

双岛湾人工鱼礁区表层沉积物重金属的分布特征及污染评价

褚瑶瑶^{1,2}, 张艳², 徐勇², 张旭志², 夏斌², 陈聚法², 田涛¹

(1. 大连海洋大学, 大连 110623;

2. 农业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,
中国水产科学研究院黄海水产研究所, 青岛 266071)

摘要:根据2012年3月、5月、8月、11月表层沉积物调查资料,分析了双岛湾附近人工鱼礁区表层沉积物重金属的分布特征,采用潜在生态风险评价法对重金属的生态危害进行了评价。结果表明:(1)研究海域表层沉积物中重金属含量较低,全部测站Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As的含量符合《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002)Ⅰ类标准;(2)表层沉积物中重金属的分布较为规律,除Hg含量站间差异不明显外,鱼礁区内站点的Cu、Zn、Pb、Cd、As重金属含量低于周边海域;(3)表层沉积物中重金属含量的月际变化比较明显,以8月最高、3月最低;(4)双岛湾附近海域重金属污染程度为低级,且总体潜在生态危害属轻微水平。

关键词:双岛湾;表层沉积物;重金属;时空分布;潜在生态危害

中图分类号:X825 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-3075(2014)03-0034-08

双岛湾位于山东省威海市西部沿海,其中水产养殖区面积约18 km²,因湾内有大小2个海岛而得名(周艳荣等,2008)。近年来,由于受人类活动的影响,该湾面积呈逐渐减少的趋势,双岛湾沿岸主要入海河流包括初村河和羊亭河,许多企业排出的工业废水通过这2条河交汇后流入湾内,对该湾及其邻近海域的生态环境质量产生了显著影响。虽然经过多年的治理,双岛湾的环境质量有所改善,但污染问题仍然比较突出,其中重金属是具有潜在危险的重要污染物。重金属污染与其他有机化合物的污染不同,不少有机化合物可以通过自然界本身的理化或生物净化,使有害性降低或解除;而重金属具有富集性,很难在环境中降解,因而成为持久性的污染物(乔磊等,2005)。受诸多因素的影响,水体中重金属的含量分布规律性一般较差,而通常沉积物中重金属的含量分布具有较为明显的规律性(贾振邦和霍文毅,2000;卢璐等,2011)。因此,进行沉积物中重金属污染状况评价研究,对于海洋生态环境的保护具有重要意义。

目前,双岛湾邻近海域已建成人工鱼礁区约

670 hm²,由于其具有阻流作用,在鱼礁迎流面附近产生上升流,礁体内部和后部会产生涡流。如果沉积物中的污染物超标,则存在污染物再次释放,造成二次污染的潜在危险(卢璐等,2011)。有关威海双岛湾及其邻近海域的水质状况分析与评价结果已有报道(周艳荣等,2008;王军等,2012);中国沿海和湖泊沉积物中重金属的时空分布、污染与生态风险评价也有诸多研究(蒋增杰等,2008;乔永民等,2009;周秀艳等,2010;胡宁静等,2011;卢璐等,2011;张玉凤等,2011;徐勇等,2012;胡利芳等,2013;李玉等,2013);但双岛湾及其附近海域沉积物重金属污染状况尚未见报道。本文利用2012年的调查资料,对双岛湾附近海域人工鱼礁区沉积物中重金属的时空分布及潜在生态风险进行了分析研究,旨在系统了解该海域的环境质量状况和人工鱼礁对生态环境的调控效果,为建立人工鱼礁环境效应评价指标体系和综合评价规范积累资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

于2012年3月、5月、8月、11月在山东威海双岛湾附近人工鱼礁投放海域设置10个站点进行表层沉积物采样(表1和图1);其中鱼礁区4个(R1、R2、R3、R4),对照区6个(C1、C2、C3、C4、C5、C6)。沉积物的采集、预处理、制备、保存和测定方法均按国家海洋局《海洋监测规范》(GB 17378-2007)的要求进行。

收稿日期:2014-01-03

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201003068);中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费专项(2010-chb-01)。

通讯作者:陈聚法,男,研究员,主要从事海洋生态学研究。E-mail: chenjf@ysfri.ac.cn

作者简介:褚瑶瑶,1987年生,女,硕士研究生,主要从事渔业资源与环境修复研究。E-mail: cyy_zwz1987@163.com

表 1 调查站位经纬度
Tab.1 Location of sample stations

站号	东经	北纬
R1	121°55.30′	37°29.13′
R2	121°56.73′	37°28.93′
R3	121°57.90′	37°29.75′
R4	121°59.00′	37°29.93′
C1	121°54.70′	37°30.00′
C2	121°56.75′	37°30.50′
C3	121°58.80′	37°31.05′
C4	121°59.50′	37°29.50′
C5	121°58.00′	37°29.00′
C6	121°56.10′	37°28.50′

