

朱爱美, 张辉, 崔菁菁, 等. 渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素[J]. 海洋学报, 2019, 41(12): 134–144, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.013

Zhu Aimei, Zhang Hui, Cui Jingjing, et al. Environmental quality assessment and influence factor of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2019, 41(12): 134–144, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2019.12.013

# 渤海沉积物重金属环境质量评价及其影响因素

朱爱美<sup>1,2</sup>, 张辉<sup>1,2</sup>, 崔菁菁<sup>1,2</sup>, 胡宁静<sup>1,2,3</sup>, 刘季花<sup>1,2,3\*</sup>

(1. 自然资源部第一海洋研究所, 山东 青岛 266061; 2. 自然资源部海洋沉积与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266061; 3. 青岛国家海洋科学与技术试点国家实验室 海洋地质过程与环境功能实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 基于渤海 404 个站位的沉积物重金属元素含量与分布特征, 通过潜在生态风险、地累积指数等指标定量评价了沉积物中重金属的环境质量, 利用富集因子和主成分分析法, 对影响渤海表层沉积物中重金属元素分布特征的影响因素进行了分析。研究结果显示, 渤海湾重金属元素平均含量最高, 渤海海峡最低; 渤海 Cd 具有强潜在生态风险, Hg 具有中等-强潜在生态风险, 总潜在生态风险程度为中等; Cr 和 Ni 的少量站位超过毒性阈值上限, 其余重金属污染物含量均低于毒性阈值下限, 表明渤海发生沉积物重金属的毒性污染的概率很低。沉积物中粒度效应控制的重金属元素含量对渤海表层沉积物中的重金属元素的分布具有主要影响, 人类活动所造成的污染主要是 Cd, 主要分布于辽东湾的锦州湾和复州湾, 其次通过河流进入海洋的 Hg 对黄河三角洲及莱州湾有重要影响, 亟需引起注意。

**关键词:** 渤海; 表层沉积物; 重金属; 环境质量评价; 影响因素

中图分类号: P736.4; P595

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2019)12-0134-11

## 1 引言

渤海是我国唯一的内海, 同时也是环渤海经济区的重要组成部分, 由辽东湾、渤海湾、莱州湾、渤海中央盆地和渤海海峡等 5 个部分组成<sup>[1]</sup>。黄河、海河、辽河、滦河等大中型河流入海<sup>[1-2]</sup>, 发育有辽东浅滩<sup>[3]</sup>、渤海泥质区<sup>[4]</sup>等独特的沉积现象, 是我国东部陆架源-汇体系的重要组成部分<sup>[5]</sup>。

此外, 渤海也是我国进行沉积物环境地球化学研究最早的海域<sup>[6]</sup>, 受发展历史影响, 辽东湾、渤海湾已经成为我国重金属污染最为严峻的区域之一<sup>[7-8]</sup>。自 20 世纪 80 年代开始, 已经有诸多针对重金属环境质量评价的工作在渤海尤其是辽东湾、渤海湾海岸带地区展开<sup>[9-10]</sup>。基于表层沉积物与<sup>210</sup>Pb 年代学基础的柱状样中沉积物的重金属元素研究表明, 黄河三角洲

及莱州湾地区为高速沉积区, 辽东湾沉积速率较低<sup>[9-10]</sup>。辽东湾特别是锦州湾是渤海重金属污染最为严重的地区<sup>[8]</sup>, 天津海岸带地区污染形势亦较为严峻<sup>[7]</sup>, 产生危害的重金属主要为 Cd 和 Hg<sup>[7]</sup>。针对渤海湾、辽东湾、莱州湾等重点海湾的研究, 也进行了沉积物中重金属分布特征、污染程度、污染物来源等方面的分析<sup>[7, 11-12]</sup>。海岸带、河口等地区的研究表明, 表层沉积物中重金属污染很大程度上来源于人类活动<sup>[7-8]</sup>。

尽管对渤海地区沉积物中重金属元素特征已经开展了长期的详尽研究, 但研究区主要以河口和海岸带地区为主, 局限于单个海湾, 缺少整个渤海的详细定量研究<sup>[7, 11-12]</sup>。因此, 本文对整个渤海沉积物进行研究, 分析了 8 种重金属元素 (Cd、Hg、Cr、Pb、Ni、Zn、As、Cu) 的含量与分布, 计算了海洋沉积物的主要环境质量评价指标 (重金属潜在生态风险、地累积指

收稿日期: 2018-12-26; 修订日期: 2019-04-09。

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201205003); 国际海底区域开发“十三五”课题 (DY135-R2-1-03)。

作者简介: 朱爱美 (1982—), 女, 江苏省如东县人, 高级工程师, 主要从事分析化学及海洋地球化学研究。E-mail: zhuaimai@fio.org.cn

\* 通信作者: 刘季花 (1965—), 女, 山西省太西县人, 研究员, 主要从事海洋沉积地球化学研究。E-mail: jihliu@fio.org.cn

数、富集因子、一致性沉积物质量基准),对渤海沉积物环境质量进行了定量评价,并分析了影响重金属元素分布的主要因素,冀望为渤海地区的环境保护与开发利用提供科学参考。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

表层沉积物样品采集工作于2007年8月由科研考察船“勘407”完成,采样站位分布见图1(采样站位大部分集中在渤海海域,少部分分布于渤海海峡东部的黄海海域)。使用箱式取样器采集样品,用塑料勺小心取其中央未受干扰的表层沉积物样品(0~2 cm),并密封保存于聚乙烯样品袋中,-20℃条件下保存。样品经冷冻干燥后用玛瑙研钵研磨,过200目筛,充分混合均匀后保存样品袋中,放入干燥器待测。

### 2.2 样品测试

沉积物粒度、元素、分析均在自然资源部海洋沉积与环境地质重点实验室完成,具体测试过程如下:

取表层沉积物适量进行粒度测试(约2 g),用30%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>去除有机质,再用5 mL质量分数为10%的HCl溶液去除碳酸盐后用蒸馏水洗盐,经超声波分散后用Mastersizer 2000型激光粒度仪(英国马尔文公

司)进行测定。利用Folk-Ward公式<sup>[13]</sup>计算每个样品的平均粒径( $Mz$ )值。挑选10%的样品进行了重复性粒径分析,测试结果相对偏差小于5%。

称取0.05 g烘干的沉积物粉末样品,在密闭的10 mL Telfon罐中依次加入1.5 mL高纯HF溶液和1.5 mL的高纯HNO<sub>3</sub>溶液,放入烘箱190℃消解48 h后蒸干,去除HF后用2% HNO<sub>3</sub>溶液定容至50 g,待测。采用ICP-OES(iCap 6300型,美国Thermo Fisher Scientific Inc.生产)测定主量元素(Al、Fe)含量,利用ICP-MS(X series II型,美国Thermo Fisher Scientific Inc.生产)测定Cu、Zn、Pb、Ni、Cd含量。实验样品按照样品数的10%比例插入标准物质(GBW07309、GBW07313、GBW07314、GBW07316)进行质控,所有分析项目在分析过程中均设置空白组与重复组。标准物质各元素的回收率均大于95%,表明测试结果准确可靠。

