

渤海湾沉积物重金属的分布特征及影响因素

陈 秀¹, 李爽兆¹, 袁德奎^{1*}, 穆 迪², 李原仪¹

(1. 天津大学 力学系, 天津 300354; 2. 河北工业大学 海洋科学与工程学院, 天津 300130)

摘 要:2012-10-11 对渤海湾 18 个站位(含 4 个沉积物柱状样站位)的沉积物进行采样分析, 结果表明, 5 种主要的重金属(Cr, Cu, Zn, Cd, Pb)有相似的空间(水平方向)分布特征, 即渤海湾西北部和渤海湾中部的沉积物重金属质量分数较高。利用地质累积指数法评价沉积物重金属污染程度, 结果显示, Cd 受到轻度污染。采用相关性分析和主成分分析, 对污染物来源进行了探讨, 推测渤海湾西北部高质量分数重金属很可能与排污口的排放有关。根据沉积物粒度分布特征, 结合渤海湾的环流情况, 推测沉积物重金属分布受渤海湾水流及其所导致的粒度变化所影响, 进一步分析了放射性核素²¹⁰Pb 活度的空间分布, 在渤海湾西北部及中部的重金属高质量分数区域, ²¹⁰Pb 活度随埋藏深度呈现有规律的衰减且沉积速率较低, 证实该区域沉积环境较为稳定, 有利于携带重金属的悬浮物沉积。

关键词:渤海湾; 沉积物; 重金属; 粒径; 放射性同位素

中图分类号: P736

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2017)03-0382-10

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2017.03.008

渤海是中国的内海, 平均水深约 18 m, 海域面积约 7.8 万 km², 由中央盆地、渤海海峡、辽东湾、渤海湾和莱州湾组成。位于渤海西部的渤海湾水深相对较浅, 平均水深不足 10 m, 最大水深约 32 m。渤海湾三面环陆, 与河北、天津、山东的陆岸相邻, 是一个典型的半封闭海湾, 海水与外界的交流能力较弱、自净能力差。随着渤海湾沿岸区域经济社会的快速发展, 该海域面临着巨大的生态环境压力。

重金属是具有潜在危害的重要污染物, 难以降解, 能持久存在于环境中。更为重要的是, 重金属会随着食物链迁移和积累, 最终对人类健康构成威胁。因此, 重金属的影响受到了广泛的重视, 在此方面开展了大量的研究^[1-5]。泥沙是重金属迁移转化的重要载体。一方面, 泥沙颗粒可以吸附大量重金属, 在一定的水动力条件下沉积下来; 另一方面, 当水动力和物理化学等外部条件改变时, 吸附在泥沙颗粒上的重金属可随着泥沙迁移。所以沉积物是重金属的主要富集介质, 同时也是潜在的污染源。换一个角度看, 沉积物记录着重金属的来源、分布, 以及迁移和转化的历史^[6-8]。因此, 研究沉积物重金属的分布特征及影响因素对于认识生态环境的状况及变迁规律和机理有重要意义。

对于渤海湾沉积物重金属, 已有大量的研究成果, 但主要集中在港口及潮间带区域^[9-10], 对于渤海湾整个区域沉积物重金属研究缺乏, 尚不足以全面地反映出渤海沉积物中重金属分布特征, 对其机理的认识也有待深入。为此, 本文在基本覆盖整个渤海湾区域的 18 个站位采集了沉积物样品, 开展了重金属的分析测试, 综合其他研究者的测试数据, 并结合渤海湾余环流特征及²¹⁰Pb 活度的垂向分布, 对渤海湾沉积物重金属的分布规律及影响因素进行分析。

收稿日期: 2016-06-19

资助项目: 天津市自然科学基金重点项目——渤海叶绿素分布的年际变化特征及其水动力输运机理(16JCZDJC39400); 教育部新世纪优秀人才支持计划——近海水生态环境数据驱动模型及其在渤海湾的应用(NCET-12-0406)

作者简介: 陈 秀(1990-), 女, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事河口、海湾和河流水动力和水环境方面研究。E-mail: chenxiu@tju.edu.cn

* **通讯作者:** 袁德奎(1972-), 男, 四川遂宁人, 研究员, 博士, 主要从事河口、海湾和河流水动力和水环境问题数值模拟方面研究。

E-mail: dkyuan@tju.edu.cn

(陈 靖 编辑)

1 数据及方法

2012-10-11 两次采集了渤海湾 18 个站位的沉积物样品(图 1 中 A1~A6, D1~D6, E1~E6 站位)。其中 A2, A4, A5 和 A6 站位采集的是柱状沉积物样品(样品长度 20~30 cm 不等), 柱状样按 1 或 2cm 厚度进行切割分样, 其余 14 个站位采集的是表层沉积物样品。样品装入聚乙烯袋后立即低温冷藏并带回分析测试中心。经自然风干, 用瓷钵研磨, 过 100 目尼龙筛, 四分法缩分分取 10~20 g 制备好的样品, 放入样品袋。称取上述处理后的样品 0.1 g 在聚四氟乙烯坩埚中, 加入 HF-HNO₃-HClO₄ 溶解后使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)测定每份样品中 Cr, Cu, Zn, Cd 和 Pb 的质量分数。整个分析测定过程中加入标准工作溶液, 标准工作溶液由国家标准溶液在使用时根据不同元素测定的需要配制而成, 各元素的回收率为 90%~110%。进一步收集了徐亚岩等^[11]文献中的其他 8 个站位(图 1 中 F1~F8)沉积物中重金属数据, 以便综合比较分析。并采用 BT-9300ST 激光粒度分析仪对 A2, A4, A5 和 A6 四个站位的粒度进行测量, 其测量范围为 0.01~100 μm。

