

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20180925001

http://www.yykxjz.cn/

徐勇, 江涛, 杨茜, 崔正国, 赵俊, 曲克明. 夏季渤海中部表层沉积物重金属空间分布及污染评价. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 52-61

Xu Y, Jiang T, Yang Q, Cui ZG, Zhao J, Qu KM. Distribution characteristics and pollution assessment of heavy metals in the surface sediments of the central region of the Bohai Sea during the summer. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 52-61

夏季渤海中部表层沉积物重金属 空间分布及污染评价*

徐勇^{1,2} 江涛¹ 杨茜¹ 崔正国¹ 赵俊¹ 曲克明^{1①}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室
山东省渔业资源与生态环境重点实验室 青岛 266071; 2. 中国海洋大学化学化工学院 青岛 266100)

摘要 为了解渤海中部海域沉积物中重金属的污染状况,于2013年8月采集了渤海中部海域34个站点的表层沉积物,检测了Pb、Cd、Hg、Cu、Zn和As 6种重金属的含量,分析了Pb、Cd、Cu和Zn 4种重金属的空间分布特征,采用污染指数法和潜在生态风险评价法对其表层沉积物重金属污染状况进行评价。结果显示,渤海中部海域表层沉积物重金属含量较低,符合海洋沉积物质量(GB 18668-2002) I类标准的要求。表层沉积物重金属的空间分布总体呈现由近岸向中心海域降低的趋势。Cu、Zn和Pb含量空间变化趋势比较明显,靠近渤海湾海域重金属含量高,离岸距离越远,重金属含量逐渐降低。Cd含量在靠近黄河入海海域最高,呈现自高值区向东西两边海域减小的趋势。各个站点的重金属单因子污染程度较轻,单因子污染系数均值大小顺序为Pb>Cu>Zn>As>Cd>Hg;重金属综合污染指数都小于5,表现为低污染水平。除1号站点的Hg单因子潜在生态风险系数为54.44之外,其他站点表层沉积物Hg、As、Cu、Zn、Pb和Cd的单因子潜在生态风险系数 E_i^p 小于40,范围为0.39~38.80,风险程度由高到低依次为Hg、Cd、As、Pb、Cu和Zn;其综合潜在生态风险系数小于150,范围为16.39~79.57。其中,1号站点综合潜在生态风险系数最高达到79.57。研究表明,此海域属于低潜在生态风险水平,风险指数高值区出现在唐山大清河口海域。

关键词 渤海中部; 表层沉积物; 重金属; 分布特征; 潜在生态风险评价
中图分类号 S912 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2019)05-0052-10

重金属是指密度在4 g/cm³或5 g/cm³以上的金属,主要包括Hg、Zn、Cd、Pb、Cu、Ni等(常金娜等, 2005)。由于重金属具有难降解、易富集并能随食

物链传递等特性,因而会对人类健康、水生生物生存以及生态环境造成极大危害,现已成为重要的海洋环境污染物质。人类日常生产活动及自然界矿石的风化、

* 农业农村部专项“渤海生态环境监测评估”(13-Q52201302)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(20603022017005)共同资助 [This work was supported by Special Project of Ministry of Agriculture and Rural Affairs (Monitoring and Evaluation on Bohai Sea Ecological Environment(13-Q52201302), and the Central Level Scientific Research Institutes for Basic and Special Fund Business (20603022017005)]. 徐勇, E-mail: xuyong@ysfri.ac.cn

① 通讯作者: 曲克明, 研究员, E-mail: qukm@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2018-09-25, 收修改稿日期: 2018-10-13

侵蚀是重金属的主要来源。海水中的重金属离子经水解、絮凝、吸附、沉降等过程最终附着在沉积物上;同时,附着在沉积物上的部分重金属污染物会通过再悬浮进入海水中,从而影响海洋环境。因而,沉积物不仅是海洋中重金属的储存库和终点站,也是海洋中重金属的释放源。当环境变化时,底泥中的重金属向海水中释放,污染形态也会发生转化,从而造成新的污染。自 20 世纪 60 年代开始,国内外对重金属的研究主要集中在含量、来源分析及迁移转化过程;进入 21 世纪后,研究主要转向近海沉积物对环境的毒性评价,因其能较好地评价该地区的环境污染情况,颇受海洋研究者的青睐。

渤海,古称之为沧海、北海,是中国最大的内海,也是我国北方黄河、辽河、海河三大河流的汇聚地,仅通过狭长的渤海海峡与黄海相连。自 1995 年发现亿吨级大油田以来,渤海湾溢油事故经常发生,如“蓬莱 19-3 油田溢油污染”、“7·16 大连输油管道爆炸事故”等。同时,近 30 年来环渤海圈经济的快速发展,也导致渤海中污染物含量不断升高。其中,陆源污染物为主要的海洋污染物(刘成等, 2003),污染程度由近岸海域向中心海区逐渐降低(秦延文等, 2010)。近年来,在渤海海域围绕着沉积物中重金属含量、分布、来源及污染评价等方面开展了大量研究工作,但更多的研究集中在莱州湾(郑懿珉等, 2015)、渤海湾(徐亚岩等, 2012; 周斌等, 2013; 陈秀等, 2017)、辽东湾(孙钦帮等, 2015)、沿岸及河口(王小静等, 2015; 胡琴等, 2017)等地区,而有关渤海中部海域沉积物中重金属的研究相对较少(王伟伟等, 2013; 刘明等, 2016)。本研究根据 2013 年 8 月的调查资料,分析了该海域沉积物重金属含量及其分布状况,并对重金属污染现状进行评价,可为渤海中部海域生态环境保护提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 调查海域