As和Hg的测定过程如下:称取0.25 g样品于25 mL PFA管型瓶管中,准确加入新配制的1:1王水10 mL,再置于95℃水浴中加热1 h以上。取下冷却至室温,加Milli-Q水定容至25 mL,静置过夜。分取上清液2 mL于15 mL离心管中,加入2 mL 5%硫脲-抗坏血酸溶液,6 mL 30% HCl溶液定容至10 mL,预还原30 min后,上机测定As。另取8 mL上清原液上机测定Hg。

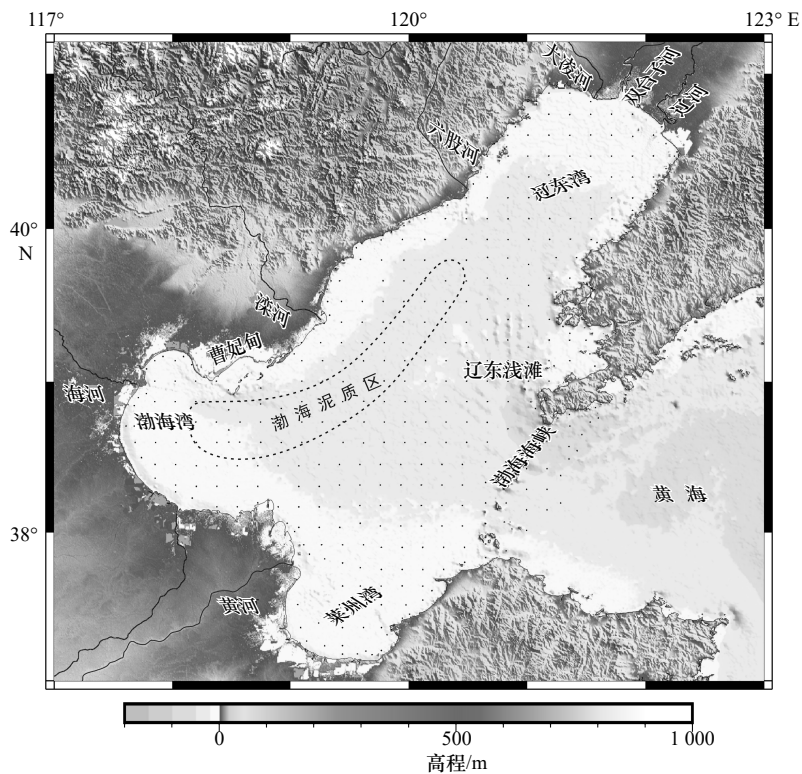


图1 渤海底质沉积物采样站位

Fig. 1 Map of sampling stations of surface sediments in the Bohai Sea

## 2.3 分析与评价

### 2.3.1 重金属潜在生态风险评价

重金属潜在生态风险评价具有简洁、快速、标准化的特点<sup>[14]</sup>, 广泛应用于沉积物重金属环境质量评价中, 计算公式如下<sup>[15]</sup>:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i}, \quad (1)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i, \quad (2)$$

$$RI = \sum_{i=1}^m E_r^i, \quad (3)$$

式中,  $C_f^i$ 、 $T_r^i$ 、 $E_r^i$ 分别为第  $i$  种重金属的污染系数、毒性系数和潜在生态危害系数;  $C^i$ 为沉积物重金属质量分数实测值;  $C_n^i$ 为参考值, 本次研究采用 20 世纪 90 年代前中国陆架海洋沉积物中重金属丰度值, Cr、Cu、Zn、Ni、As、Cd、Pb、Hg 的评价参考值分别为 61  $\mu\text{g/g}$ 、15  $\mu\text{g/g}$ 、65  $\mu\text{g/g}$ 、24  $\mu\text{g/g}$ 、7.7  $\mu\text{g/g}$ 、0.065  $\mu\text{g/g}$ 、20  $\mu\text{g/g}$ 、0.025  $\mu\text{g/g}$ (下同)<sup>[16]</sup>;  $RI$ 为多种重金属潜在危害指数。

### 2.3.2 地累积指数

地累积指数不仅考虑了自然过程中不同重金属元素的自然分布过程, 而且充分考虑了人类活动对重金属元素的影响, 是区分人类活动影响的重要参数, 亦广泛应用于沉积物环境质量评价中<sup>[17]</sup>, 公式如下<sup>[18]</sup>:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k \cdot B_n)], \quad (4)$$

式中,  $C_n$ 是第  $n$  种重金属元素的实测质量浓度;  $B_n$ 是该元素的地球化学背景值, 本次研究采用 20 世纪 90 年代前中国陆架海洋沉积物中重金属丰度值<sup>[11, 16]</sup>;

$k$ 为系数, 与岩石差异而引起的背景值变动有关<sup>[11]</sup>, 通常取 1.5。

### 2.3.3 富集因子

富集因子是用于定量评价沉积物重金属污染程度与污染来源的重要指标<sup>[19]</sup>, 计算公式见式(5)<sup>[20]</sup>:

$$EF = (Me/Al_2O_3)_{\text{样品}} / (Me/Al_2O_3)_{\text{背景}}, \quad (5)$$

式中,  $Me$ 为重金属元素,  $Al_2O_3$ 为标准化元素, 本次研究采用 20 世纪 90 年代前中国陆架海洋沉积物中重金属丰度值<sup>[21]</sup>。

### 2.3.4 毒性效应预测

重金属元素与生物大分子作用, 可以改变生物大分子的正常生理和代谢功能, 导致生物体中毒甚至死亡, 沉积物中重金属毒性效应预测具有重要的现实意义<sup>[22]</sup>。目前, 一致性沉积物质量标准因其高准确性、强普适性已经成为沉积物毒性效应预测的重要评价指标之一<sup>[23]</sup>。海洋沉积物中一致性沉积物质量基准见表 1。其中, 沉积物中重金属含量低于毒性阈值下限时, 毒性发生的概率通常低于 25%; 重金属含量高于毒性阈值上限时, 毒性发生的概率通常高于 75%, 需要引起极大的重视<sup>[23]</sup>。

## 3 结果

### 3.1 重金属元素空间分布特征

对渤海沉积物中重金属元素含量及其空间分布特征进行了统计分析(表 2)。结果显示, Zn 含量最高, 平均含量 66.15  $\mu\text{g/g}$ , Hg 含量最低, 平均含量 0.04  $\mu\text{g/g}$ 。Cd、As、Cu、Pb、Ni、Cr 含量与 Zn 的平均含量分别

表 1 海洋沉积物重金属毒性预测标准<sup>[24]</sup>

Tab. 1 Toxicity prediction standard of heavy metals in the ocean surface sediments<sup>[24]</sup>

| 毒性阈值                                  | Ni   | Cr    | Cd   | Hg   | As   | Cu    | Pb    | Zn    |
|---------------------------------------|------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|
| 下限/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 23.2 | 78.3  | 1.04 | 0.18 | 16.1 | 38.2  | 53.0  | 153.5 |
| 上限/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 58.3 | 268.5 | 5.76 | 0.66 | 54.3 | 214.6 | 296.0 | 396.2 |

