents of other heavy metals accorded with the first class standard. The inter-annual content variations of the surveyed heavy metal were fluctuant slightly between 2006 and 2015. The contents of Cu, Pb, Cd, and Zn were relatively stable throughout the years, but the inter-annual variation of Hg and Cr increased initially followed by decrease. There was no significant change in As contents between the years. The I_{geo} evaluation results showed that the multi-year average of I_{geo} for the seven heavy metals was Hg>Cd>Pb>Cu>As>Cr>Zn, while the potential ecological risk assessment results showed that the multi-year average of the potential ecological risk factor E_r^i for the seven heavy metals was Hg>Cd>As>Pb>Cu>Cr>Zn. Hg was the main pollution factor in surface sediments in the adjacent sea water of Tangshan based on the consistent results from two pollution evaluation methods, indicating that it has the highest ecological risk level. The inter-annual variations of RI ranged from 44.26 to 153.18 and the inter-annual average value was 89.92, belonging to the low ecological risk level. The trend of the inter-annual variations of RI was increasing and then decreasing, suggesting that the heavy metal pollution in surface sediments has been reduced in recent years.

Key words Tangshan; Surface sediments; Heavy metals; Inter-annual variations; Pollution assessment

Ⓐ Corresponding author: HU Qin, E-mail: huqin7321@163.com