调查地区选在渤海中部海域(118.98°~120.83° E, 38.21°~39.01° N),共设置监测点位 41 个(图 1)。

1.2 样品采集与处理

采用德国 HYDRO-BIOS 公司 Van Veen 抓斗式采泥器,获取 34 个沉积物样品,将沉积物表层 0~2 cm 底泥装入 PE 塑料袋中冷冻保存。沉积物样品需解冻至室温,之后放于 80℃ 烘箱中烘干,将烘干的样品研碎过 160 目标标准筛(取样及样品处理过程中使用的

物品均已净化处理)。重金属(Pb、Cd、Cu、Zn、Hg 和 As)的分析方法均采用《海洋监测规范》(GB17378-2007)制定的标准方法进行,Cd、Cu、Pb 和 Zn 均利用原子吸收分光光度法测定,其中 Cu、Pb 和 Zn 采用火焰法测定,Cd 利用石墨炉法测定;As 和 Hg 含量则根据原子荧光法进行测定。

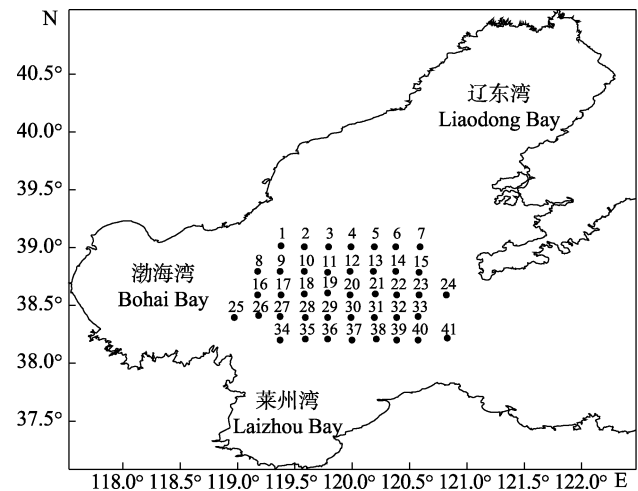


图 1 调查海域及站点

Fig.1 Investigation sea area and survey sites

1.3 沉积物潜在生态风险评价方法

目前,关于沉积物的生态风险的评价方法大致可以分为两大类:单因子指数法与综合评价法。如 Hakanson (1980)潜在生态危害指数法、富集系数法、地累积指数法等为单因子指数评价方法,神经网络法、模糊数学法、内美罗综合污染指数法及灰色聚类法属于综合评价方法(柴小平等, 2015; 刘宏伟等, 2015)。Hakanson 潜在生态危害指数法(公式 1 和公式 2)不仅考虑重金属的含量,而且考虑重金属的毒性效应以及迁移转化规律等因素,从而能够较好地评价研究海域的重金属污染程度(柴小平等, 2015; 刘宏伟等, 2015; 胡琴等, 2017)。本研究利用该方法(公式 1 和公式 2)计算渤海中部海域表层沉积物中重金属的单因子污染系数和综合污染指数,并根据生态风险评价表对该海域沉积物重金属污染程度进行科学评价(表 1)。

$$E_{RI} = \sum_i^n E_r^i = \sum_i^n (T_r^i \times C_f^i) = \sum_i^n \left(\frac{T_r^i \times C_s^i}{C_n^i} \right) \quad (1)$$

$$C_d = \sum_i^n C_f^i \quad (2)$$

式中, E_{RI} 为综合潜在生态风险系数; E_r^i 为单因子潜在生态风险系数; T_r^i 为单个重金属的毒性响应系数(表 2); C_n^i 为全球工业化前沉积物中重金属的背景

值, 本研究采用 Hakanson 背景值(表 2); C_s^i 为沉积物中 i 元素的实际测定重金属含量; C_f^i 为单因子污染指数; C_d 为综合污染指数, 为 C_f^i 之和。

表 1 评价指标与污染程度和潜在生态风险程度的关系

Tab.1 The relation between evaluation indices and the contamination degree and potential ecological risk

| C_f^i | 单因子污染程度 Single factor pollution degree | C_d | 综合污染程度 Comprehensive pollution degree | E_r^i | 单因子生态风险 Degree classification of ecological risk for single heavy metal | E_{RI} | 综合潜在生态风险 Degree classification of the comprehensive potential ecological risk |
|---------|--|-------|---|---------|--|----------|--|
| < 1 | 低 Low | < 5 | 低 Low | < 40 | 低 Low | < 150 | 低 Low |
| 1~3 | 中 Moderate | 5~10 | 中 Moderate | 40~80 | 中 Moderate | 150~300 | 中 Moderate |
| 3~6 | 高 High | 10~20 | 高 High | 80~160 | 高 High | 300~600 | 高 High |
| ≥ 6 | 严重 Serious | ≥ 20 | 严重 Serious | 160~320 | 严重 Serious | ≥ 600 | 严重 Serious |

表 2 重金属含量背景值及其毒性响应系数

Tab.2 Background reference values and toxicity response coefficient of heavy metals

| 参数 Parameters | Cu | Zn | Pb | Cd | Hg | As |
|------------------|----|----|----|-----|-----|----|
| C_n^i (mg/kg) | 30 | 80 | 25 | 0.5 | 0.2 | 15 |
| T_r^i | 5 | 1 | 5 | 30 | 40 | 10 |

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属含量和空间分布

海洋沉积物中重金属的分布不仅受陆源污染物输入影响, 而且与水动力、洋流等水文条件有关, 同时也受水体温度、pH 值、盐度以及沉积物中有机质含量、沉积物粒径的影响(张雷等, 2014)。沉积物中重金属的赋存量能够反映该区域重金属的污染水平, 其平面分布状况能够映射该区域的重金属来源, 并进一步掌握该污染物的扩散情况。因此, 研究渤海中部海域沉积物中重金属的含量及其分布状况能够反映该海域的重金属污染现状。