表 2 渤海底质沉积物重金属元素含量与空间分布统计特征

Tab. 2 The statistical characteristics of heavy metals and spatial distributions of surface sediments from the Bohai Sea

| 统计项目                                    | Cd    | Hg     | As    | Cu    | Pb    | Ni    | Cr    | Zn     |
|---|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 平均值/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  | 0.20  | 0.04   | 9.18  | 19.99 | 24.03 | 25.42 | 57.95 | 66.15  |
| 5%值/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$  | 0.08  | 0.01   | 5.21  | 5.78  | 14.61 | 9.15  | 25.64 | 28.78  |
| 95%值/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ | 0.37  | 0.08   | 14.27 | 34.54 | 32.95 | 40.20 | 83.24 | 105.31 |
| 相对变幅                                    | 2.30  | 3.25   | 1.44  | 1.84  | 1.20  | 1.78  | 1.81  | 1.87   |
| 相对标准偏差                                  | 0.020 | 0.026  | 0.015 | 0.023 | 0.011 | 0.019 | 0.016 | 0.019  |
| 相对变异系数                                  | 2.050 | 13.795 | 0.034 | 0.023 | 0.009 | 0.015 | 0.005 | 0.006  |

为 0.20  $\mu\text{g/g}$ 、9.18  $\mu\text{g/g}$ 、19.99  $\mu\text{g/g}$ 、24.03  $\mu\text{g/g}$ 、25.42  $\mu\text{g/g}$ 、57.95  $\mu\text{g/g}$ 。Hg 在不同站位之间差别较大,相对变幅为 3.25,相对标准差为 0.026,相对变异系数 13.795。Pb 元素不同站的差异最小,相对变幅为 1.20,相对标准

准偏差为 0.011,相对变异系数为 0.009。

渤海沉积物中重金属元素分布特征(图 2)表明,重金属元素整体上具有相似的分布特征。重金属元素在渤海泥质区、渤海湾、莱州湾、辽东湾北部及东

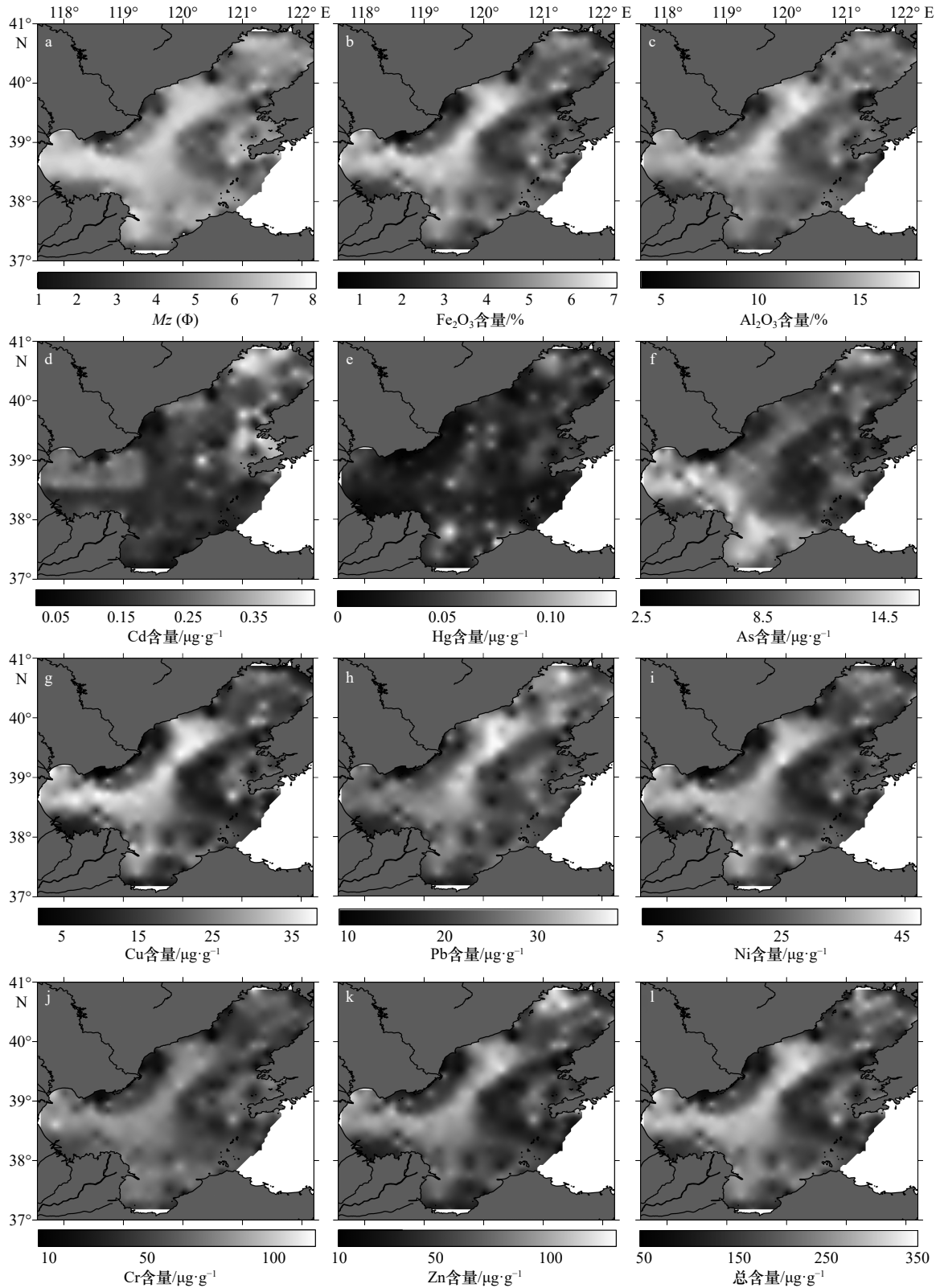


图 2 渤海表层沉积物中粒度、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、重金属元素含量空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of concentrations of mean grain size,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

南部含量较高,而在秦皇岛-曹妃甸、辽东湾潮流沙脊、渤海海峡等处含量较低。渤海湾总重金属元素平均含量为 257.50  $\mu\text{g/g}$ ,较中央盆地、莱州湾、辽东湾整体偏高(表 3),仅在东南部靠近黄河三角洲地区含量较低(图 2)。其中,渤海湾 Hg 含量偏低,平均值仅为 0.03  $\mu\text{g/g}$ ,其余重金属元素在渤海海域均属最高。渤海中央海盆总重金属元素平均含量为 211.07  $\mu\text{g/g}$ ,仅次于渤海湾,但 Cd、Pb 含量则低于辽东湾。莱州湾总重金属元素平均含量为 196.38  $\mu\text{g/g}$ ,Hg 含量在整个渤海最高,达到 0.05  $\mu\text{g/g}$ ,As 含量也较中央盆地高。辽东湾总重金属元素平均含量为 193.02  $\mu\text{g/g}$ ,Cd、Hg、As 含量也较高。渤海海峡、辽东浅滩总重金属元素平均含量分别为 158.76  $\mu\text{g/g}$  和 174.99  $\mu\text{g/g}$ 。相对而言,渤海海峡更加富集 As,而辽东浅滩更加富集 Cr 和 Zn。

### 3.2 重金属元素相关性分析

渤海表层沉积物中粒度、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、重金属元

素含量空间分布(图 2)具有明显的一致性,对相关组分进行了相关性分析(表 4)。结果表明,平均粒径、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、重金属元素含量呈显著相关,并且重金属元素与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的相关性较与平均粒径、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  的相关性更高。Cr、Zn、Ni、Cu 与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  均呈极强相关,Pb、As 与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  呈强相关,Hg 与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  则显示中等程度相关,Cd 与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  呈弱相关。重金属元素之间也仅有 Cd 元素与其他元素呈中等程度弱相关,其余大部分多为强-极强相关。