1.2 沉积物取样与重金属分析

双岛湾附近海域投放的礁体包括正方体(中空)型、圆管型和空心砖等钢筋水泥构件、石块以及

贝壳网包(网质为聚氯乙烯),水下礁群间距为单位礁群边长的 2 倍。沉积物采样在各礁群间隙处进行,表层沉积物样品用抓斗式采样器采集,用塑料勺取中央未受干扰的表层 0 ~ 2 cm 泥样,并对样品现场描述记录,编号放入洁净聚乙烯袋中,于 0 ~ 4℃下保存。在实验室内将解冻至室温的样品在阴凉通风处风干,剔除砾石、贝壳及木屑等动植物残体,用玛瑙研钵将其磨碎并全部通过 160 目筛,充分混匀后取样进行测定分析。沉积物用微波进行消解;其中,Pb、Cd 含量采用石墨炉原子吸收分光光度法测定,Cu、Zn 采用火焰原子吸收分光光度法测定,Hg、As 采用原子荧光光谱法测定。沉积物粒径用激光粒度仪进行分析测定。

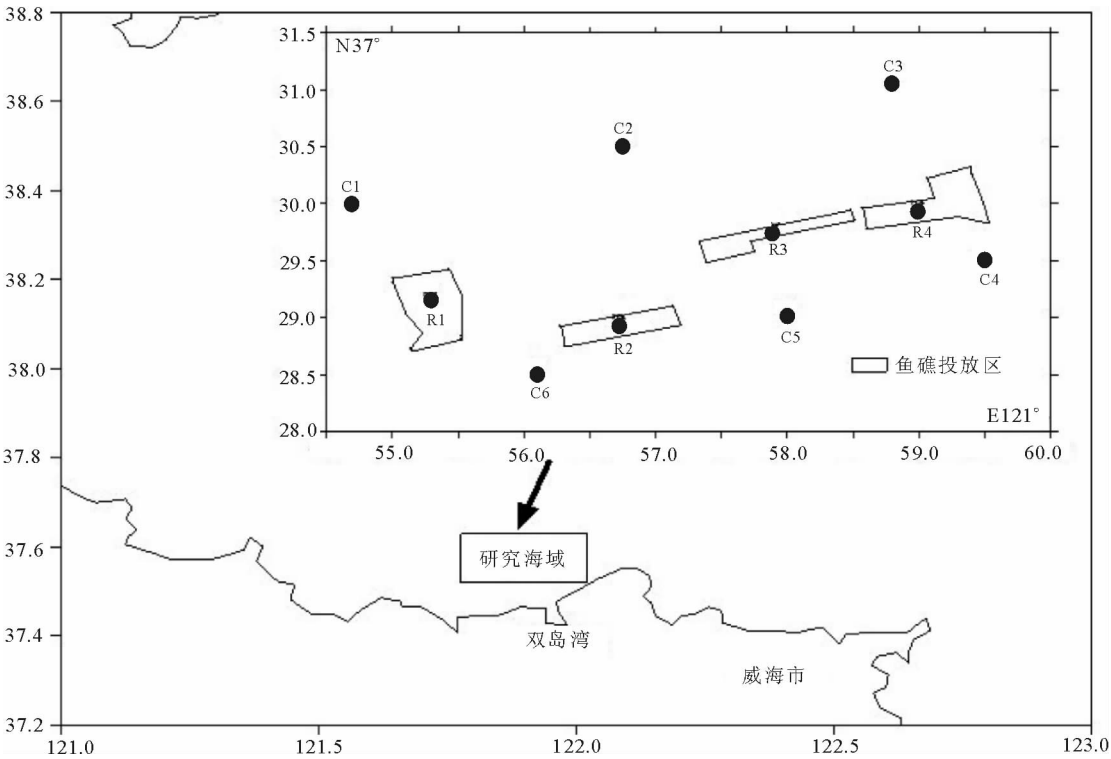


图 1 调查区域及站位分布
Fig.1 Research area and distribution of sample stations

1.3 潜在生态风险评价法

本研究采用 Hankanson(1990)指数法评价沉积物重金属潜在生态风险,评价指标及其关系式如下:

单一重金属污染系数(C_f^i):

$$C_f^i = C^i / C_n^i$$

式中: C^i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为国际常用全球工业化前沉积物中重金属 i 的含量,一般采用最高背景值,铜(Cu)、锌(Zn)、铅(Pb)、镉(Cd)、汞(Hg)、砷(As)的背景参照值和毒性系数见