表 3 反映了渤海中部海区表层沉积物中 4 种重金属含量的高低情况。由表 3 和图 2 可见, Cu 含量在 6.67~34.64 mg/kg 之间, 平均为 20.27 mg/kg。靠近渤海湾位置是 Cu 的高值区, 靠近渤海中部浅滩位置浓度较低, 呈由东向西递增的趋势; Cu 含量最高值是 8 号站位, 靠近曹妃甸外海附近, 最低是 20 号站位, 在调查区域的中心位置。Zn 含量为 28.77~61.19 mg/kg 之间, 平均为 46.55 mg/kg; Zn 的高值区位于大清河口附近, 靠近辽东半岛位置浓度较低, 呈由东向西递增的趋势。位于渤海湾口的 8 号站位 Zn 含量最高,

22 号站位 Zn 含量最低, 其位于调查区域的东北部, 靠近渤海中部浅滩处。Pb 含量为 8.79~32.29 mg/kg 之间, 平均为 18.08 mg/kg; Pb 的高值区位于渤海湾口西北, 靠近辽东半岛位置的浓度较低, 呈由东向西递增的趋势。位于渤海湾口的 8 号站位 Zn 含量最高, 20 号站位 Zn 含量最低, 位于调查区域的中心区域。重金属 Cd 含量范围为 0.06~0.22 mg/kg, 平均含量为 0.15 mg/kg; Cd 有 2 个高值区, 一个高值区位于渤海湾口东部, 靠近渤海中央泥质区, 另一个高值区位于渤海盆地位置。2 号站位 Cd 含量最高, 靠近唐山外海位置, 最低值为 30 号站, 上述 4 种重金属含量均低于《海洋沉积物质量》(GB18668-2002) I 类标准。

本研究的沉积物中重金属含量平均值与渤海其他区域的重金属含量平均值相对比(表 4)发现, 重金属 Pb、Zn 平均含量低于莱州湾、渤海湾、辽东湾的均值; Cu 含量均值低于莱州湾、渤海湾, 而高于辽东湾的均值 15.8 mg/kg; Cd 含量均值高于莱州湾、辽东湾, 低于渤海湾。与刘明等(2012) 2006 年调查数据相比, 本次调查海域重金属 Pb、Cd、Cu 和 Zn 平均含量均有所降低, 说明渤海中部海域沉积物重金属污染状况正在改善。

2.2 影响重金属含量分布的因素

造成重金属分布趋势差异的原因主要有 2 个方面。首先, 重金属来源的不同是影响其分布特征多样的重要因素之一; 其次, 海域水动力作用会通过影响泥沙或污染物的输运方向来影响重金属的分布(陈秀等, 2017), 这 2 种影响因素在本研究中也表现的比较明显。Cu、Pb 和 Zn 高值区位于大清河入海口附近海域, 主要由两个原因造成。首先, 大清河会将沿途大

量泥沙及其污染物输入渤海, 另外, 在其入海口由于海水、河水的交汇融合, 会加速吸附在有机质、小粒径泥沙上的重金属凝集和沉降, 从而造成沉积物中重金属总体分布规律呈河口区含量高、外海含量低的规律(霍素霞, 2011); 其次, 渤海海域存在环流和西部沿岸流, 在二者的共同作用下, 滦河三角洲和秦皇岛附近吸附了重金属的悬浮细颗粒物, 随海水流动向南进入渤海湾, 从而使重金属在渤海海域中重新进行分配。Cd 高值区位于渤海中部平原地区, 也主要由黄

河入海泥沙输送大量悬浮物及污染物导致。研究表明, 莱州湾的黄河入海泥沙在此区域逆时针环流的作用下, 形成自南向北的挟砂流, 其对渤中平原沉积物产生一定的贡献(王伟伟等, 2013)。辽东湾东南部渤中浅滩区域沉积物中, Pb、Cu、Cd 和 Zn 含量较低, 主要由于这一区域沉积物粒径较粗、有机质含量低导致吸附的污染物含量较低(刘明等, 2012)。同时, 该区域较强的水动力作用也会使重金属难以在此集聚, 因而该区域的 4 种重金属含量表现为较低水平。

表 3 研究区重金属含量的统计特征
Tab.3 The statistic characters of heavy metals concentrations in study area

| 项目 Items | Cu | Zn | Pb | Cd |
|---|--------|---------|--------|---------|
| 最低值 Minimum (mg/kg) | 6.76 | 28.77 | 8.79 | 0.064 |
| 最高值 Maximum (mg/kg) | 34.64 | 61.19 | 32.29 | 0.219 |
| 均值 Average (mg/kg) | 20.27 | 46.55 | 18.08 | 0.148 |
| 超标比例 The over standard rate (%) | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 海洋沉积物质量(I / II) Marine sedimentary evaluation criterion (I / II) | 35/100 | 150/350 | 60/130 | 0.5/1.5 |