### 3.3 重金属潜在生态风险

渤海表层沉积物中单因子重金属元素潜在生态风险指数(表 5)由高到低分别为 Cd、Hg、As、Cu、Pb、Ni、Cr、Zn。其中,Cd 的潜在风险指数平均值为 92.53,达到强潜在生态风险等级,Hg 的潜在风险指数平均值为 61.39,属中等潜在生态风险等级,其余重金属元素皆为轻微潜在生态风险等级(表 5,图 3)。

表 3 渤海不同地貌单元沉积物重金属元素平均含量

Tab. 3 Mean concentrations of heavy metals in the surface sediments from different geomorphic units in the Bohai Sea

| 地貌单元 | Cd含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Hg含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | As含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Cu含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Pb含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Ni含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Cr含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | Zn含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ | 总和     |
|------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------|
| 渤海湾  | 0.25                                  | 0.03                                  | 11.81                                 | 28.02                                 | 24.34                                 | 33.00                                 | 72.36                                 | 87.63                                 | 257.50 |
| 辽东湾  | 0.23                                  | 0.04                                  | 8.13                                  | 18.49                                 | 24.86                                 | 23.45                                 | 53.04                                 | 64.74                                 | 193.02 |
| 莱州湾  | 0.13                                  | 0.05                                  | 11.47                                 | 18.59                                 | 20.74                                 | 26.72                                 | 61.44                                 | 57.20                                 | 196.38 |
| 中央盆地 | 0.17                                  | 0.04                                  | 9.70                                  | 21.14                                 | 24.00                                 | 27.07                                 | 62.08                                 | 66.83                                 | 211.07 |
| 渤海海峡 | 0.14                                  | 0.03                                  | 7.72                                  | 14.28                                 | 22.01                                 | 18.89                                 | 46.88                                 | 48.80                                 | 158.76 |
| 辽东浅滩 | 0.24                                  | 0.04                                  | 7.47                                  | 15.69                                 | 22.82                                 | 19.94                                 | 53.95                                 | 54.80                                 | 174.99 |

表 4 渤海沉积物中重金属相关组分相关关系 ( $p<0.05$ ,  $n=404$ )

Tab. 4 Correlations of heavy metals related components in the surface sediments from the Bohai Sea ( $p<0.05$ ,  $n=404$ )

|                         | Mz   | $\text{Al}_2\text{O}_3$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | Cr   | Zn   | Ni   | Cu   | Cd   | Pb   | As   | Hg   |
|-------------------------|------|-------------------------|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Mz                      | 1.00 |                         |                         |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 0.81 | 1.00                    |                         |      |      |      |      |      |      |      |      |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0.91 | 0.89                    | 1.00                    |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Cr                      | 0.88 | 0.78                    | 0.92                    | 1.00 |      |      |      |      |      |      |      |
| Zn                      | 0.87 | 0.86                    | 0.93                    | 0.86 | 1.00 |      |      |      |      |      |      |
| Ni                      | 0.92 | 0.86                    | 0.97                    | 0.92 | 0.93 | 1.00 |      |      |      |      |      |
| Cu                      | 0.90 | 0.87                    | 0.97                    | 0.88 | 0.93 | 0.96 | 1.00 |      |      |      |      |
| Cd                      | 0.36 | 0.28                    | 0.30                    | 0.44 | 0.37 | 0.31 | 0.29 | 1.00 |      |      |      |
| Pb                      | 0.72 | 0.78                    | 0.79                    | 0.65 | 0.82 | 0.77 | 0.79 | 0.23 | 1.00 |      |      |
| As                      | 0.62 | 0.59                    | 0.72                    | 0.64 | 0.67 | 0.72 | 0.72 | 0.18 | 0.52 | 1.00 |      |
| Hg                      | 0.49 | 0.43                    | 0.45                    | 0.45 | 0.55 | 0.48 | 0.43 | 0.48 | 0.54 | 0.25 | 1.00 |

表5 渤海表层沉积物中重金属潜在生态风险指数

Tab. 5 Potential ecological risk indexes of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

| 指数  | $E_i^r$ |        |       |       |      |       |      |      | $RI$   |
|-----|---------|--------|-------|-------|------|-------|------|------|--------|
|     | Cd      | Hg     | As    | Cu    | Pb   | Ni    | Cr   | Zn   |        |
| 最小值 | 8.31    | 2.72   | 3.57  | 0.74  | 2.23 | 0.60  | 0.18 | 0.09 | 37.30  |
| 最大值 | 219.23  | 211.28 | 20.75 | 12.98 | 9.42 | 10.05 | 3.63 | 1.99 | 402.18 |
| 平均值 | 92.53   | 61.39  | 11.92 | 6.66  | 6.01 | 5.30  | 1.90 | 1.02 | 186.01 |

渤海表层沉积物中绝大部分站位的Cd具有等于或超过中等程度的重金属潜在生态风险,仅在六股河口南侧、滦河口北侧、曹妃甸北侧、莱州湾东南等少数地区属轻微等级的重金属潜在生态风险(图3a)。其中,有55%的站位Cd元素具有强的重金属潜在生态风险,主要分布在辽东湾、渤海湾北部及东南部、莱州湾西北部(图3a),约6%站位的Cd重金属具有极强的重金属潜在生态风险,全部分布在辽东湾,主要分布于辽东湾西北部及东南部工业发达地区(图3a)。

渤海表层沉积物中大部分站位Hg具有等于或超过中等程度的重金属潜在生态风险,仅在六股河口南侧、秦皇岛-曹妃甸、渤海湾东南、莱州湾东南及渤海海峡等少数地区属轻微等级的重金属潜在生态风险(图3b)。其中,有23%站位的Hg具有强的重金属潜在生态风险,主要分布在辽东湾北部及东南部、渤海湾西部、莱州湾北部、渤海泥质区中北部(图3b),有7个站位的Hg具有极强的重金属潜在生态风险,全部分布在莱州湾,主要分布于辽东湾西北部及东北部