2007-07-24-26 用装有水洗聚乙烯衬垫的重力取芯器采集了渤海湾西部 5 个站位(图 1 中 B1~B5 站位)的沉积物柱状样(样品长度 40~100 cm 不等)。对沉积物样品进行切割分样, 间隔为 2 或 5 cm, 装入无菌取样袋后立即低温冷藏并带回分析测试中心, 样品经预处理后用银片水浴自镀, 取出银片, 用蒸馏水冲洗, 晾干。用刻度好的 α 多道能谱仪测量仪器本底、试剂空白样品以及待测样品的 α 谱, 从而计算出被测样品的²¹⁰Pb 活度。同时收集了前人文献中的 11 个站位的²¹⁰Pb 放射性活度数据: 柱状采集点 C1, C3, C4 为孟伟等 2006 年数据站位^[10]; BS1, BS2, BS5, BS10 为胡邦琦等 2011 年数据站位^[12]; C0710, C0711, C0707, C0712 为 Wang 等 2014 年数据站位^[13], 基本涵盖了渤海湾西北部及中部。

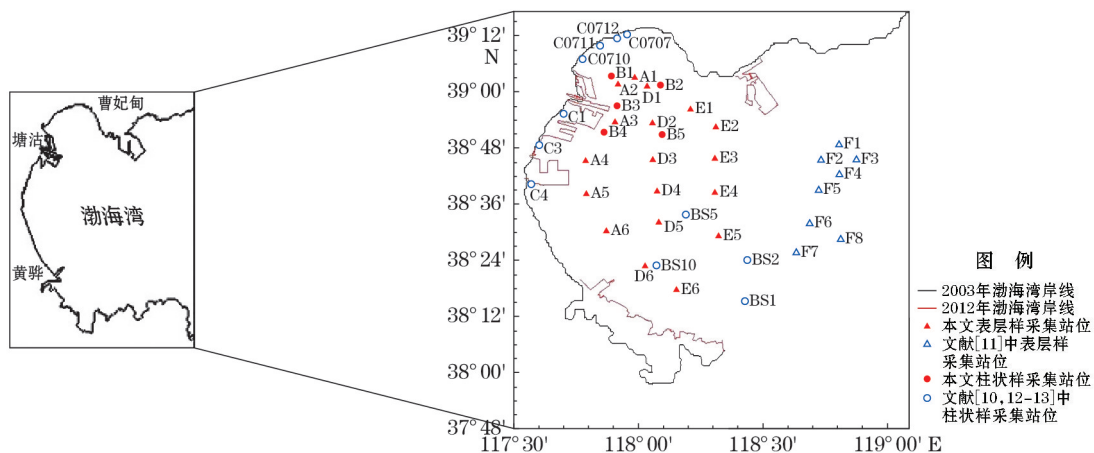


图 1 渤海湾采样站位分布图

Fig.1 Sampling locations in the Bohai Bay

2 结果与讨论

2.1 沉积物重金属的分布特征及污染评价

图 2 是渤海湾各站位沉积物 Cr, Cu, Zn, Cd, Pb 质量分数柱状图, 分别是依次从靠近渤海湾沿岸到渤海湾中部的 4 个断面(A, D, E, F 断面)。结果表明, 5 种重金属有相似的空间(水平方向)分布: 渤海湾西北部沿岸及渤海湾中部为高值区, 且各重金属质量分数随着距离排污口的增大而降低, 在到达中部时又达到高值。

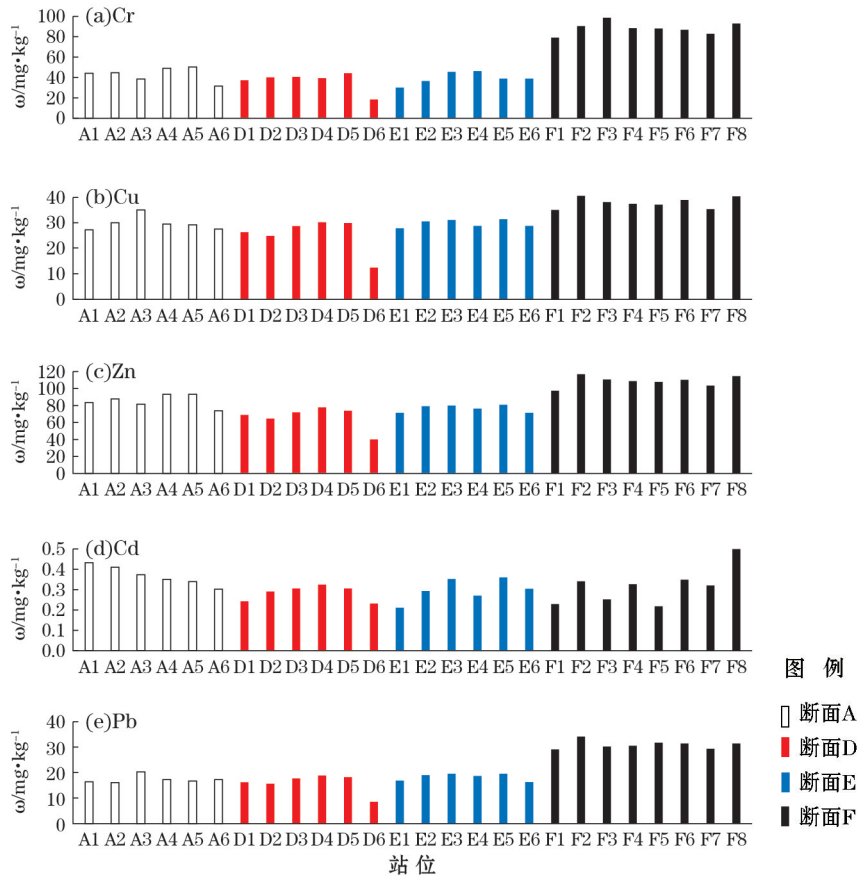


图 2 沉积物重金属空间(水平方向)分布

Fig.2 Spatially distributional patterns (horizontal) of heavy metals in sediments