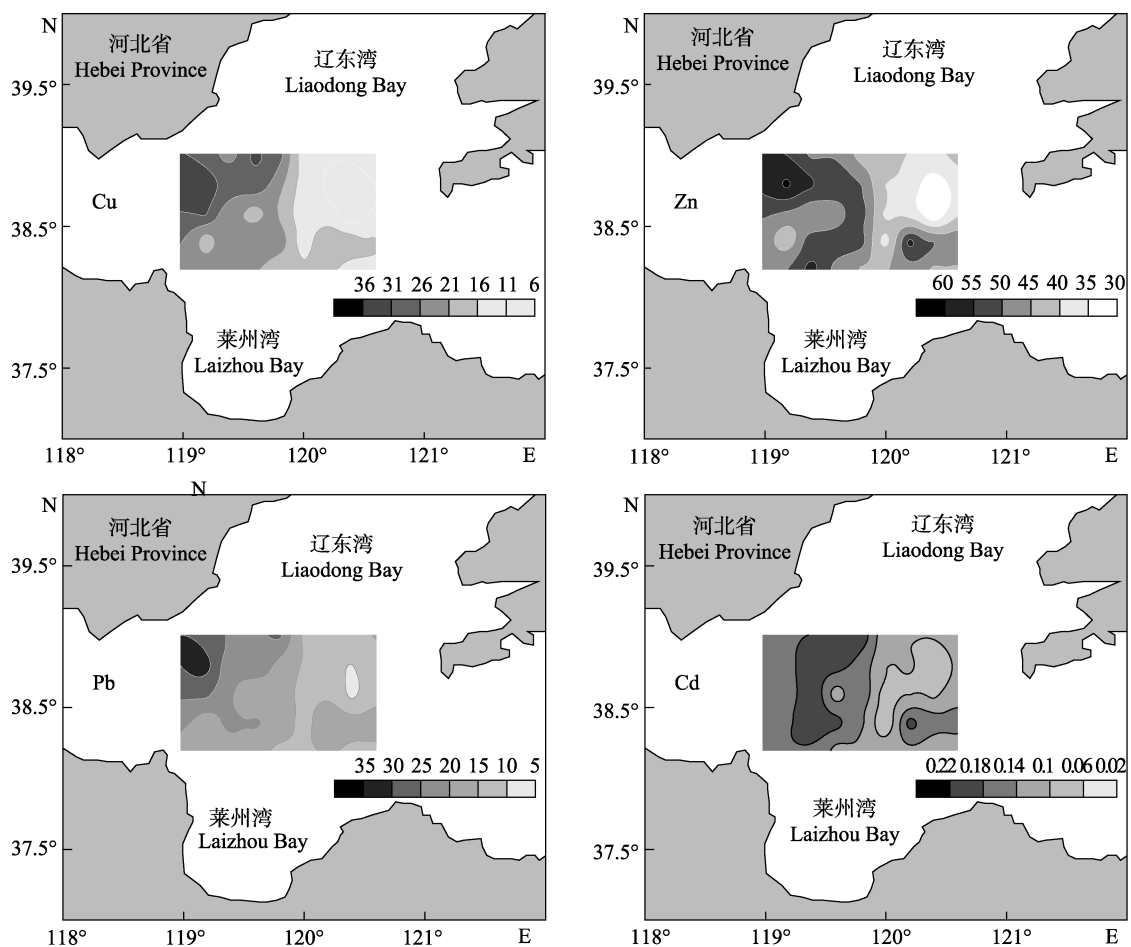


图 2 表层沉积物重金属含量分布(mg/kg)
Fig.2 The content of heavy metal elements in surface sediments (mg/kg)

表4 渤海海域沉积物中重金属含量(mg/kg)
Tab.4 Heavy metals of surface sediment concentrations in Bohai area (mg/kg)

| 区域 Area | Cu | Zn | Pb | Cd | 来源 Resource |
|--|-------|-------|-------|------|-------------------|
| 莱州湾 Laizhou Bay | 21.96 | 60.44 | 21.99 | 0.12 | 郑懿珉等(2015) |
| 渤海湾 Bohai Bay | 23.18 | 87.22 | 38.00 | 0.23 | 周笑白等(2015) |
| 辽东湾 Liaodong Bay | 15.8 | 57.8 | 20.4 | 0.10 | 胡宁静等(2010) |
| 渤海中部 The central region of the Bohai Sea | 26.75 | 75.29 | 26.21 | / | 刘明等(2012) |
| 渤海中部 The central region of the Bohai Sea | 20.27 | 46.55 | 18.08 | 0.15 | 本研究 This research |

除物质来源影响外,有机物的含量、沉积物的颗粒粒径及其沉积环境等也影响着重金属的含量和分布(Abdallah *et al.*, 2014)。作为沉积物重要组成部分的有机物,其含量与沉积物粒径密切相关,粒径越小其含量越高,所以,沉积物粒度是影响有机物含量的重要因子(陈彬等, 2014)。海洋沉积物的粒度分布反映了海洋物质的来源、输运能力和物质输移路径的综合情况,同时也影响着海洋重金属的含量(丘耀文等, 2004)。在许多研究中,沉积物的细粒级组分与其重金属的含量之间存在着显著正相关的规律(刘明等, 2012)。对红树林生长区域表层沉积物中重金属的研究显示,其含量平面分布与粒径存在显著相关性,主要体现在 Cu、Pb、Zn、Cr 和 As 的含量与小于 0.001 mm 黏粒含量显著相关,对重金属具有巨大的吸附作用(李柳强等, 2008)。除此之外,海洋中重金属的结合电位会因为盐度及海水氧化还原的不同发生一定的变化,从而影响沉积物中重金属的浓度(张雷等, 2014)。综合以上因素的影响,本研究中重金属浓度由滦河口低盐区域呈现向外海高盐区域逐渐降低的规律,这与渤海南部近岸低盐海域中 Zn、Cu 和 Pb 的浓度沿东南向高盐外海降低的趋势一致(张栋等, 2011)。

2.3 表层沉积物中重金属相关性分析

陈亮等(2017)研究认为,若同一海域沉积物的不同重金属之间具有较好的相关性,说明这些重金属可能是同一来源。采用 SPSS 16.0 软件进行重金属空间分布的 Pearson 相关性分析。结果显示(表 5), Pb、Zn、Cd 和 Cu 之间具有显著相关关系,这表明该海域表层沉积物中 Cu、Pb、Zn 和 Cd 可能来自相同的污染源。