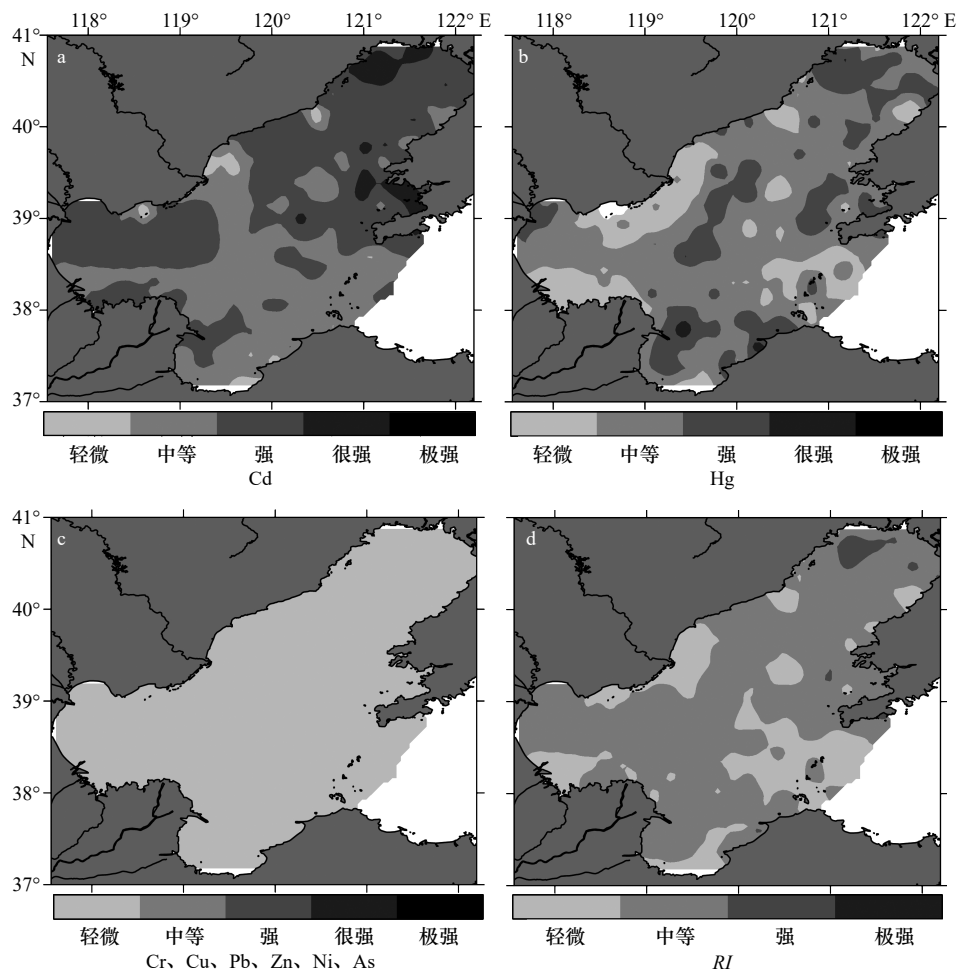


图3 渤海表层沉积物中重金属潜在生态风险指数分布

Fig. 3 Spatial distributions of potential ecological risk indexes of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

(图 3b)。整体上,渤海中 67% 站位的重金属元素存在中等程度的综合潜在生态风险,强综合潜在生态风险站位主要分布于辽东湾西北部,零星分布于辽东湾东北部及东南部、莱州湾东北部(图 3d), 占总站位的 4%。

### 3.4 重金属地累积指数评价

表 6 显示,渤海表层沉积物中重金属地累积指数由高到底为 Cd、Hg、Cu、Pb、As、Ni、Zn、Cr。其中, Cd 元素  $I_{geo}$  平均值为 0.91, 属 1 级的无-中等程度污染, 接近中等程度污染。其余重金属元素  $I_{geo}$  平均值全部小于 0, 属无污染程度。

渤海表层沉积物重金属地累积指数分布(图 4)显示, 绝大部分站位 Cd 的地累积指数均属 1 级及以上, 属无-中污染程度(图 4a)。其中, 43% 站位 Cd 的地累积指数属 2 级及以上, 属中等程度污染, 主要分布在辽东湾、渤海湾北部、黄河三角洲地区(图 4a); 约 4% 站位 Cd 的地累积指数属 3 级及以上, 属中-强程

度污染, 主要分布在辽东湾西北部, 辽东湾东南部亦有 1 个站位分布(图 4a)。约 43% 站位 Hg 的地累积指数均属 1 级及以上, 属无-中污染程度(图 4b), 主要分布在辽东湾、渤海湾西部及莱州湾北部。其中, 约 6% 站位 Hg 的地累积指数均属 2 级及以上, 属中等污染程度(图 4b), 主要分布在辽东湾西北部、莱州湾北部地区。Cr、Cu、Pb、Zn、Ni 和 As 所有站位的地累积指数均属 0 级或 1 级。以 As 为例, 仅有 21.5% 站位为无-中等程度污染(图 4c), 属 1 级, 其余站位全部为无污染的 0 级。

### 3.5 重金属元素主成分分析

主成分分析表明(表 7), PC1 方差贡献达 65.5%, PC2 方差贡献 13.2%, PC3 方差贡献 8.2%, 以上三者累积方差贡献达 87.0%。其中, PC1 中 Zn、Ni、Cu、Cr 所占载荷最高, 均超过 0.9, Pb 也达到了 0.82, As 为 0.70, 仅 Hg 和 Cd 较低, 分别为 0.56 和 0.42。PC2

表 6 渤海表层沉积物重金属地累积指数 ( $I_{geo}$ )

Tab. 6 Geoaccumulation indexes ( $I_{geo}$ ) of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

|     | Cd    | Hg    | Cu    | Pb    | As    | Ni    | Zn    | Cr    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 最小值 | -2.44 | -4.46 | -3.34 | -1.75 | -2.07 | -3.64 | -4.01 | -4.03 |
| 最大值 | 2.28  | 1.82  | 0.79  | 0.33  | 0.47  | 0.42  | 0.41  | 0.27  |
| 平均值 | 0.91  | -0.18 | -0.35 | -0.36 | -0.40 | -0.64 | -0.68 | -0.76 |

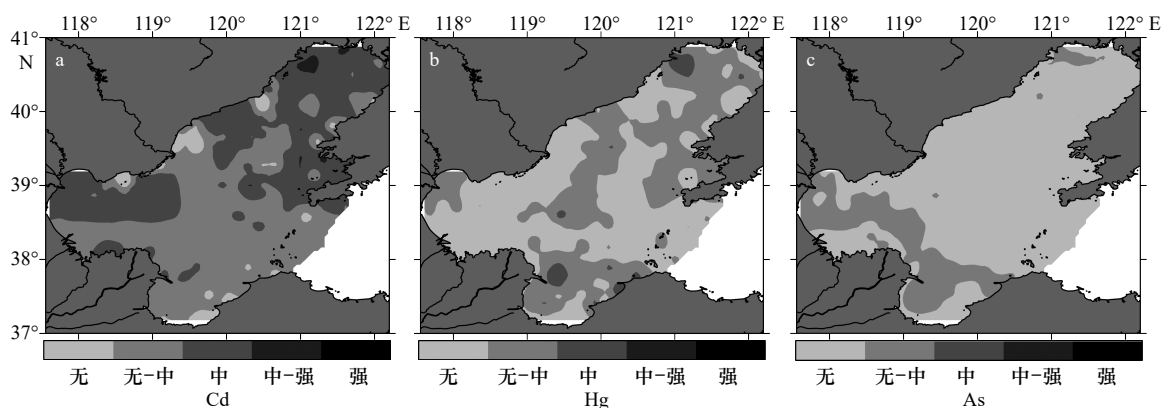


图 4 渤海表层沉积物中重金属地累积指数( $I_{geo}$ )分布

Fig. 4 Spatial distributions of geoaccumulation indexes ( $I_{geo}$ ) of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

表 7 渤海表层沉积物中重金属元素主成分分析

Tab. 7 The principal component analysis of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

| 主成分 | Zn    | Ni    | Cu    | Cr    | Pb   | As    | Hg   | Cd    | 特征值  | 方差贡献 |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|------|
| PC1 | 0.96  | 0.96  | 0.96  | 0.91  | 0.82 | 0.70  | 0.56 | 0.42  | 5.24 | 65.5 |
| PC2 | 0.00  | -0.16 | -0.15 | -0.05 | 0.04 | -0.41 | 0.49 | 0.77  | 1.06 | 13.2 |
| PC3 | -0.04 | -0.06 | -0.09 | -0.18 | 0.17 | 0.04  | 0.63 | -0.43 | 0.65 | 8.2  |