图 3 是渤海湾潮间带 4 个站位沉积物重金属(Cr,Cu,Zn,Cd 和 Pb)质量分数的垂向变化曲线。从图中可以看出,各柱状样重金属含量随埋藏深度基本上呈波动分布。A2 站位柱状样 Cr,Cu 和 Pb 质量分数在垂向上具有相同的变化趋势,即 0~14 cm 含量较为稳定,15~20 cm 质量分数稍有波动。Cd 和 Zn 一直处于波动状态。A4 站位柱状样重金属的垂向分布表现为:各重金属在 0~5 cm 含量有降低的趋势,5~15 cm 处于波动状态,18~30 cm 除了在 22 cm 处各重金属突然增加,整体含量变化较为稳定,且该站位各重金属含量在表层出现最大值。A5 站位柱状样各重金属含量的垂向分布均呈波动分布,且各重金属含量比其他 3 个站位高。从 A6 站位柱状样重金属的垂向分布可以看出,除了 Cd 和 Pb 含量垂向变化总体相对平缓,其他 3 种重金属含量垂向分布也呈波动分布。

图 4 是渤海湾潮间带 4 个站位沉积物粒度的垂向变化曲线。A2 站位沉积物粒径从上向下由细变粗再变细,粒度变化显著的位置在埋深约 12 cm 处,而重金属含量也在 14 cm 处稍有波动。A4 站位沉积物粒径在 0~3 cm 随埋深快速变粗;3~15 cm 由上向下沉积物粒径变细,在 15 cm 处再变粗;15~30 cm 埋深内沉积物粒度逐渐变细,其变化趋势与重金属含量垂向分布符合粒度控制律,即元素含量随粒度变粗而降低。A5 站位沉积物粒度垂向分布呈波动型,其中在 6 和 30 cm 处粒度最大,而该站位各重金属含量在 5 和 30 cm 处也达到最低。A6 站位沉积物粒径从上向下由粗变细再变粗,在 26 cm 处迅速变粗,对应 Cd 和 Zn 元素含量在 23 cm 处迅速降低。