2.4 渤海中部表层沉积物重金属污染程度分析

通过表 6 的分析结果可以看出,渤海中部海域沉积物中的 Zn、Cd 和 As 3 种重金属的 C_f^i 平均值都小

于 1, 表现为低污染水平; 2、8、10 和 16 站位 Cu 单因子污染系数大于 1; 3、8 和 16 站位的 Pb 单因子污染系数大于 1; 1 号站位的 Hg 单因子污染系数大于 1。以上站位重金属含量高于相应的环境背景值,说明该区域已经受到污染。污染系数均值大小顺序为 Pb>Cu>Zn>As>Cd>Hg, 其中, Pb 的污染系数均值最大,则其为整个渤海中部沉积物中最主要的环境污染因子,其均值为 0.72。

调查区域各个站位的重金属综合污染指数都小于 5, 表现为低污染水平。从综合污染指数来看,渤海中部整个调查区域综合污染指数平均值为 2.97, 处于低风险污染水平。

表5 表层沉积物中各元素的相关性分析
Tab.5 Correlation analysis result of individual elements in sediments

| | Cu | Zn | Pb | Cd |
|----|---------|---------|---------|---------|
| Cu | 1 | 0.801** | 0.942** | 0.782** |
| Zn | 0.801** | 1 | 0.746** | 0.724** |
| Pb | 0.942** | 0.746** | 1 | 0.771** |
| Cd | 0.782** | 0.724** | 0.771** | 1 |

**表示在 0.01 水平上显著相关

** Means a significant correlation on 0.01 level

2.5 渤海中部表层沉积物重金属潜在生态风险评价

表 7 显示,除 1 号站位的 Hg 单因子潜在生态风险系数为 54.44 之外,整个调查区的所有站位中 Hg、As、Cu、Zn、Pb 和 Cd 的单因子潜在生态风险系数 E_r^i 均小于 40。这 6 种重金属的单因子潜在生态风险系数平均值的范围为 0.58~10.50, 由大到小表现为 Hg、Cd、As、Pb、Cu 和 Zn, 风险系数均值最大的元素 Hg, 为 10.50, 因此, Hg 是该海域最主要的潜在生态风险因子。这与重金属污染程度评价的结果相一致,都显示 Hg 为此研究海域最主要的影响因子。对所有

表 6 沉积物中重金属污染单因子评价结果
Tab.6 The results of single factor evaluation on heavy metal pollution in sediment

| 站 位 Station | C_f^i | | | | | | C_d |
|----------------|---------|------|------|------|------|------|-------|
| | Hg | As | Cu | Zn | Pb | Cd | |
| 1 | 1.36 | 0.50 | 0.77 | 0.61 | 0.97 | 0.36 | 4.57 |
| 2 | 0.97 | 0.52 | 1.07 | 0.62 | 0.96 | 0.39 | 4.52 |
| 3 | 0.67 | 0.35 | 0.94 | 0.53 | 1.03 | 0.42 | 3.94 |
| 4 | 0.07 | 0.31 | 0.44 | 0.53 | 0.56 | 0.21 | 2.13 |
| 7 | 0.08 | 0.23 | 0.46 | 0.53 | 0.62 | 0.23 | 2.15 |
| 8 | 0.12 | 0.28 | 1.15 | 0.76 | 1.29 | 0.33 | 3.93 |
| 9 | 0.41 | 0.42 | 0.98 | 0.70 | 0.87 | 0.42 | 3.78 |
| 10 | 0.19 | 0.56 | 1.00 | 0.68 | 0.98 | 0.39 | 3.80 |
| 11 | 0.21 | 0.25 | 0.76 | 0.63 | 0.72 | 0.32 | 2.90 |
| 12 | 0.46 | 0.43 | 0.47 | 0.50 | 0.59 | 0.20 | 2.65 |
| 13 | 0.31 | 0.35 | 0.36 | 0.49 | 0.49 | 0.22 | 2.22 |
| 14 | 0.49 | 0.25 | 0.29 | 0.39 | 0.39 | 0.15 | 1.97 |
| 16 | 0.08 | 0.37 | 1.06 | 0.61 | 1.04 | 0.31 | 3.46 |
| 17 | 0.19 | 0.54 | 0.73 | 0.56 | 0.83 | 0.42 | 3.28 |
| 18 | 0.26 | 0.37 | 0.62 | 0.58 | 0.60 | 0.22 | 2.65 |
| 19 | 0.35 | 0.43 | 0.70 | 0.66 | 0.75 | 0.36 | 3.26 |
| 20 | 0.08 | 0.30 | 0.42 | 0.49 | 0.53 | 0.16 | 1.99 |
| 21 | 0.10 | 0.14 | 0.43 | 0.47 | 0.57 | 0.20 | 1.91 |
| 22 | 0.21 | 0.25 | 0.23 | 0.36 | 0.35 | 0.18 | 1.58 |
| 25 | 0.25 | 0.42 | 0.88 | 0.60 | 0.84 | 0.36 | 3.34 |
| 26 | 0.08 | 0.30 | 0.62 | 0.51 | 0.70 | 0.34 | 2.55 |
| 27 | 0.63 | 0.52 | 0.80 | 0.66 | 0.84 | 0.44 | 3.90 |
| 28 | 0.11 | 0.55 | 0.86 | 0.66 | 0.83 | 0.39 | 3.39 |
| 29 | 0.13 | 0.65 | 0.85 | 0.66 | 0.79 | 0.30 | 3.38 |
| 30 | 0.10 | 0.50 | 0.45 | 0.47 | 0.52 | 0.13 | 2.17 |
| 31 | 0.12 | 0.42 | 0.70 | 0.71 | 0.79 | 0.40 | 3.14 |
| 32 | 0.09 | 0.50 | 0.62 | 0.63 | 0.67 | 0.31 | 2.81 |
| 33 | 0.07 | 0.32 | 0.55 | 0.62 | 0.70 | 0.32 | 2.57 |
| 34 | 0.10 | 0.93 | 0.84 | 0.71 | 0.76 | 0.34 | 3.68 |
| 35 | 0.13 | 0.75 | 0.73 | 0.60 | 0.67 | 0.25 | 3.12 |
| 36 | 0.08 | 0.70 | 0.56 | 0.56 | 0.55 | 0.27 | 2.70 |
| 39 | 0.07 | 0.53 | 0.45 | 0.55 | 0.54 | 0.20 | 2.35 |
| 40 | 0.09 | 0.41 | 0.50 | 0.55 | 0.55 | 0.22 | 2.32 |
| 平均值 Average | 0.26 | 0.43 | 0.68 | 0.58 | 0.72 | 0.30 | 2.97 |