中 Cd 元素的载荷最高,为 0.77, Hg 元素次之,为 0.49, As 载荷为-0.41。PC3 中 Hg 元素载荷最高,为 0.63, Cd 元素载荷次之,为-0.43。

PC1 载荷空间分布与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  一致性较高,均分布于沉积物粒度较细的渤海湾、辽东湾西北部与东部、渤海泥质区及莱州湾湾口区域(图 5a)。PC2 高载荷主要分布于辽东湾的西北部及东南部的复州湾地区,在渤海盆地、渤海湾等地也有零星的分布,呈现明显的北部高、南部低的特征(图 5b)。PC3 高载荷主要分布于莱州湾地区,在渤海湾有一个明显的低载荷集中分布区(图 5c)。

## 4 讨论

### 4.1 生物毒性效应

按照一致性沉积物标准<sup>[23]</sup>对渤海表层沉积物生物毒性效应进行了划分(图 6)。结果表明,全部沉积物均低于毒性阈值的上限,说明渤海存在生物中毒的可能性不高。进一步的分析发现, Cu、Pb、Zn、Cd、

As、Hg 在所有站位的含量均低于毒性阈值的下限,出现生物中毒的可能性较低, Cr 则在渤海泥质区存在高于毒性阈值下限的现象,主要来源于天津地区,少量来自锦州湾。Ni 元素在出现高于毒性阈值下限的站位更多,超过了 50%,主要来自渤海湾、黄河、锦州湾及复州湾地区,需要引起重视。

### 4.2 人类活动影响与重金属源解析

渤海表层沉积物富集因子分布显示(图 7), Zn 的富集程度最低,全部站位均属无富集状态。Cr、Ni、Cu、Pb 次之,属无富集-轻微富集状态。Hg、As 的少数站位属中等程度富集,表明可能受到人类活动影响。As 的个别站位为高度富集,明显受到人类活动影响。Cd 的富集程度最高,可能受到较多的人类活动影响,在辽东湾西北部的锦州湾和东南部的复州湾则明显受到人类活动的影响。

Zn、Cr、Cu、Ni 和 Pb 等富集程度低,表明受人类活动影响的可能性较低,这 5 种元素又是构成 PC1 组分的主要元素,表明 PC1 组分受人类活动影响的可能

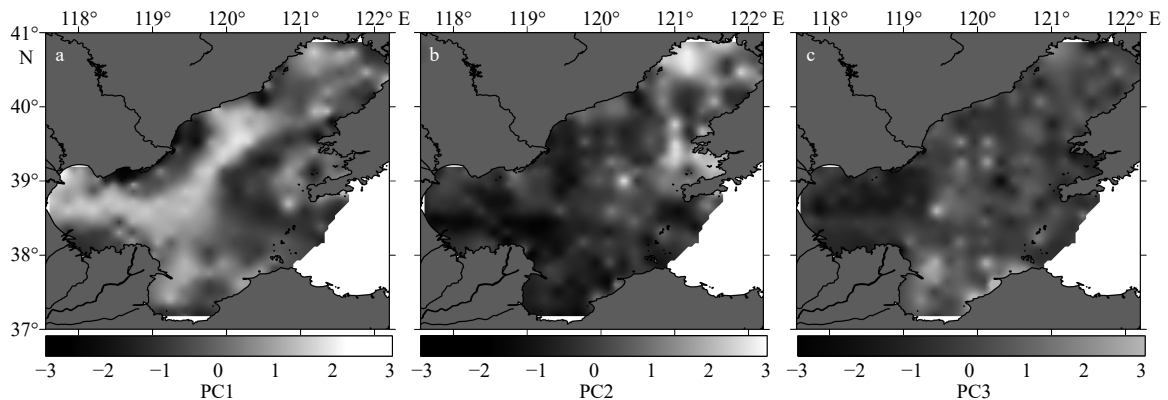


图 5 沉积物重金属主成分分析中各成分载荷分布

Fig. 5 Spatial distributions of components from the principal component analysis of the heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

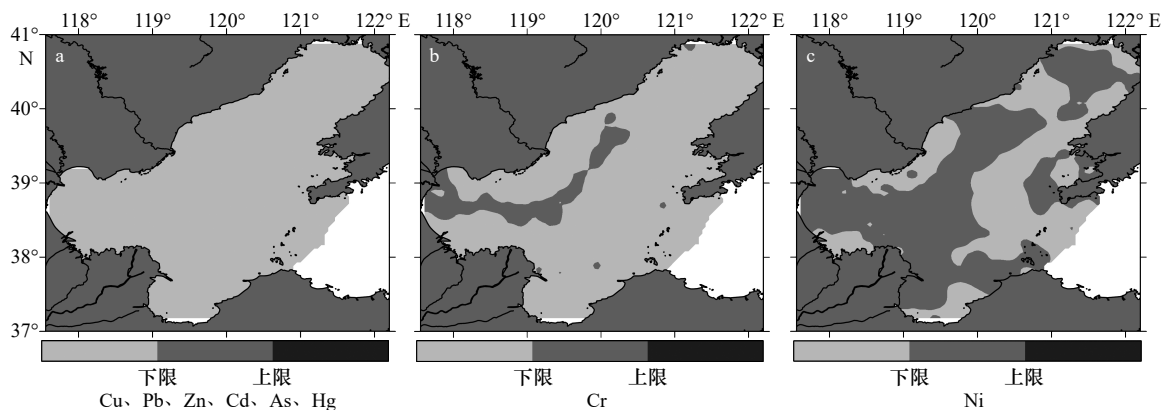


图 6 生物毒性效应预测

Fig. 6 Toxicity prediction of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