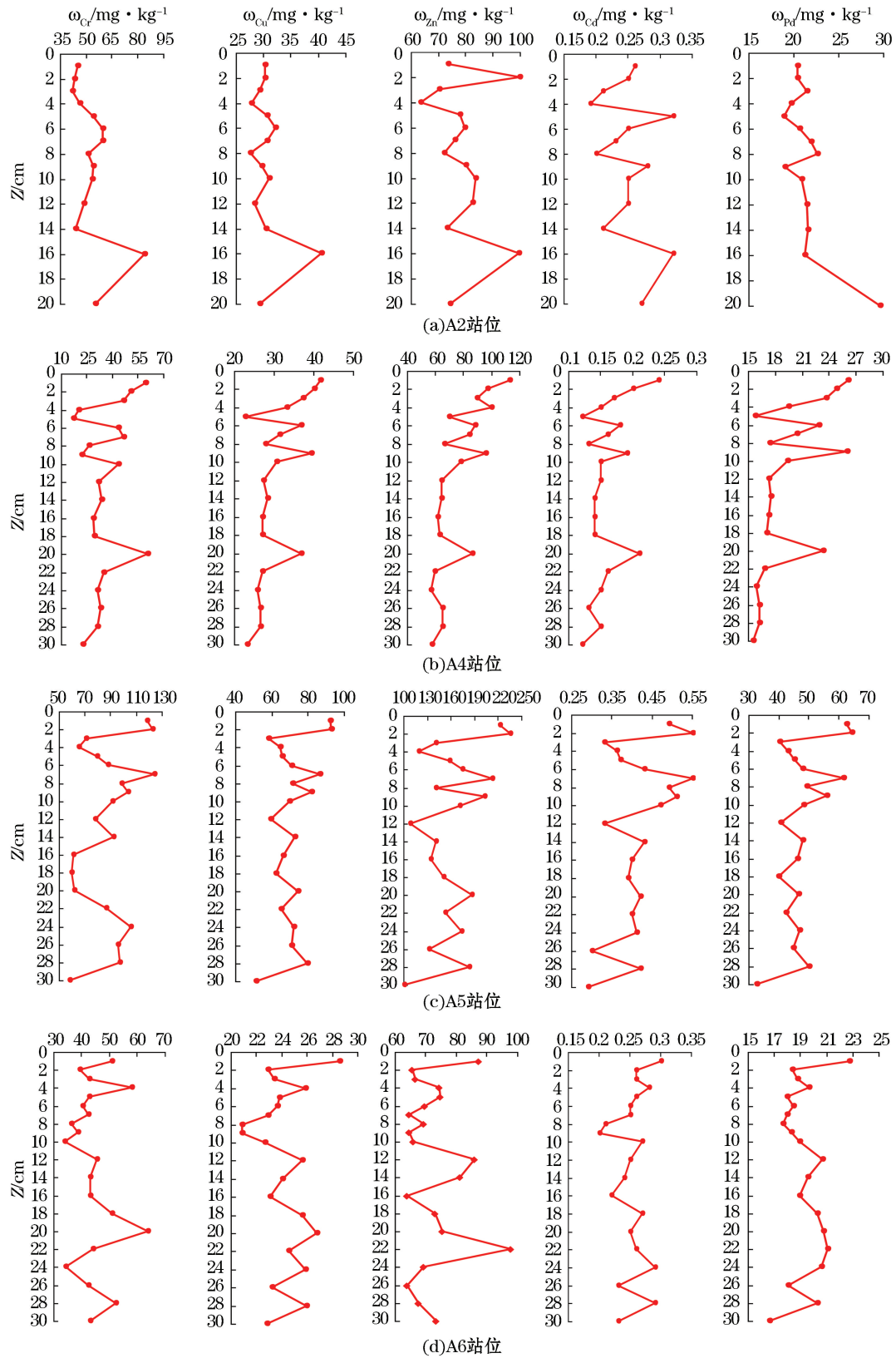


图 3 柱状样重金属垂向分布

Fig.3 Vertical distributional patterns of heavy metals in cores

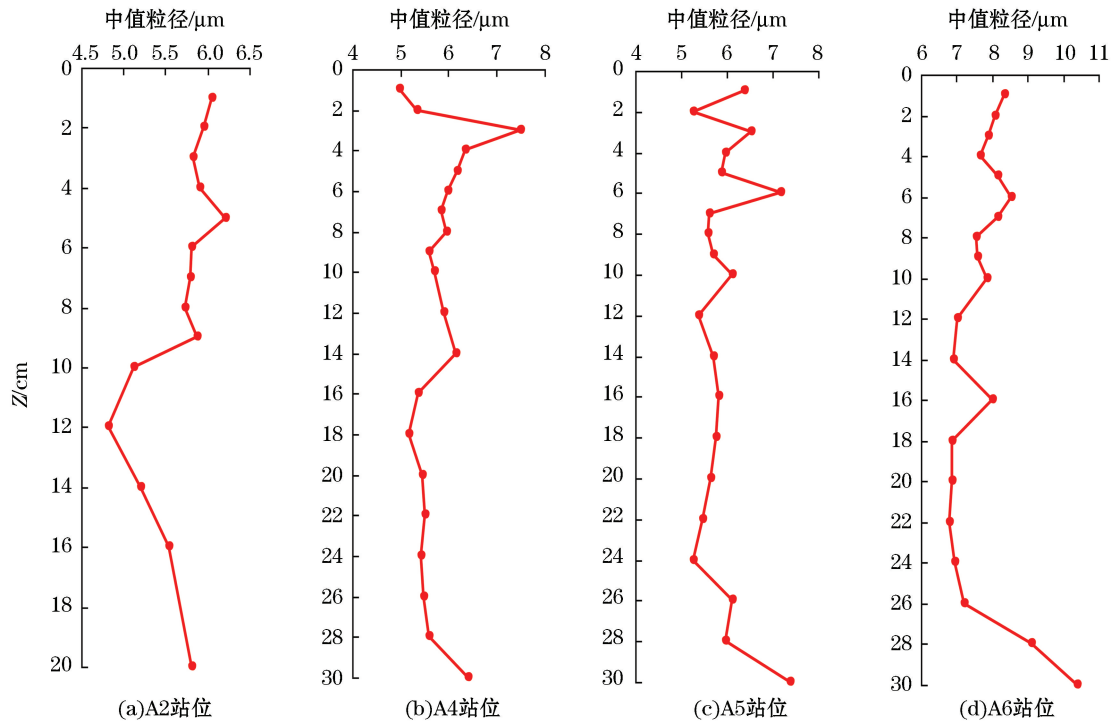


图4 柱状样粒度垂向分布

Fig.4 Vertically distributional patterns of granularity in cores

地质累积指数法是研究水体沉积物重金属污染的一种定量指标,广泛应用于研究沉积物中重金属污染评价。计算公式:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{C_n}{1.5B_n} \right), \quad (1)$$

式中, C_n 是元素 n 在沉积物中的质量分数, B_n 是沉积物中该元素的背景值(背景值参照文献[1]的结果), 1.5是考虑各地岩石差异可能引起背景值的变动而取的系数。地质累积指数表示的污染程度共分为7级,从级别 0($I_{\text{geo}} < 0$)到级别 6($I_{\text{geo}} > 5$)。地质累积指数与污染程度之间的关系如表 1。

表 1 I_{geo} 与污染程度之间的关系Table 1 Relationship between I_{geo} and pollution levels

项 目	污染程度						
	无	轻度	偏中度	中度	偏重	重	严重
级别	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	<0	0~1	1~2	2~3	3~4	4~5	>5

采用地质累积指数法评价沉积物表层重金属污染,结果表明:Cr,Cu,Zn,Cd和Pb的地质累积指数平均值分别为-0.567,-0.332,-0.432,0.594和-0.604。Cr,Cu,Zn和Pb的地质累积指数小于零,表明沉积物中这些重金属均未受到污染。Cd的地质累积指数为0~1,表明其受到轻度污染,其中位于渤海湾中部的A8站位及渤海湾西北部的D1站位污染最为严重,污染程度为偏中度。尽管Cr的地质累积指数平均值小于零,但是位于渤海湾中部各站位Cr的地质累积指数也在0~1,表明渤海湾中部受到轻度的Cr污染。

2.2 沉积物重金属来源

首先对沉积物表层各重金属元素进行相关性分析,结果显示Cr,Cu,Zn和Pb之间有很强的相关性,表明Cr,Cu,Zn和Pb四种重金属可能有相同的来源;而Cd与其他4种重金属的相关性较差,可能是由于Cd在次表层易氧化,通常以二价氧化物或四价氧化物的形式存在,游离态的Cd有很强的生物可利用性。进一