表 2。

沉积物重金属污染程度(C_d):

$$C_d = \sum_{i=1}^m C_f^i$$

某一区域重金属 i 的潜在生态危害系数(E_r^i):

$$E_r^i = T_r^i C_f^i$$

式中: T_r^i 为重金属 i 的毒性响应系数。

重金属生态危害参数总和(RI):

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

表2 重金属的背景参照值和毒性系数
Tab.2 Background reference values (C_n^i) and toxicity coefficient (T_r^i) of heavy metals

重金属	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
$C_n^i/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	30	80	25	0.5	0.25	15
T_r^i	5	1	5	30	40	10

2 结果与分析

2.1 沉积物重金属含量

2012年3月、5月、8月和11月共计4个航次的调查结果表明,研究海域表层沉积物中,Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As 6种重金属的含量均处于较低水平(表3);所有站位的重金属含量均符合《海洋沉积物质量》(GB 18668-2002) I类标准(表4)。

2.2 重金属的水平分布

威海双岛湾附近人工鱼礁区表层沉积物中重金属的含量及变异系数见表3。可见除重金属Cu的变异系数为88%外,Zn、Pb、Cd、Hg、As的变异系数均低于50%,在15%~46%,说明Cu在整个研究区域分布的差异性较大,其他5种重金属分布的差异

性较小。造成研究海域沉积物中铜含量变异性高的原因主要是受到外源输入的影响,双岛湾水体中的铜主要来源于电镀厂、眼镜厂等企业的生产废水排放(周艳荣等,2008),在海洋水动力作用下,湾内水体中的铜被交换至双岛湾邻近海域并沉积至底质,研究海域南部离双岛湾的湾口最近,导致该区域表层沉积物中铜含量高于研究海域北部;另外,生物对铜的利用也是重要影响因素之一。研究海域北部为大面积的栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)筏式养殖区,而南部近岸海域没有水产养殖。有研究表明,栉孔扇贝对铜的富集能力要强于铅、汞、砷、铬等重金属,由于富集作用使水体中铜含量降低,从而促进了沉积物中的铜向水体释放(王红等,2007;马元庆等,2010),造成研究海域北部沉积物中铜含量下降。研究海域表层沉积物中重金属含量分布较为规律,总体来看,除Hg含量站间差异不明显外,位于鱼礁区内站点Cu、Zn、Pb、Cd、As的含量要低于周边海域,尤以海域南部站点(C4、C5、C6)的重金属含量最高(图2)。

表3 沉积物中重金属含量
Tab.3 Contents of heavy metals in surface sediments

项目	重金属含量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
2012-03	0.63~5.63	6.33~27.56	1.36~4.70	0.041~0.114	0.087~0.190	1.55~8.26
2012-05	1.09~11.16	6.16~53.04	3.28~16.12	0.041~0.148	0.094~0.198	1.75~7.73
2012-08	1.35~13.58	15.23~58.65	2.78~18.14	0.056~0.167	0.122~0.186	2.29~10.62
2012-11	0.69~6.55	6.69~31.28	1.31~6.92	0.043~0.179	0.097~0.195	1.53~7.46
年度范围	0.63~13.58	6.16~58.65	1.31~18.14	0.041~0.179	0.087~0.198	1.55~10.62
年均值	3.00 ± 2.63	24.78 ± 10.37	6.48 ± 2.99	0.084 ± 0.032	0.143 ± 0.021	6.03 ± 1.88
变异系数/%	88	42	46	38	15	31

表4 沉积物中重金属评价标准
Tab.4 Evaluation standard of heavy metals in sediments

重金属	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
I类标准	≤ 35	≤ 150	≤ 60	≤ 0.5	≤ 0.2	≤ 20

造成研究海域表层沉积物中重金属含量空间差异的因素很多,首先与陆源污染和水动力作用有关。受陆源污染物入海的影响,双岛湾环境污染问题一直比较突出。在海洋水动力作用下,湾内水体中重金属等污染物被带至湾外并在近岸海域沉积。由于研究海域南部紧邻双岛湾,因此导致该海域的重金属含量较高;其次为沉积物粒径,利用SPSS软件对研究海域10个站位的沉积物粒径(表5)与单项重金属含量之间的相关性进行分析,结果表明,重金属Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As的含量与沉积物粒径间均呈负相关,相关系数(R)分别为-0.610、-0.886、

-0.762、-0.685、-0.275、-0.768;经 t 检验,Zn与As的含量在0.01水平上与粒径存在显著负相关,Pb与Cd的含量在0.05水平上与粒径存在显著负相关,而Cu与Hg的含量与粒径不存在显著的相关性。6项重金属的含量与粒径相关性分析结果表明,重金属含量符合粒级控制规律,即绝大多数元素的含量随沉积物粒径变小而升高。