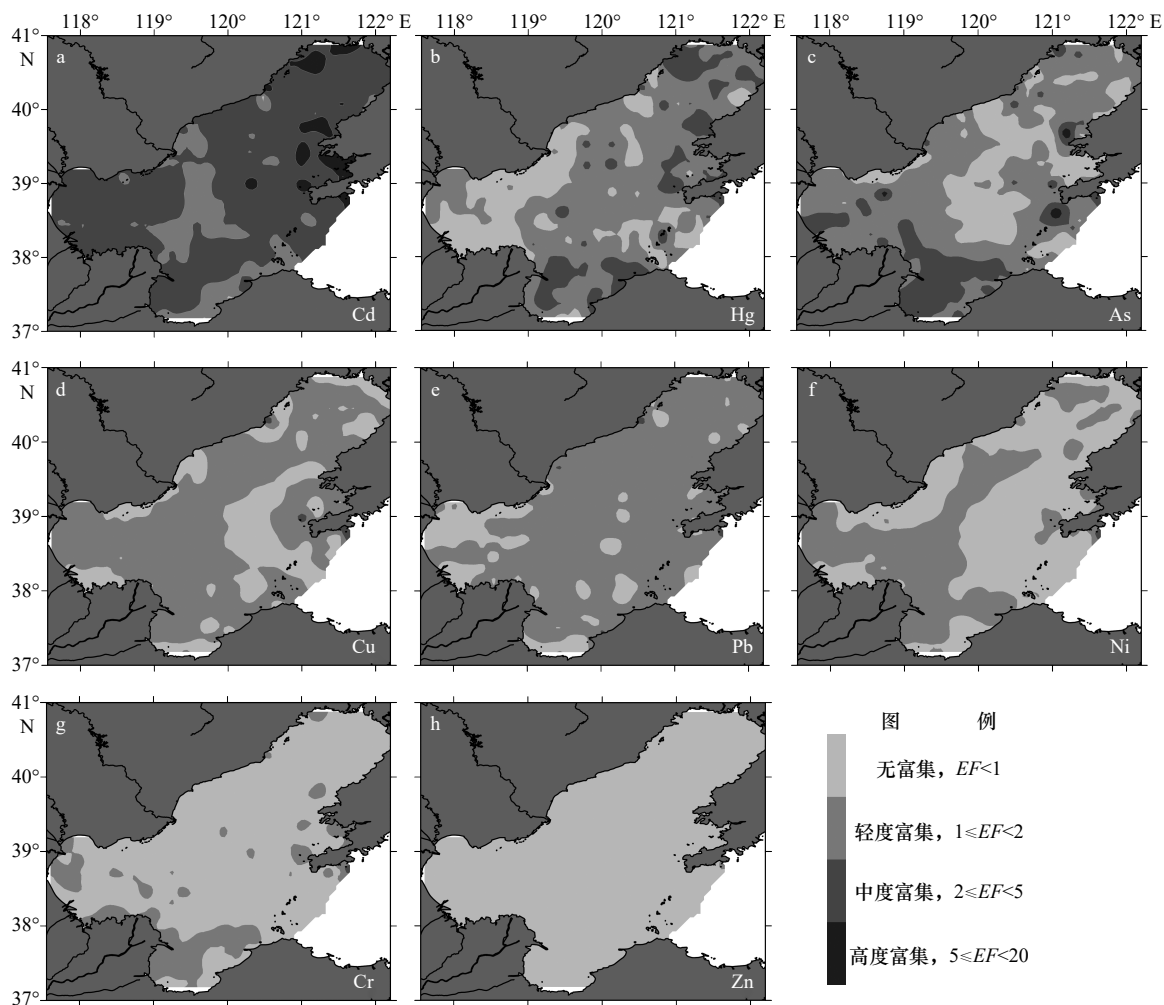


图 7 渤海表层沉积物中重金属富集因子(EF)分布

Fig. 7 Spatial distributions of enrichment factors of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

性应当也较低。另外,PC1 空间分布显示与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的空间分布具有较高的一致性,而后的空间分布主要受粒度效应控制。因此,PC1 组分受人类活动影响的可能性较低,而是受自然沉积过程中的粒度效应影响,该组分在主成分分析中的方差贡献高达 65.5%,是渤海沉积物中重金属元素的控制性组分<sup>[5]</sup>。

Cd 在 PC2 组分中载荷最高,且在该元素受人类活动影响最为显著,PC2 载荷中分布较高 Hg 和 Cd 同样受到一定程度的人类活动的影响,表明 PC2 组分主要受人类活动的影响。另外,PC2 高载荷主要分布于辽东湾西北部的锦州湾和东南部的复州湾等近代重工业发达地区,推测 PC2 主要与人类活动产生的污染有关<sup>[8,11]</sup>。

PC3 组分主要与 Hg 和 Cd 均有关,而 Hg 和 Cd 则是受人类活动影响最为强烈的两种金属元素。另外,PC3 高载荷主要分布于沉积速率较高的莱州湾湾口地区,推测可能与河流输送的污染有关<sup>[12]</sup>。

### 4.3 重金属元素评价指标

不同指标评价下的沉积物重金属元素通常即具有一致性又有所区别。通常同一种元素在不同的指标体系中均显示相同的较高或较低的趋势,但是受具体评价体系的影响,可能会导致具体站位在不同评价体系中显示不同的评价价值。以 Cd 元素为例,该元素在重金属潜在生态风险评价(图 3a)、地累积指数(图 4a)和富集因子(图 7a)评价中均属污染程度最高的一种元素,但是在重金属潜在生态风险评价中有 55% 的站位具有强的重金属潜在生态风险,6% 站位的具有极强的重金属潜在生态风险,而在地累积指数评价中仅有 43% 站位属中等程度污染,约 4% 站位属中-强程度污染,两者均明显低于重金属潜在生态风险评价。因此,在具体的重金属环境评价过程中,应当注意相同评价指标的对比。

## 5 结论

(1) 渤海表层沉积物中重金属 Cd、Hg、As、Cu、

Pb、Ni、Cr 和 Zn 的平均含量分别为 0.20、0.04、9.18、19.99、24.03、25.42、57.95、66.15  $\mu\text{g/g}$ , 从高到低分别为: 渤海湾、中央盆地、莱州湾、辽东湾、渤海海峡, 重金属含量最高的地区位于辽东湾西北部。

(2)潜在生态风险评价表明, Cd 多处于强潜在生态风险状态, Hg 为中等-强潜在生态风险, 其余元素潜在生态风险较低, 总潜在生态风险为中等程度, 仅辽东湾西北部为强潜在生态风险。地累积指数表明, Cd 的  $I_{\text{geo}}$  平均值为 0.91, 属 1 级的无-中等程度污染, 接近中等程度污染, 其余重金属元素  $I_{\text{geo}}$  平均值全部

小于 0, 属无污染程度。

(3)一致性沉积物质量基准表明, 仅 Cr 和 Ni 的含量超过毒性效应阈值下限, 且未超过阈值上限, 需要引起一定程度的重视, 主要毒性来源于渤海湾、锦州湾及复州湾等地, 其余重金属元素含量均小于毒性效应阈值下限, 生物中毒的可能性较低。

(4)富集因子、主成分分析表明, 沉积物中由粒度效应所决定的重金属元素含量是渤海表层沉积物重金属含量的控制性因素, 人类活动污染占次要因素, 河流输运对黄河三角洲及莱州湾影响较大。