步对沉积物中重金属进行了主成分分析,结果表明前两个主成分的累计贡献率达到 95.5%,已经能够反映全部数据的大部分信息。第一主成分的贡献率为 75.5%,Cr,Cu,Zn 和 Pb 均有较高的正荷载。Cr,Cu,Zn 和 Pb 主要来自渤海湾附近的电镀、合金、电子、冶炼等工业企业以及生活污水。此外,相关性分析结果也表明 Cr,Cu,Zn 和 Pb 相关性显著,表明它们有共同的来源,因此可知第一主成分表征工业废水和生活污水对沉积物中重金属含量的影响。第二主成分的贡献率为 20%,在 Cd 上的正荷载很高,为 0.954。Cd 由于其可在生物体内富集,第二主成分可能反映出了养殖业的发展对沉积物重金属的影响,特别是位于歧河口附近的养殖区受到相当程度的沉积物重金属污染。

2008 年国家海洋局发布的渤海海洋环境质量公报表明,84.6%的陆源入海排污口有不同程度的超标排放现象,重点排污口邻近海域环境污染较重。大沽排污河口和北塘口含有高质量分数污染物质的污水排放入海,对近岸海域水质环境造成严重影响。监测的入海排污口中,以子牙新河排污口污染程度较重。2010 年天津市海洋环境质量公报也指出,近岸海水中出现了重金属含量超标的情况。结合相关性分析和主成分分析推测渤海湾沿岸河流以及排污口排放的未达标的污水极有可能是造成西北部沿岸高质量分数重金属的原因。对于渤海湾中部的重金属高质量分数区,由于距离排污口的位置较远,难以用排污口排放的影响进行解释。

2.3 重金属高质量分数区出现的动力学机理

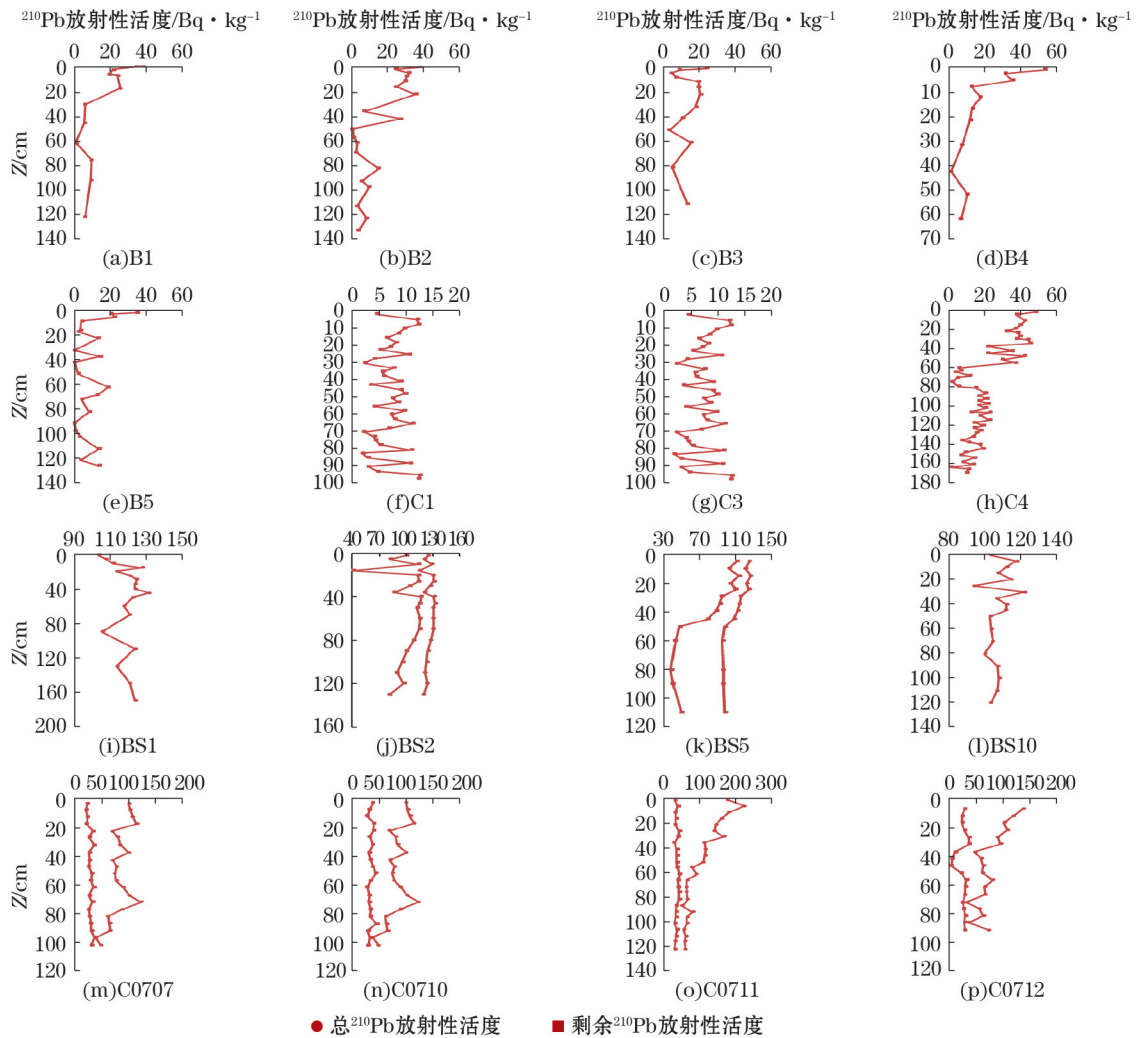
除了排放源以外,水动力学因素是影响重金属空间分布特征的另一个重要因素。因此,我们进一步分析了渤海湾重金属空间分布与余环流的关系。渤海湾的余环流以潮致余流为主,关于此方面已有研究成果,我们主要参考这方面已有的研究成果进行分析。