2.3 沉积物重金属的月际变化

2012年双岛湾邻近海域人工鱼礁区表层沉积物中重金属含量月际变化比较明显,其中Cu、Zn、Pb、Hg含量以8月最高,5月次之,3月最低;Cd含量以8月最高,11月次之,3月最低;As含量以8月最高,5月次之,11月最低(图3)。从月际变化幅度看,各项重金属也存在明显差异,由大到小依次为Zn(15.55~35.95 mg/kg)、Pb(2.40~10.67 mg/kg)、As(5.30~7.45 mg/kg)、Cu(2.40~

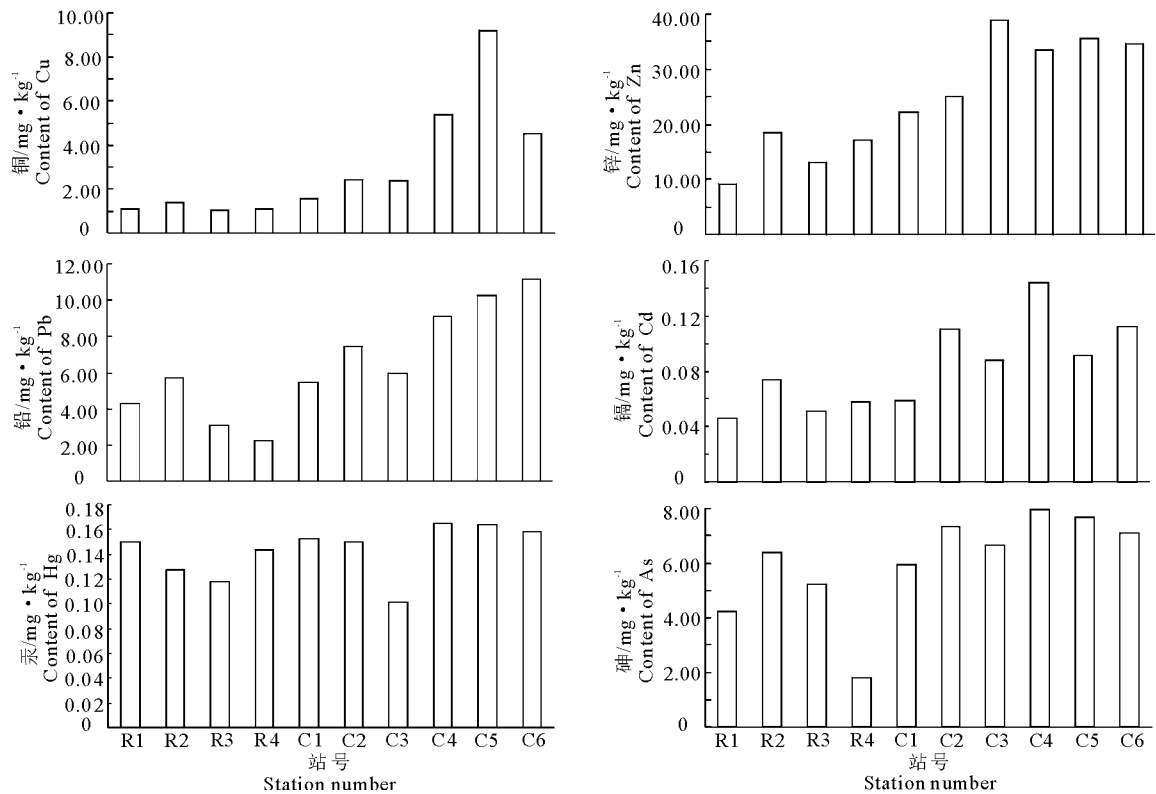


图2 调查海域重金属含量的水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of heavy metals contents in surveyed area

表5 各调查站位表层沉积物中值粒径和类型

Tab.5 Median diameter and type of surface sediment for each surveyed station

站号	中值粒径/mm	沉积物类型
R1	0.963	砾砂 (GS)
R2	0.708	砾砂 (GS)
R3	0.920	砾砂 (GS)
R4	0.878	砾砂 (GS)
C1	0.123	粉砂质砂 (TS)
C2	0.350	粗砂 (CS)
C3	0.138	粉砂质砂 (TS)
C4	0.173	中砂 (MS)
C5	0.160	中砂 (MS)
C6	0.175	中砂 (MS)

4.01 mg/kg)、Cd(0.066 ~0.105 mg/kg)、Hg(0.129 ~0.162 mg/kg)。

海浪和海流作用下沉积物再悬浮是决定研究海域沉积物重金属月际变化的重要因素之一。双岛湾及其邻近海域3月的风大浪高,由于水深较浅、沉积物再悬浮强烈,部分重金属被释放到水体,造成其含量降低;8月风小浪低,沉积物再悬浮作用不明显,重金属释放量小于3月;另外,由于8月水温高、初级生产力增大,导致沉积物上覆水的pH值升高,使重金属更容易被沉积物吸附,造成其含量增高(刘乃壮等,1992;王超等,2010;徐勇等,2012);而5月