站 位 6 种重金属综合潜在生态风险系数 E_{RI} 分析可知, 其综合风险系数均小于 150, 表明此海域属于低潜在生态风险水平。其中, 1 号站位综合潜在生态风险系数最高, 达到 79.57, 其次为 2 号站位为 66.38, 20 号站位综合潜在生态风险系数最低, 为 16.39, 其风险系数仅为 1 号站位的 1/5。1、2 号站位为河北大

清河入海口附近, 这一区域也是 Cu、Pb 和 Zn 含量的高值区; 风险系数最低的 20 号站位处于调查海域的中央位置, 由于该区域远离陆地, 受陆源污染影响较小, 同时不易受渤海沿岸流的影响, 水体交换能力弱, 导致重金属在此处富集相对较低, 从而潜在生态风险也表现为较低水平。

表7 表层沉积物重金属潜在生态风险系数和风险指数
 Tab.7 The potential ecological risk factors (E_{RI}) and risk indices (E_r^i) of heavy metals in surface sediments

| 站位 Station | E_r^i | | | | | | E_{RI} |
|---------------|---------|------|------|------|------|-------|----------|
| | Hg | As | Cu | Zn | Pb | Cd | |
| 1 | 54.44 | 5.00 | 3.86 | 0.61 | 4.85 | 10.81 | 79.57 |
| 2 | 38.80 | 5.22 | 5.33 | 0.62 | 4.82 | 11.59 | 66.38 |
| 3 | 26.77 | 3.51 | 4.70 | 0.53 | 5.14 | 12.46 | 53.11 |
| 4 | 2.97 | 3.07 | 2.20 | 0.53 | 2.82 | 6.44 | 18.03 |
| 7 | 3.24 | 2.32 | 2.31 | 0.53 | 3.08 | 7.02 | 18.49 |
| 8 | 4.60 | 2.75 | 5.77 | 0.76 | 6.46 | 9.90 | 30.26 |
| 9 | 16.33 | 4.17 | 4.88 | 0.70 | 4.34 | 12.47 | 42.89 |
| 10 | 7.61 | 5.58 | 4.99 | 0.68 | 4.92 | 11.59 | 35.37 |
| 11 | 8.54 | 2.54 | 3.80 | 0.63 | 3.61 | 9.72 | 28.84 |
| 12 | 18.25 | 4.27 | 2.36 | 0.50 | 2.93 | 6.13 | 34.44 |
| 13 | 12.32 | 3.48 | 1.82 | 0.49 | 2.43 | 6.50 | 27.03 |
| 14 | 19.50 | 2.54 | 1.44 | 0.39 | 1.95 | 4.63 | 30.44 |
| 16 | 3.26 | 3.66 | 5.30 | 0.61 | 5.20 | 9.17 | 27.20 |
| 17 | 7.79 | 5.40 | 3.65 | 0.56 | 4.13 | 12.69 | 34.22 |
| 18 | 10.40 | 3.72 | 3.10 | 0.58 | 2.99 | 6.68 | 27.46 |
| 19 | 14.14 | 4.30 | 3.51 | 0.66 | 3.73 | 10.81 | 37.16 |
| 20 | 3.18 | 3.02 | 2.11 | 0.49 | 2.64 | 4.95 | 16.39 |
| 21 | 4.00 | 1.39 | 2.16 | 0.47 | 2.83 | 5.90 | 16.76 |
| 22 | 8.43 | 2.52 | 1.13 | 0.36 | 1.76 | 5.45 | 19.65 |
| 25 | 10.00 | 4.15 | 4.41 | 0.60 | 4.18 | 10.80 | 34.15 |
| 26 | 3.34 | 2.97 | 3.09 | 0.51 | 3.51 | 10.24 | 23.67 |
| 27 | 25.34 | 5.18 | 4.01 | 0.66 | 4.22 | 13.15 | 52.56 |
| 28 | 4.27 | 5.52 | 4.28 | 0.66 | 4.15 | 11.57 | 30.45 |
| 29 | 5.26 | 6.51 | 4.26 | 0.66 | 3.93 | 9.02 | 29.63 |
| 30 | 3.93 | 5.00 | 2.26 | 0.47 | 2.61 | 3.82 | 18.09 |
| 31 | 4.71 | 4.16 | 3.52 | 0.71 | 3.95 | 11.96 | 29.01 |
| 32 | 3.54 | 5.01 | 3.10 | 0.63 | 3.33 | 9.31 | 24.92 |
| 33 | 2.72 | 3.15 | 2.76 | 0.62 | 3.51 | 9.63 | 22.38 |
| 34 | 3.92 | 9.33 | 4.19 | 0.71 | 3.80 | 10.27 | 32.22 |
| 35 | 5.33 | 7.50 | 3.63 | 0.60 | 3.34 | 7.44 | 27.82 |
| 36 | 3.16 | 6.95 | 2.78 | 0.56 | 2.73 | 8.00 | 24.18 |
| 39 | 2.71 | 5.34 | 2.27 | 0.55 | 2.72 | 6.05 | 19.64 |
| 40 | 3.54 | 4.12 | 2.50 | 0.55 | 2.76 | 6.62 | 20.09 |
| 平均值 Average | 10.50 | 4.34 | 3.38 | 0.58 | 3.62 | 8.87 | 31.29 |