总结公开发表的文献中关于渤海湾潮余流的论述,早期研究者们基于实测资料分析渤海湾环流,随着科技的进步,后续多以数值模拟研究为主。赵保仁和雷方辉^[14]根据 1980 年以来的实测海流资料分析表明渤海湾南北部各有一个环流。渤海湾左右两侧的海水都涌入渤海湾中部,然后从渤海湾中部流出。目前大部分的观点认为,渤海湾余流沿湾顶岸界内区为逆时针环流^[15-16],渤海湾西北角有一顺时针环流^[17-18]。潮致余流的整体结构表现为南部为一顺时针环流,北部为一逆时针环流,水流从中部流出^[14,19]。近十年,随着渤海湾周边经济的发展,渤海湾沿岸的围填海活动逐渐增多,显著改变了局部的岸线和地形,对余流结构造成了一定的影响。已有的研究表明,岸线变化后逆时针沿岸流以及西北角的顺时针环流消失,北侧的逆时针环流较强,环流中心外移,南部的顺时针环流较弱,环流中心东移^[20-22]。

受渤海湾余环流的影响,排放入海的污染物将被带入渤海湾中部。而中部正好有一个环流中心,这一方面导致大部分污染物沿环流涡旋在此聚集,另一方面环流中心处弱的水动力条件也使悬浮物易于沉积,于是渤海湾中部成为重金属质量分数的高值区。同样,渤海湾西北角的顺时针环流使得一部分污染物沉积于此涡旋中心。岸线变迁后西北角环流的消失导致该区域内的污染物滞留时间变短,同时转而北上到达渤海湾北部。综上,在余环流的作用下,陆源输入的重金属污染物向渤海湾西北部海域及中部海域输运,并在涡旋中心沉积,最终导致这两处成为沉积物重金属高质量分数区域。

2.4 ²¹⁰Pb 放射性活度的空间分布特征

大部分重金属是吸附在悬浮颗粒物上,并随着悬浮物沉积,所以为了判断上述重金属空间分布特征的合理性,需要进一步分析渤海湾的沉积特性。放射性核素示踪是测定沉积物的运移和沉积率的常用方法之一。沉积物中放射性核素的分布往往能够反映出由于物理、地形或生物过程造成的沉积模式。天然放射性同位素²¹⁰Pb的半衰期时间为 22.3 a,可以用来示踪百年尺度的沉积过程^[23-25]。通过放射性核素²¹⁰Pb 活度的垂向分布来探讨重金属分布与沉积环境之间的关系。图 5 给出了渤海湾西北部及中部共 16 个站位的²¹⁰Pb 活度垂向分布。

图5 16个柱状样²¹⁰Pb活度分布Fig.5 Distribution of activity of ²¹⁰Pb in samples from sixteen locations

根据剩余²¹⁰Pb放射性活度的分布来计算沉积速率,结果发现在黄河口附近和子牙新河口附近站位的沉积速率较高,分别为BS2(1.17 cm/a),C4(1.82 cm/a)。渤海湾西部站位沉积速率均小于1 cm/a,渤海湾西北部的C0711和C0712沉积速率在1 cm/a左右。

受物质来源、水动力条件、生物扰动等因素的影响,渤海湾柱状样²¹⁰Pb放射性活度随埋藏深度的垂向分布表现为4种基本模式,即两段模式(包含衰变段、衰变平衡段)、三段式(包含混合段、衰变段、衰变平衡段)、多阶模式和倒置模式。其中两段、三段模式均呈现²¹⁰Pb放射性活度沿深度呈指数衰减趋势,而多阶模式和倒置模式属于分布异常的类型^[26]。一般情况下,若²¹⁰Pb活度随埋藏深度呈指数衰减趋势,这种垂向分布模式可以反映出沉积环境稳定。从结果可以看出,位于渤海湾中部的BS5站位、西部的C4站位和西北部的C0707,C0710,C0711和C0712站位以及B1和B2站位²¹⁰Pb放射性活度随埋藏深度曲线表现为指数衰减模式。这种分布模式表明该站位海域的沉积环境、物质来源和沉积作用都处于较稳定状态。其他站位垂向活度变化较大,呈现大幅波动,反映了这些站位可能处于较强的水动力条件下,导致沉积物的混合和扰动。

位于渤海湾西北部潮间带区域的C0707,C0710,C0711和C0712站位,除了C0712,沉积物表层²¹⁰Pb活度垂向分布处于波动状态,表明最近一段时间沉积物受到扰动,很可能是受到天津港附近围填海及航道疏浚等的影响。然而从图4中可以看出沉积物深处的柱状样并未受到扰动,尤其是C0711站位。所以对于长时

间尺度而言,渤海湾西北部潮间带区域的沉积环境相对稳定。

塘沽南部的 C1 和 C3 站位²¹⁰Pb 活度随埋藏深度未见明显的衰减趋势,表明沉积物受到一定程度的混合和扰动,可能是由于这一区域港口建设以及人为活动的影响改变其沉积环境。更靠近南部的 C4 站位,尽管其受到人为活动的干扰,但²¹⁰Pb 活度随埋藏深度整体上呈指数衰减。