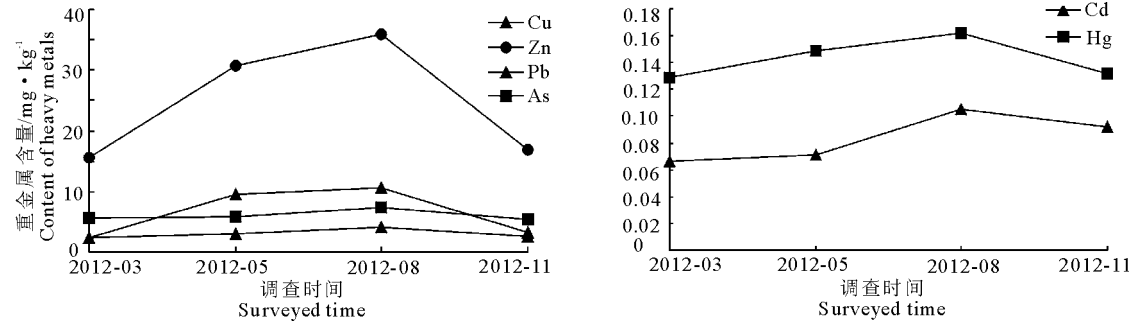


图3 沉积物中重金属含量的月际变化

Fig.3 Monthly variations of heavy metals contents in surface sediments

和11月沉积物再悬浮作用和水温、初级生产力等因子的影响程度位于3月和8月之间,沉积物中重金属含量居中。上述因素的共同作用形成本研究海域沉积物中重金属含量8月高、3月低的变化格局。

2.4 鱼礁区和对照区重金属含量的差异分析

对鱼礁区4个站位和礁区外6个站位表层沉积物中重金属含量进行统计分析,结果显示,鱼礁区的Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As含量均低于对照区(表6);显现出人工鱼礁对生态环境的调控作用。造成鱼礁区 and 对照区沉积物重金属含量差异的因素较多,就本研究海域而言,沉积物粒径是主要的影响因素。受上升海流的影响,鱼礁区沉积物粒径大于对照区。根据粒级控制规律,沉积物的粒径越大,重金属含量越低,本试验结果符合粒级控制规律,因此鱼礁区的表层沉积物中重金属含量低于对照区。

表6 不同区域沉积物的重金属含量比较 mg/kg
Tab.6 Comparison of heavy metals contents in sediments of different area

区域	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
鱼礁区	1.15	14.53	3.85	0.06	0.13	4.40
对照区	4.23	31.62	8.24	0.10	0.15	7.11

2.5 沉积物重金属潜在生态风险分析

本研究选取威海近海人工鱼礁区沉积物中的Cu、Zn、Pb、Cd、Hg、As作为指标,评价沉积物中重金属对其海洋生态系统的潜在危害。根据选取的评级指标确定各污染因子的分级标准(表7),利用潜在生态风险指数法进行评价。

表7 评价指标与污染程度和潜在生态危害程度的关系
Tab.7 Relationship between evaluation indices and the contamination degree and potential ecological risk

评价指标	数值	污染程度或生态危害	等级
C_f^i	<1	低	I
	1~3	中等	II
	3~6	重	III
	≥6	严重	IV
C_d	<8	低	I
	8~16	中等	II
	16~32	重	III
	≥32	严重	IV
E_r^i	<40	低	I
	40~80	中等	II
	80~160	较重	III
	160~320	重	IV
	≥320	严重	V
RI	<150	低	I
	150~300	中等	II
	300~600	重	III
	≥600	严重	IV

结果表明,4个调查月份全部站位沉积物单项重金属污染系数 C_f^i 均小于1,污染程度属于I级,处于低水平。从总体污染程度指标来判断,各月份重金属总体污染指数 C_d 均小于8,污染程度属于I级,重金属总体污染程度也处于低水平(表8)。

与污染评价结果相似,该海域表层沉积物中各项重金属的 E_r^i 均小于40,属于I级范围,即各项重金属存在低级潜在生态风险,风险程度为: Hg>As>Cd>Pb>Cu>Zn。比较总体潜在生态危害指数 RI 可知,调查月份各站位均小于150,属于I级范围,说明该海域沉积物中重金属总体潜在生态危害轻微水平(表8);重金属总体潜在生态危害程度为: 8月>5月>11月>3月。