通过表6与表7发现,重金属单因子污染程度评价指数法与潜在生态风险评价方法所得到的结果比较一致,但单因子污染程度分析法忽略了海洋生物在不同沉积物条件下对重金属的毒性响应特性和海洋生物对不同重金属毒性响应特征的差别,不能准确地揭示沉积物中不同重金属对研究海域的生态危害效应(冯慕华等, 2003)。而潜在生态风险评价法不仅考虑了重金属对海洋生物的毒性影响,而且兼顾了重

金属在沉积物中的迁移转化规律,并能与研究海域重金属的背景值进行对比,从而能够最大程度地降低区域差异及异源污染影响,对于较大范围内异源沉积物污染程度的综合评价具有较好的适应性(陈翠华等, 2008)。

3 结论

渤海中部海域34个站位表层沉积物Cu、Zn、Pb

和 Cd 4 种重金属最高值均低于国家《海洋沉积物质量》标准 I 类限量值, 说明该海域沉积物质量符合 I 类标准要求。渤海中部海域表层沉积物重金属的空间分布特征显示, 其含量总体上呈现由近岸海域向中心海区降低的趋势。Cu、Zn 和 Pb 含量空间变化趋势比较明显, 大清河入海口海域重金属含量高, 离岸距离越远, 重金属含量逐渐降低。Cd 含量在靠近黄河入海海域最高, 呈现自高值区向东西两边海域减小的趋势。

单因子污染程度评价指数法表明, 2、8、10 和 16 站位 Cu 污染系数大于 1; 3、8 和 16 站位的 Pb 污染系数大于 1; 1 号站位的 Hg 污染系数大于 1, 说明该区域沉积物已经受到重金属污染。综合污染指数结果显示, 各元素综合污染指数均小于 5, 说明渤海中部表层沉积物重金属总体属于低污染水平, 污染程度从高到低表现为 Pb<Cu<Zn<As<Cd<Hg。

渤海中部海域表层沉积物 6 种重金属未对该区域造成潜在生态风险, 各元素风险程度由高到低依次为 Hg<Cd<As<Pb<Cu<Zn, 综合潜在生态风险最大的元素为 Hg。从分布区域来看, 大清河入海口海域重金属富集量相对较高, 其综合潜在生态风险表现为较高水平。

参 考 文 献

- Abdallah MAM, Mohamed AA. Assessment of heavy metals by sediment quality guideline in surficial sediments of Abu Qir Bay southeastern Mediterranean Sea, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 2015, 73(7): 3603–3609
- Chang JN, Qu JG. Heavy metal pollution in water body: Ecological effects and biological monitoring. *Sichuan Environment*, 2005, 24(4): 29–33 [常晋娜, 瞿建国. 水体重金属污染的生态效应及生物监测. *四川环境*, 2005, 24(4): 29–33]
- 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 B, Fan DJ, Guo ZG, *et al.* Heavy metals distribution patterns and sedimentary fluxes in fine-grained sediments in the Changjiang Estuary and its adjacent areas. *Acta Oceanologica Sinica*, 2014, 36(11): 101–110 [陈彬, 范德江, 郭志刚, 等. 长江口及邻近海域细颗粒沉积物中重金属的空间分布及沉积通量. *海洋学报*, 2014, 36(11): 101–110]
- Chen CH, Ni SJ, He BB, *et al.* Potential ecological risk analysis of heavy metals contamination based on GIS methods in sediments of Dexing, Jiangxi Province, China. *Advances in Earth Science*, 2008, 23(3): 312–322 [陈翠华, 倪师军, 何彬彬, 等. 基于 GIS 技术的江西德兴地区水系沉积物重金属污染的潜在生态危害研究. *地球科学进展*, 2008, 23(3): 312–322]
- Chen L, Li TJ, Yang WF, *et al.* Distribution and sources of heavy metals in surface sediments, northern South China Sea. *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. *生态环境学报*, 2016, 25(3): 464–470]
- Chen X, Li SZ, Yuan DK, *et al.* Distribution characteristics of sediment heavy metals in Bohai Bay and its effect factors. *Advances in Marine Sciences*, 2017, 35(3): 82–91 [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. *海洋科学进展*, 2017, 35(3): 82–91]
- Feng MH, Long JP, Yu L, *et al.* Ecological risk evaluation of heavy metals of marine sediment in Liaodong Bays shallow waters. *Marine Sciences*, 2003, 27(3): 52–56 [冯慕华, 龙江平, 喻龙, 等. 辽东湾东部浅水区沉积物中重金属潜在生态评价. *海洋科学*, 2003, 27(3): 52–56]
- Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach. *Water Research*, 1980, 14: 975–1001
- Hu Q, Li Q, Huang BG, *et al.* Pollution status and the annual variations of heavy metals in the surface sediments in the adjacent sea water of the Yellow River Estuary. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(2): 16–23 [胡琴, 李强, 黄必桂, 等. 黄河口附近海域表层沉积物重金属污染状况及年际变化分析. *渔业科学进展*, 2017, 38(2): 16–23]
- Hu NJ, Shi XF, Huang P, *et al.* Distribution of metals in surface sediments of Liaodong Bay, Bohai Sea. *China Environmental Science*, 2010, 30(3): 380–388 [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. *中国环境科学*, 2010, 30(3): 380–388]
- Hu NJ, Liu JH, Huang P, *et al.* The distribution and risk assessment of metals in surface sediments of the Laizhou Bay in the Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(2): 92–100 [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. *海洋学报*, 2012, 34(2): 92–100]
- Huo SX. Research on distribution characteristics and ecological risks of heavy metal in surface sediments of Bohai Sea. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2011 [霍素霞. 渤海沉积物重金属分布特征及生态风险研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2011]
- Li LQ, Ding ZH, Liu JL, *et al.* Distribution of heavy metals in surficial sediments from main mangrove wetlands of China and their influence factors. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(5): 159–164 [李柳强, 丁振华, 刘金铃, 等. 中国主要红树林表层沉积物中重金属的分布特征及其影响因素. *海洋学报*, 2008, 30(5): 159–164]
- Liu C, Wang ZY, He G, *et al.* Investigation on sediment quality