在渤海湾中部,对比 BS10,BS1 和 BS2 三个站位,只有 BS5 站位²¹⁰Pb 活度垂向分布呈指数衰减,表明该区域水动力条件较弱。考虑到 BS1 和 BS2 站位靠近黄河口,推测其沉积物扰动可能与黄河多次改道、黄河入海泥沙量锐减有关。

3 结 语

沉积物重金属数据分析表明渤海湾 Cr,Cd,Pb,Zn 和 Cu 五种重金属有着相似的空间分布,即重金属高质量分数区域分别位于渤海湾西北部和渤海湾中部。对沉积物重金属污染程度进行评价,结果显示 Cd 受到轻度污染。重金属来源分析表明渤海湾西北部高质量分数重金属很可能与排污口的排放有关。除了排放源以外,水动力学因素是影响重金属空间分布特征的另一个重要因素。受渤海湾余环流的影响,排放入海的污染物将被带入渤海湾中部。同时重金属含量也受到粒度的控制,即元素含量随粒度变粗而降低。重金属是吸附在悬浮颗粒物上并随着悬浮物沉积于底泥中,所以沉积物中重金属含量与沉积作用有关。柱状样²¹⁰Pb放射性活度的分布也进一步证实渤海湾西北部和渤海湾中部沉积环境较为稳定,有利于悬浮污染物的沉积。

参考文献(References):

- [1] LI S Y, LI G X, MIAO F M. The distribution and environmental background values of the heavy metals in sediment of the Bohai Sea[J]. *China Environmental Science*, 1994, 14(5): 370-376. 李淑媛, 刘国贤, 苗丰民. 渤海沉积物中重金属分布及环境背景值[J]. *中国环境科学*, 1994, 14(5): 370-376.
- [2] ZHANG Y, LU X Q, LIU H L, et al. Distribution characteristics and source identification of heavy metals in surface sediments of Bohai Bay near Tianjin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(6): 608-614. 张彦, 卢学强, 刘红磊, 等. 渤海湾天津段表层沉积物重金属分布特征及其来源解析[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(6): 608-614.
- [3] FAN Z. Bohai Bay in big trouble[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1992, 24(7): 333-334.
- [4] QIN Y W, SU Y B, ZHENG B H, et al. Heavy metals and pollution assessment in surface sediments of Bohai Bay[J]. *Marine Sciences*, 2007, 31(12): 28-33. 秦延文, 苏一兵, 郑丙辉, 等. 渤海湾表层沉积物重金属与污染评价[J]. *海洋科学*, 2007, 31(12): 28-33.
- [5] HU B Q, LI G G, LI J, et al. Spatial distribution and ecotoxicological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the southern Bohai Bay, China[J]. *Environmental Science & Pollution Research*, 2012, 20(6): 4099-4110.
- [6] QIN Y S, LIAO X G. Preliminary study on sedimentation of Bohai Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1962, 4(3-4): 199-207. 秦蕴珊, 廖先贵. 渤海湾海底沉积作用的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1962, 4(3-4): 199-207.
- [7] LI Y, YU Z M, SONG X X. Application of Principal Component Analysis(PCA) for the estimation of source of heavy metal contamination in marine sediments[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(1): 137-141. 李玉, 俞志明, 宋秀贤. 运用主成分分析(PCA)评价海洋沉积物中重金属污染来源[J]. *环境科学*, 2006, 27(1): 137-141.
- [8] YU B H, LIU H L, LU X Q, et al. Characteristics of heavy metals and radionuclides in surface sediments from the inner Bohai Bay (Tianjin coastalsea)[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(6): 1053-1059. 郁滨赫, 刘红磊, 卢学强, 等. 天津近岸表层沉积物重金属和放射性核素分布特征[J]. *中国环境科学*, 2013, 33(6): 1053-1059.
- [9] FENG H, JIANG H Y, GAO W S, et al. Metal contamination in sediments of the western Bohai Bay and adjacent estuaries, China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2011, 92(4): 1185-1197.
- [10] MEN G W, LEI K, ZHENG B H, et al. Modern sedimentation rates in the intertidal zone on the west coastal zone of the Bohai Gulf[J]. *Haiyang Xuebao*, 2005, 27(3): 67-72. 孟伟, 雷坤, 郑丙辉, 等. 渤海湾西岸潮间带现代沉积速率研究[J]. *海洋学报*, 2005, 27(3): 67-72.
- [11] XU Y Y, SONG J M, LI X G, et al. Variation characteristics and potential ecological risk assessment of heavy metals in the surface sedi-