表8 表层沉积物重金属总体污染程度指数和总体潜在生态危害指数
Tab.8 Overall pollution index(C_d) and the overall potential ecological risk index(RI) of heavy metals in surface sediments

站 位	C_d				RI			
	3月	5月	8月	11月	3月	5月	8月	11月
R1	0.94	1.45	1.67	1.13	22.42	32.65	35.24	32.54
R2	1.36	1.74	2.06	1.22	30.65	27.13	35.86	29.41
R3	0.94	1.49	1.55	0.99	20.33	33.71	29.68	21.67
R4	0.74	1.50	1.47	0.89	19.09	36.86	34.65	23.49
C1	1.18	1.90	2.18	1.42	24.26	38.86	40.86	30.23
C2	1.61	2.07	2.51	1.82	34.47	37.59	45.67	33.31
C3	1.21	2.06	2.74	1.30	24.43	26.34	42.11	19.19
C4	1.75	2.64	3.08	2.29	37.90	41.44	47.00	47.70
C5	2.03	2.85	3.38	1.79	40.70	42.27	49.97	30.53
C6	2.11	2.26	2.99	2.09	39.76	31.76	42.82	46.97

3 讨论

3.1 沉积物重金属潜在生态风险分析的意义

沉积物是污染物的载体,又是潜在的污染源。沉积物受到污染后会直接或间接地危害底栖生物,且在一定条件下,沉积物中的部分污染物会重新释放到水体中或通过食物链进一步富集,成为潜在的污染源。沉积物具有较难修复性,一旦受到污染或质量退化,其治理和恢复的难度极大。作为海洋环境中污染物的一种,无机污染物重金属由于其环境持久性和生态危害性而成为独特的一类,且污染物在沉积层中的分布有时空上的有序性和相对稳定性,因此对表层沉积物中的重金属污染进行生态危害分析具有重要意义(李玉等,2013)。

3.2 不同研究海域沉积物中重金属含量比较

双岛湾为泻湖湾,口门狭窄,水动力较弱,自净能力较差。主要入海河流包括羊亭河、廆上河、初村

河等。该湾潮汐性质为正规半日潮,潮汐日不等现象不明显。平均潮差为 166 cm,最大潮差为 232 cm,最小潮差为 67 cm。潮流性质属于规则半日潮流,最大涨潮流速为 47 cm/s,最大落潮流速为 50 cm/s。潮流运动形式为典型的往复流,主要分潮流的长轴方向为 NNW 至 SSE。双岛湾的余流较小,流向北,表层和底层流速分别为 5 cm/s 和 3 cm/s (中国海湾志编纂委员会,1991)。

双岛湾不同区域沉积物类型存在一定差异,湾内底质均匀、类型单调,以中细砂-细中砂为主。湾顶附近底质中含有较多的粉砂和粘土质粉砂成分,河口附近粗砂和砂砾的成分明显增多;湾口附近,水动力条件较强,沉积物颗粒较粗,主要为中粗砂(中国海湾志编纂委员会,1991)。本研究海域沉积物类型以砂质为主,包括砾砂、粗砂、中砂和粉砂质砂 4 种类型。

与本研究海域沉积物类型相近的其他海域沉积物中重金属含量(林东年等,2006;蒋增杰等,2008;杨立平等,2010;宁璇璇等,2013;王昕等,2013)进行比较发现(表 9),威海双岛附近海域表层沉积物中 Cu、Zn、Pb、Cd、As 的平均含量低于其他海域,Hg 平均含量高于其他海域。相对而言,2012 年本研究海域表层沉积物中汞含量水平较高,其余 5 项重金属含量水平较低。

表 9 本研究海域沉积物中重金属含量
与其他海域的比较 mg/kg

Tab.9 Comparison of heavy metals contents in surface sediments between surveyed area and other sea areas						
研究海域	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
威海双岛	3.00	24.78	6.48	0.084	0.143	6.03
烟台开发区	17.68	39.56	10.35	0.23	0.060	6.05
威海湾	24.70	54.90	21.90	0.30	0.039	13.60
桑沟湾	12.86	46.43	11.82	0.41	0.020	6.13
青岛小麦岛	17.90	56.50	29.80	0.12	/	/

3.3 沉积物重金属含量与粒径的相关性

有研究表明,沉积物重金属含量与粒径之间存在相关性,沉积物粒径是影响其重金属含量的主要因素之一(刘乃壮,1992;陈静生等,1994;LIN & CHEN,1998;刘俐等,2006;乔永民等,2009;张存勇等,2009)。粗粒样品由于长石、石英等岩石结构物质含量较多,而重金属难以赋存于石英上,来源主要是原生矿物,所以重金属含量较低。细粒样品由于其矿物组成性质的差异和其较大的比表面积,同时富含有机质,通过吸附、沉淀、离子交换等,导致其重金属含量较高。本次研究结果显示,调查站位各项