- of the river mouths around Bohai Bay. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(1): 58–63 [刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口底质现状的调查研究. 环境科学学报, 2003, 23(1): 58–63]
- 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, Fan DJ, Zheng SW, *et al.* Tracking lead origins in the central Bohai Sea based on stable lead isotope composition. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 38(2): 36–47 [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. 海洋学报, 2016, 38(2): 36–47]
- 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]
- Qin YW, Zheng BH, Zhang L, *et al.* Pollution characteristics analysis of water quality in Liaodong Bay from 2004 to 2008. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(8): 987–992 [秦延文, 郑丙辉, 张雷, 等. 2004–2008年辽东湾水质污染特征分析. 环境科学研究, 2010, 23(8): 987–992]
- Qiu YW, Zhu LS, Li MQ, *et al.* Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay. *Marine Science Bulletin*, 2004, 23(6): 49–53 [丘耀文, 朱良生, 黎满球, 等. 海陵湾沉积物重金属与粒度分布特征. 海洋通报, 2004, 23(6): 49–53]
- 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 WW, Fu YB, Li ST, *et al.* Distribution on surface sediment and sedimentary divisions in the middle part of Bohai Sea. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(3): 478–485 [王伟伟, 付元宾, 李树同, 等. 渤海中部表层沉积物分布特征与粒度分区. 沉积学报, 2013, 31(3): 478–485]
- 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. *Oceanologia 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]
- Xu YY, Song JM, Li XG, *et al.* Variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(3): 732–740 [徐亚岩, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海湾表层沉积物各形态重金属的分布特征与生态风险评价. 环境科学, 2012, 33(3): 732–740]
- Zhang D, Zheng XL, He Y, *et al.* Pollution and risk assessment of heavy metals in surface sediment of South Bohai. *Environmental Pollution and Control*, 2011, 33(9): 8–10 [张栋, 郑晓玲, 何鹰, 等. 渤海南部表层沉积物重金属污染及潜在生态风险评价. 环境污染与防治, 2011, 33(9): 8–10]
- Zhang L, Qin YW, Ma YQ, *et al.* Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in the tidal reach and its adjacent sea estuary of Daliaohe Area, China. *Environmental Science*, 2014, 35(9): 3336–3345 [张雷, 秦延文, 马迎群, 等. 大辽河感潮段及其近海河口重金属空间分布及污染评价. 环境科学, 2014, 35(9): 3336–3345]
- 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 B, Liu W, Liu YG, *et al.* Potential ecological risk analysis of heavy metals in surface sediments from typical ecologically regions of south Bohai Bay. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(4): 533–537 [周斌, 刘伟, 刘有刚, 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. 海洋环境科学, 2013, 32(4): 533–537]
- 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]

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Central Region of the Bohai Sea During the Summer

XU Yong^{1,2}, JIANG Tao¹, YANG Qian¹, CUI Zhengguo¹, ZHAO Jun¹, QU Keming^{1①}

(1. Key Laboratory for Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Fishery Resources and Eco-Environment, Shandong Province, Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract The Bohai Sea is a semi-enclosed bay with weak water exchange capacity and pollution levels that are increasing with the development of modern industry and agriculture. Heavy metal pollution has become an important factor, as it both directly and indirectly endangers human health. The release of heavy metals from sediments might significantly impact on the water environment and the ecological health of the sea. A survey of heavy metal content, distribution, enrichment, and pollution state of the sediments was conducted in August 2013 to determine the seas characteristics. The contents of Cu, Pb, Zn, and Cd in the surface sediment samples from 34 sites were measured, and the content and distribution characteristics of these heavy metals were studied. Single factor standard indices and potential ecological risk indices were used to evaluate the status of the heavy metal pollution and the degree of ecological risk. The results indicated that the average heavy metal content was low, and that all individual element contents were lower than the first class of GB 18668-2002. The spatial distribution of the heavy metals in the sediments showed that their contents decreased between the offshore and central regions. The Cu, Pb, and Zn surface sediment heavy metals, showed the most obvious changes with relation to their location; their coastal content was higher and was gradually reduced in samples moving towards the offshore region. The Cd content in the Yellow River estuary was high to the east and decreased along the western sides. The individual single-factors for each of the heavy metals in the surface sediments was less than 5, which indicated a low degree of pollution, and the descending order of the average single factors was Pb, Cu, Zn, As, Cd, and Hg. The single potential ecological risk factor of the six heavy metals, except for the Hg element at No. 1 (54.44) station, were less than 40 (0.9~38.80), which indicates a low level ecological risk. The descending order of the potential ecological risk factors was Hg, As, Cu, Zn, Pb, and Cd, and ranged from 0.58 to 10.50. The comprehensive potential ecological risk indices are all less than 150, and ranged from 16.39 to 79.57, which indicated low level of ecological risks. The descending order was Hg, Cd, As, Pb, Cu, and Zn. The Daqinghe River estuary had the highest risk values, and Hg was the main potential ecological risk factor in the surveyed area.

Key words Central Region of the Bohai Sea; Surface sediment; Heavy metals; Distribution characteristics; Potential ecological risk assessment

① Corresponding author: QU Keming, E-mail: qukm@ysfri.ac.cn