- ments of bohai bay[J]. Environmental Science, 2012, 30(12): 2560-2570. 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[J]. 环境科学, 2012, 30(12): 2560-2570.
- [12] HU B G, LI G G, LI J, et al. Spatial variability of the ^{210}Pb sedimentation rates in the Bohai and Huanghai Seas and its influencing factors[J]. Haiyang Xuebao, 2011, 33(6): 125-133. 胡邦琦, 李国刚, 李军, 等. 黄海、渤海铅 ^{210}Pb 沉积速率的分布特征及其影响因素[J]. 海洋学报, 2011, 33(6): 125-133.
- [13] WANG F, WANG H, ZONG Y Q, et al. Sedimentary dynamics along the west coast of Bohai Bay, China, during the twentieth century [J]. Journal of Coastal Research, 2014, 294(2): 379-388.
- [14] ZHAO B R, LEI F H. Circulation, tidal residual currents and their effects on the sedimentations in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1995, 25(5): 466-473. 赵保仁, 雷方辉. 渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响[J]. 海洋与湖沼, 1995, 25(5): 466-473.
- [15] ZAHNG S Z, XI P G, FENG S Z. Numerical modeling of the steady circulation in the Bohai Sea[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1984, 14(2): 12-19. 张淑珍, 奚盘根, 冯士筭. 渤海环流数值模拟[J]. 山东海洋学院学报, 1984, 14(2): 12-19.
- [16] ZHENG L Y. Numerical simulation of three-dimensional tide-induced lagrangian residual velocity and its application to Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1992, 22(1): 39-49. 郑连远. 三维潮致拉格朗日余流的数值计算及其在渤海中的应用[J]. 青岛海洋大学学报, 1992, 22(1): 39-49.
- [17] SONG W J, TAO J H. Dynamic characteristics on water environment in the Bohai Sea[C]//National Conference on Computational Fluid Dynamics, 2002. 宋文筠, 陶建华. 渤海水环境动力特性的研究[C]//第十一届全国计算流体力学会议论文集, 2002.
- [18] ZHANG Y M, SUN Y L. A three-dimensional numerical tidal model with a variable boundary for the Bohai Bay[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2002, 32(3): 337-344. 张越美, 孙英兰. 渤海湾三维变动边界潮流数值模拟[J]. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(3): 337-344.
- [19] WANG X Q, BAO X W, WU D X, et al. Numerical diagnostic simulation of summertime tide induced wind driven and thermohaline currents in the Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2004, 35(1): 41-47. 万修全, 鲍献文, 吴德星, 等. 渤海夏季潮致-风生-热盐环流的数值诊断计算[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(1): 41-47.
- [20] FENG S Z, ZHANG S Z, XI P G. Mathematical modeling of circulation in the East China Sea——II. Numerical simulation of the summer circulation and a nondimensional criterion[J]. Journal of Shandong College of Oceanology, 1981, 11(2): 8-26. 冯士筭, 张淑珍, 奚盘根. 东中国海环流的一种模型——II. 夏季环流和相似准则[J]. 山东海洋学院学报, 1981, 11(2): 8-26.
- [21] CAO Z D, LOU A G. A three dimensional numerical simulation of the wind-driven circulation during winter in the Bohai Sea by FVCOM [J]. Ocean University of China, 2011, 41(S1): 374-378. 曹振东, 娄安刚. 基于 FVCOM 的渤海冬季三维风生环流数值模拟[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(增 1): 374-378.
- [22] HAN Y Q, SHEN Y M. Numerical simulation of the winter and summer circulation and its driving factors in the Bohai Sea based on EFDC[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(6): 733-744. 韩雅琼, 沈永明. 基于 EFDC 的渤海冬夏季环流及其影响因素的数值模拟研究[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(6): 733-744.
- [23] QI J, LI F Y, SONG J M. Distribution of ^{210}Pb activity of sediments in the Yellow and Bohai seas[J]. Geochimica, 2005, 34(4): 47-52. 齐君, 李凤业, 宋金明. 黄海和渤海沉积物 ^{210}Pb 活度的分布特征[J]. 地球化学, 2005, 34(4): 47-52.
- [24] FENG H, ZHANG W G, JIA L, et al. Short- and long-term sediment transport in western Bohai Bay and coastal areas[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2010, 28(3): 583-592.
- [25] GAO B, LU J, HAO H, et al. Heavy metals pollution and Pb isotopic signatures in surface sediments collected from Bohai Bay, North China[J]. The Scientific World Journal, 2014(12): 158796.
- [26] LIU Y L, WANG Y P, GAO J H, et al. Specific activity distribution patterns of ^{210}pb and sediment accumulation rates in the Jiaozhou Bay in Shandong Province, China[J]. Haiyang Xuebao, 2010, 32(1): 83-93. 刘运令, 汪亚平, 高建华, 等. 胶州湾铅 ^{210}pb 比活度的分布模式及百年尺度的沉积速率[J]. 海洋学报, 2010, 32(1): 83-93.

Distribution Characteristics of Sediment Heavy Metals in Bohai Bay and Its Effect Factors

CHEN Xiu¹, LI Shuang-zhao¹, YUAN De-kui¹, MU Di², LI Yuan-yi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300354, China;

2. School of Marine Science and Engineering, Hebei University Of Technology, Tianjin 300130, China)

Abstract: Sediment samples from eighteen stations (including four core samples) in the Bohai Bay were collected during October–November 2012 and then analyzed for contents of several heavy metals. The results show that the distributional patterns of the five major heavy metals (Cr, Cu, Zn, Cd, Pb) are similar, and there are two local areas with high concentrations of heavy metals in the Bohai Bay. One is located in the northwest part of the Bohai Bay, and the other one is located in the middle part of the Bay. By using the method of the geological accumulation index, the pollution levels of Cd were evaluated as a level of lightly polluted. The correlation analysis and principal component analysis were used to analyze the sources of pollutants. The results indicate that the regions with high concentrations of heavy metals may be associated with the discharges of sewage outlets. According to the spatially distributional patterns of sediment particles and the circulations in the Bohai Bay, it can be concluded that the distributional patterns of heavy metals might be affected by the residual circulations in the Bohai Bay and the change of particles sizes of sediments. We suggested that the activities of ²¹⁰Pb decays regularly with buried depth at the stations with high concentrations of heavy metals, indicating that the sedimentary conditions in the northwest and the middle parts of the Bohai Bay are relatively stable, which contributes to the deposition of sediments and its associated heavy metals.

Key words: Bohai Bay; sediment; heavy metal; grain size; radioactive isotopes

Received: June 19, 2016