重金属的含量与沉积物粒径间存在负相关关系,即粒径越大,沉积物中重金属含量越低,反之亦然;另外,本研究海域中鱼礁区沉积物粒径大于对照区,鱼礁区重金属含量低于对照区。本文的结果与上述研究结果一致。

3.4 本研究的不足和有待深入探讨的问题

本文利用 2012 年 4 个月份的调查资料,对双岛湾附近海域人工鱼礁区沉积物中重金属的时空分布及潜在生态风险进行了分析研究,调查资料的时间序列不够长,研究结果具有一定的局限性,人工鱼礁投放对海洋生态环境的调控效果没有充分显现,该海域人工鱼礁区生态环境的变化过程及其机理有待进一步调查与分析;此外,本研究中未考虑双岛湾附近人工鱼礁投放海域重金属的形态、有机碳和酸可挥发硫(AVS)等因素的影响,而金属的生物毒性和生态效应与其赋存的形态密切相关(姜霞等,2010);沉积物中重金属与有机质含量相关性明显(罗冬莲等,2004;张亮等,2012),重金属的生物毒性直接受酸可挥发硫含量的影响(Vanden Berg et al,1998;ZHANG et al,2007;Herbert et al,2009;ZHANG et al,2013);对重金属的污染物来源分析、迁移扩散机制等也未做深入探讨,这方面内容有待更深入的研究。

参考文献

陈静生,王飞越,陈江麟. 1994. 论小于 63 μm 粒级作为水体颗粒物重金属研究介质的合理性及有关粒级转化模型研究[J]. 环境科学学报,12(4):419-424.

国家海洋局. GB 17378-2007. 海洋监测规范[M]. 北京:中国标准出版社.

胡利芳,庄宇君,孙省利,等. 2013. 湛江湾牡蛎养殖区沉积物重金属含量分布与潜在生态危害评价[J]. 轻工科技,(3):15-17.

胡宁静,石学法,刘季花,等. 2011. 莱州湾表层沉积物中重金属分布特征和环境影响[J]. 海洋科学进展,29(1):63-72.

贾振邦,霍文毅. 2000. 应用次生相富集系数评价柴河沉积物重金属污染[J]. 北京大学学报:自然科学版,36(6):808-812.

姜霞,石志芳,刘锋,等. 2010. 疏浚对梅梁湾表层沉积物重金属赋存形态及其生物毒性的影响[J]. 环境科学研究,23(9):1151-1157.

蒋增杰,方建光,张继红,等. 2008. 桑沟湾沉积物重金属含量分布及潜在生态危害评价[J]. 农业环境科学学报,27(1):301-305.