### 参考文献:

- [1] 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室. 渤海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1985: 1-265.  
Department of Marine Geology, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences. Geology of the Bohai Sea[M]. Beijing: Science Press, 1985: 1-265.
- [2] 石学法. 中国近海海洋——海洋底质[M]. 北京: 海洋出版社, 2014: 1-561.  
Shi Xuefa. Seas Adjacent to China: Seabed[M]. Beijing: China Ocean Press, 2014: 1-561.
- [3] 刘振夏, 夏东兴. 潮流脊的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 1983, 14(3): 286-296.  
Liu Zhenxia, Xia Dongxing. A preliminary study of tidal current ridges[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1983, 14(3): 286-296.
- [4] 乔淑卿, 石学法, 王国庆, 等. 渤海底质沉积物粒度特征及输运趋势探讨[J]. 海洋学报, 2010, 32(4): 139-147.  
Qiao Shuqing, Shi Xuefa, Wang Guoqing, et al. Discussion on grain-size characteristics of seafloor sediment and transport pattern in the Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(4): 139-147.
- [5] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 中国东部近海沉积物地球化学: 分布特征、控制因素与古气候记录[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(5): 885-894.  
Shi Xuefa, Liu Shengfa, Qiao Shuqing, et al. Geochemical characteristics, controlling factor and record of paleoclimate in sediments from eastern China seas[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2015, 34(5): 885-894.
- [6] 赵一阳. 中国海大陆架沉积物地球化学的若干模式[J]. 地质科学, 1983(4): 307-314.  
Zhao Yiyang. Some geochemical patterns of shelf sediments of the China Seas[J]. Scientia Geologica Sinica, 1983(4): 307-314.
- [7] 毛天宇, 戴明新, 彭士涛, 等. 近10年渤海湾重金属(Cu, Zn, Pb, Cd, Hg)污染时空变化趋势分析[J]. 天津大学学报, 2009, 42(9): 817-825.  
Mao Tianyu, Dai Mingxin, Peng Shitao, et al. Temporal-spatial variation trend analysis of heavy metals (Cu, Zn, Pb, Cd, Hg) in Bohai Bay in 10 years[J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(9): 817-825.
- [8] 周秀艳, 李宇斌, 王恩德, 等. 辽东湾湿地重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 环境科学与技术, 2004, 27(5): 60-62.  
Zhou Xiuyan, Li Yubin, Wang En'de, et al. Heavy metals pollution and relevant ecological risk evaluation in wetlands of Liaodong Gulf area[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 27(5): 60-62.
- [9] 吴景阳, 李云飞. 渤海湾沉积物中若干重金属的环境地球化学——I. 沉积物中重金属的分布模式及其背景值[J]. 海洋与湖沼, 1985, 16(2): 92-101.  
Wu Jingyang, Li Yunfei. Environment geochemistry of some heavy metals in the sediments of Bohai Bay: I. the distribution pattern of heavy metals in the sediments and their background values[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1985, 16(2): 92-101.
- [10] 张经, 刘敏光, 陈长景, 等. 渤海湾沉积物中若干重金属的存在形式[J]. 海洋学报, 1987, 9(4): 520-524.  
Zhang Jing, Liu Mingguang, Chen Changjing, et al. The existing form of some heavy metals in sediments of Bohai Bay[J]. Haiyang Xuebao, 1987, 9(4): 520-524.
- [11] 蓝先洪, 孟祥君, 梅西, 等. 辽东湾表层沉积物的重金属污染特征与质量评价[J]. 海洋学报, 2018, 40(6): 60-73.  
Lan Xianhong, Meng Xiangjun, Mei Xi, et al. Pollution characteristics and quality assessment of heavy metals in surface sediments from the Liaodong Bay[J]. Haiyang Xuebao, 2018, 40(6): 60-73.
- [12] 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[J]. 生态环境学报, 2010, 19(2): 262-269.  
Luo Xianxiang, Zhang Rui, Yang Jianqiang, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in surface sediment in Laizhou Bay[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(2): 262-269.
- [13] Folk R L, Ward W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3-26.
- [14] 郭平, 谢忠雷, 李军, 等. 长春市土壤重金属污染特征及其潜在生态风险评价[J]. 地理科学, 2005, 25(1): 108-112.  
Guo Ping, Xie Zhonglei, Li Jun, et al. Specificity of heavy metal pollution and the ecological hazard in urban soils of Changchun City[J].

- Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(1): 108–112.
- [15] Håkanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control[J]. *Water Research*, 1980, 14(8): 975–1001.
- [16] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1–203.  
Zhao Yiyang, Yan Mingcai. *Geochemistry of Sediments of the China Shelf Sea*[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1–203.
- [17] 滕彦国, 虞先国, 倪师军, 等. 应用地质累积指数评价沉积物中重金属污染: 选择地球化学背景的影响[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(2): 7–9.  
Teng Yanguo, Tuo Xianguo, Ni Shijun, et al. Applying geoaccumulation index to assess heavy metal pollution in sediment: Influence of different geochemical background[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(2): 7–9.
- [18] Muller, G. Heavy-metals in sediment of the rhine-changes since 1971[J]. *Umschau in Wissenschaft und Technik*, 1979, 79(24): 778–783.
- [19] 张秀芝, 鲍征宇, 唐俊红. 富集因子在环境地球化学重金属污染评价中的应用[J]. *地质科技情报*, 2006, 25(1): 65–72.  
Zhang Xiuzhi, Bao Zhengyu, Tang Junhong. Application of the enrichment factor in evaluating of heavy metals contamination in the environmental geochemistry[J]. *Geological Science and Technology Information*, 2006, 25(1): 65–72.
- [20] 夏鹏, 孟宪伟, 丰爱平, 等. 沉积物中重金属区域环境背景的构建——以广西潮间带为例[J]. *海洋通报*, 2012, 31(5): 539–546.  
Xia Peng, Meng Xianwei, Feng Aiping, et al. Regional background levels of heavy metals in marine sediments: a case study on the intertidal zone of Guangxi Province[J]. *Marine Science Bulletin*, 2012, 31(5): 539–546.
- [21] 赵一阳, 鄢明才. 中国浅海沉积物化学元素丰度[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(10): 1084–1090.  
Zhao Yiyang, Yan Mingcai. Mineral element abundance of sediments of the China Shelf Seas[J]. *Science in China (Series B)*, 1993, 23(10): 1084–1090.
- [22] Howari F M, Banat K M. Assessment of Fe, Zn, Cd, Hg, and Pb in the Jordan and Yarmouk river sediments in relation to their physico-chemical properties and sequential extraction characterization[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2001, 132(1/2): 43–59.
- [23] 范文宏, 陈静生, 洪松, 等. 沉积物中重金属生物毒性评价的研究进展[J]. *环境科学与技术*, 2002, 25(1): 36–39.  
Fan Wenhong, Chen Jingsheng, Hong Song, et al. Recent development in bio-toxicological assessment of heavy metal in aquatic sediments[J]. *Environmental Science and Technology*, 2002, 25(1): 36–39.
- [24] Apitz S E, Barbanti A, Bernstein A G, et al. The assessment of sediment screening risk in Venice Lagoon and other coastal areas using international sediment quality guidelines[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2007, 7(5): 326–341.

## Environmental quality assessment and influence factor of heavy metals in the surface sediments from the Bohai Sea

Zhu Aimei<sup>1,2</sup>, Zhang Hui<sup>1,2</sup>, Cui Jingjing<sup>1,2</sup>, Hu Ningjing<sup>1,2,3</sup>, Liu Jihua<sup>1,2,3</sup>

(1. First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Qingdao 266061, China; 2. Key Laboratory of State Oceanic Administration for Marine Sedimentology and Environmental Geology, Ministry Natural Resources, Qingdao 266061, China; 3. Laboratory for Marine Geology, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Based on the concentrations and spatial distributions of heavy metals in 404 surface sediments from the Bohai Sea, we evaluated the marine sediment environmental quality indexes, such as heavy metal potential ecological risk, geoaccumulation index. Moreover, the factors that impact on the concentrations of heavy metals in surface sediments were also analyzed. The results showed that the mean concentrations of all eight heavy metals were highest in the Bohai Bay, and were lowest in the Bohai Strait. The potential ecological risks of Cd and Hg elements were high and moderate-high, respectively. The assessment of total potential ecological risk revealed Bohai Sea belongs to moderate potential ecological risk. Only few stations of Cr and Ni exceed the upper limit of toxic threshold, and the others are less than the lower limit of toxic threshold. This implies the occurrence probability of toxic pollution is low. The concentrations and spatial distributions of heavy metals were mainly dominated by grain size effect of surface sediments from the Bohai Sea. However, Cd element which was rich in the Jinzhou Bay and Fuzhou Bay of Liaodong Bay was mainly contributed by human activities. Hg element, supplied by Yellow River possible impacted by human activities, was rich in the Yellow River Delta and Laizhou Bay.

**Key words:** Bohai Sea; surface sediment; heavy metals; environmental quality assessment; influence factor