李玉,刘付程,冯志华. 2013. 燕尾港近岸海域表层沉积物重

- 金属的分布与污染评价[J]. 水产科学, 32(9): 516 - 522.
- 林东年, 李德. 2006. 电白大放鸡渔场人工鱼礁投放海域资源环境状况评价[J]. 水土保持研究, 13(3): 258 - 264.
- 刘俐, 宋存义, 熊代群, 等. 2006. 渤海湾表层沉积物重金属在不同粒级有机-矿质复合体中的分布[J]. 环境科学研究, 19(1): 75 - 79.
- 刘乃壮. 1992. 水体初级生产力与影响因子[J]. 水产养殖, (4): 22 - 25.
- 卢璐, 张颖, 赵裕青, 等. 2011. 海州湾人工鱼礁海域沉积物中重金属生态风险的分析[J]. 大连海洋大学学报, 26(2): 126 - 132.
- 罗冬莲, 阮金山, 许翠娅, 等. 2004. 福建主要贝类养殖区表层沉积物重金属和有机质的含量及其相关性[J]. 海洋环境科学, 23(1): 33 - 36.
- 马元庆, 张秀珍, 孙玉增, 等. 2010. 栉孔扇贝对重金属的富集效应研究[J]. 水产学报, 34(10): 1572 - 1578.
- 宁璇璇, 夏炳训, 姜军成, 等. 2013. 烟台开发区近海表层沉积物重金属的分布特征与风险评价[J]. 海洋通报, 32(1): 100 - 106.
- 乔磊, 袁旭音, 李阿梅. 2005. 江苏海岸带的重金属特征及生态风险分析[J]. 农业环境科学学报, 24(增刊): 178 - 182.
- 乔永民, 黄长江. 2009. 汕头湾表层沉积物重金属元素含量和分布特征研究[J]. 海洋学报, 31(1): 106 - 116.
- 王超, 石瑞娟. 2010. 太湖沉积物重金属在不同水动力条件下的迁移规律研究[C]. 第十三届世界湖泊大会论文集: 2422 - 2426.
- 王红, 许强, 杨洪生. 2007. 中国北方海域扇贝重金属含量的比较与质量评价[J]. 海洋科学, 31(9): 11 - 18.
- 王军, 张艳, 苑旭洲, 等. 2012. 双岛湾海域人工鱼礁区水质状况及其季节变化特征[J]. 水生态学杂志, 33(6): 90 - 95.
- 王昕, 乔淑卿, 高晶晶, 等. 2013. 小麦岛附近海域表层沉积物重金属分布特征及环境评价[J]. 海洋通报, 32(3): 287 - 295.
- 徐勇, 马绍赛, 陈聚法, 等. 2012. 大沽河湿地表层沉积物重金属分布特征及污染评价[J]. 农业环境科学学报, 31(6): 1209 - 1216.
- 杨立平, 张学超, 李晓敏, 等. 2010. 威海湾沉积物重金属含量分布及其潜在生态危害评价[J]. 海洋科学, 34(6): 39 - 43.
- 张存勇, 冯秀丽. 2009. 连云港近岸海域沉积物粒度空间分布特征及其分析[J]. 海洋学报, 31(4): 120 - 127.
- 张亮, 任荣珠, 吴凤丛, 等. 2012. 岚山港临时海洋倾倒区表层沉积物重金属污染分布及影响因素分析[J]. 海洋湖沼通报, (1): 130 - 136.
- 张玉凤, 宋永刚, 王立军, 等. 2011. 锦州湾沉积物重金属生态风险评价[J]. 水产科学, 30(3): 156 - 159.
- 张远, 石陶然, 于涛, 等. 2013. 滇池典型湖区沉积物粒径与重金属分布特征[J]. 环境科学研究, 26(4): 370 - 379.
- 周秀艳, 薛向欣, 冷文芳, 等. 2010. 渤海湾秦皇岛段潮间带表层沉积物重金属污染评价[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 31(10): 1437 - 1440.
- 周艳荣, 唐伟, 赵蓓, 等. 2008. 山东威海双岛湾海域营养状态及有机污染状况分析[J]. 海洋通报, 27(3): 115 - 120.
- Hakanson L. 1990. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. Water Res, 14(8): 975 - 1001.
- Herbert E Allen, Gongmin Fu, Baolin Deng. 2009. Analysis of acid volatile sulfide (AVS) and simultaneously extracted metals (SEM) for the estimation of potential toxicity in aquatic sediments[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 12(8): 1441 - 1453.
- LIN J G, CHEN S Y. 1998. The relationship between absorption of heavy metal and organic matter in river sediments[J]. Environment International, 24(3): 345 - 352.
- Vanden Berg G A, Loch J P G, Vander Heijdt L M, et al. 1998. Vertical distribution of acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals in a recent sedimentation area of the river Meuse in the Netherlands[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 34(10): 758 - 763.
- ZHANG Xiangshang, ZHANG Longjun. 2007. Acid Volatile Sulfide and Simultaneously Extracted Metals in Tidal Flat Sediments of Jiaozhou Bay, China[J]. Journal of Ocean University of China (Oceanic and Coastal Sea Research), 6(2): 137 - 142.
- ZHANG Jiping, HU Jiwei, HUANG Xianfei, et al. 2013. Acid volatile sulfide and simultaneously extracted metals in superficial sediments from Baihua Lake, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 31(5): 1079 - 1087.

(责任编辑 万月华)

Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of the Artificial Reef Area near Shuangdao Bay

CHU Yao-yao^{1,2}, ZHANG Yan², XU Yong², ZHANG Xu-zhi², XIA Bin², CHEN Ju-fa², TIAN Tao¹

(1. Dalian Ocean University, Dalian 116023, P. R. China;

2. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory of Fishery Resources and Ecological Environment, Yellow Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, P. R. China)

Abstract: Based on the investigation of surface sediments in the artificial reef area near Shuangdao Bay in March, May, August and November of 2012, the distribution characteristics of heavy metals in surface sediments were analyzed and the ecological risk was assessed by the method of potential risk assessment. The results showed that the average contents of Cu, Zn, Pb, Cd, Hg, As in the artificial reef area were in accordance with the first class standard of the national standard of marine sediment quality (GB18668-2002). In the study area there was a regular distribution of heavy metals, and the contents of heavy metals were lower than those in the neighboring artificial reef area except Hg, which had no obvious difference from that in the neighboring area. Monthly variations were observed in the contents of heavy metals with the highest value in August and the lowest in March. Therefore, the heavy metals pollution around Shuangdao Bay was low and the potential ecological risk of these heavy metals in this area was slight.

Key words: Shuangdao Bay; surface sediment; heavy metals; space-time distribution; potential ecological risk