

# 环渤海典型海湾沉积物重金属 环境特征与污染评价

许 艳,王秋璐,李 潇,杨 璐,黄海燕,陶以军

(国家海洋信息中心,天津 300171)

**摘 要:**对渤海典型海湾近年来沉积物重金属数据分析的结果表明,Hg,Cu,Cd 质量浓度的平均值均超过中国海域的平均值,其中 Hg 和 Cd 超标,高值区主要分布在锦州湾、大连湾附近海域,南堡镇和曹妃甸以南海域以及东营、莱州沿岸海域。地累积指数法的评价结果显示,沉积物重金属 Cd 污染属于轻度污染,其余重金属未发生污染。渤海典型海湾生态危害风险最大的重金属元素为 Cd,Hg 次之,其余 Pb,Cu,As,Cr,Zn 这 5 种重金属均为低生态危害等级。辽东湾海域重金属生态危害风险的顺序为 Cd>Hg>Pb>As>Cu>Zn>Cr;渤海湾海域重金属生态危害风险的顺序为 Cd>Hg>Pb>Cu>As>Cr>Zn;莱州湾重金属生态危害风险的顺序为 Cd>Hg>Pb>As>Cu>Cr>Zn。目前辽东湾沉积物重金属总潜在生态危害程度相对严重,主要分布在长兴岛、秦皇岛至锦州湾沿岸;莱州湾重金属生态危害程度一般,潍坊沿岸部分地区总潜在生态危害程度相对较高;渤海湾重金属污染生态危害程度相对较轻。

**关键词:**沉积物;重金属;分布;污染评价;辽东湾;渤海湾;莱州湾

**中图分类号:**P736.4

**文献标识码:**A

**文章编号:**1671-6647(2017)03-0428-11

**doi:**10.3969/j.issn.1671-6647.2017.03.012

渤海被辽东半岛、华北平原和山东半岛所围绕,沿岸分布辽宁、河北、山东和天津三省一市。环渤海区域位置突出,是国家新一批基础性、战略性产业布局的重要承载区域。渤海作为我国唯一的半封闭性内海,海水交换能力较差,环境承载能力有限,生态环境较为脆弱,近年来由于陆源入海污染物大幅度增加,渤海海洋环境质量急剧恶化<sup>[1]</sup>。

渤海三大海湾辽东湾、渤海湾和莱州湾沿岸地区人口集中,资源丰富,经济发展迅速,大规模的沿海区域经济开发给渤海环境带来严重的陆源污染物排放问题,使得海湾近海海域甚至整个渤海海域的污染危机加重。其中,北部辽东湾沿海主要有大连、营口、盘锦、锦州、葫芦岛五个城市,除丹东市外,辽宁省其余 13 个城市的水系污染物全部输送到辽东湾<sup>[2-3]</sup>;渤海湾沿岸分布有天津、秦皇岛、唐山等多个城市,流入海湾的主要河流有黄河、海河、蓟运河和滦河,陆源污染物排放是渤海湾环境遭受污染的重要原因<sup>[4]</sup>;莱州湾位于渤海南部,山东半岛西北部,全区有黄河、小清河、弥河和胶莱河等大、中型河流 20 多条,沿岸自西向东分布有东营、潍坊、烟台和威海等城市<sup>[5-6]</sup>(图 1)。

海湾水动力环境相对封闭,陆源污染物进入海湾后,主要重金属污染物通过复杂的理化过程进入海底沉积物中,对底栖生物产生一定的毒害作用,并通过食物链影响人类<sup>[7-8]</sup>,同时,吸附在沉积物表面的重金属通过不断的络合和解析过程,可向海水释放污染物形成二次污染,进而影响海水水质的质量和底栖生物的群落结构和组成<sup>[9]</sup>。由沉积物重金属的质量浓度可以判断海底底质受污染的程度,根据重金属质量浓度的水平分布可以追踪其污染源,了解其扩散范围。在某种程度上,近海沉积物重金属质量浓度水平真实地反映了一个地区的环境质量现状<sup>[10-11]</sup>和其动态变化趋势。我们根据近年连续的渤海海洋环境监测数据,总结渤海典

**收稿日期:**2016-05-09

**资助项目:**天津市科技兴海科研项目——天津市海洋灾害风险评估和区划研究(KJXH2013-19)

**作者简介:**许 艳(1988-),女,山东菏泽人,研究实习员,硕士,主要从事海洋生态环境监测与评价方面研究.E-mail:154240535@163.com

(高 峻 编辑)

型海湾(辽东湾、渤海湾和莱州湾)沉积物重金属分布特征,所得结论与实际情况更为吻合;结合海湾重金属的潜在生态风险研究结果,对研究区环境污染程度进行描述分析,为渤海海洋环境质量改善、生态环境保护提供参考依据。

## 1 数据与分析方法

数据来源为 2010—2014 年每年国家海洋局组织沿海省市相关部门开展的海洋环境监测工作中汇交到国家海洋信息中心的全国海洋环境监测资料,据此绘制沉积物站位分布(图 1)。涉及的各项监测指标分析方法(包括样品采集、贮存、运输和现场与实验室分析),均按照《海洋监测规范》第 3 部分<sup>[12]</sup>和第 5 部分<sup>[13]</sup>所规定的方法和质量控制标准执行。

沉积物样品采样时间一般为每年 8 月,主要为采样器在研究区内均匀采集的表层沉积物,用塑料刀或勺从采泥器耳盖中取上部 0~1 cm 或 1~2 cm 的沉积物。如遇砂砾层,可在 0~3 cm 层内混合取样。取 500~600 g 湿样,放入洗净的乙烯袋中,扎紧袋口,供测定 Cu, Pb, Cd, Zn, Cr 及 As 用;取 500~600 g 湿样,盛入 500 mL 磨口广口瓶中,密封瓶口,供测定 Hg 用。沉积物中重金属 Cu, Pb, Cd, Zn, Cr 采用原子吸收分光光度法, Hg 和 As 采用原子荧光法,精确度和准确度参照《海洋监测规范》<sup>[13]</sup>。

对 2010—2014 年表层沉积物重金属数据进行了质量控制:1)删除重复记录;2)删除空间经纬度位于陆地或海岛以及经纬度信息缺失的数据;3)删除采样时间超出项目起止时间以及时间信息缺失的数据;4)删除采样深度信息缺失的数据;5)对相同站位采用沉积物重金属质量浓度多年的平均值。使用德国 Alfred Wegener 研究所研发的海洋数据视图软件(Ocean Data View)的 DIVA gridding 插值方法制作沉积物重金属质量浓度平面分布图。

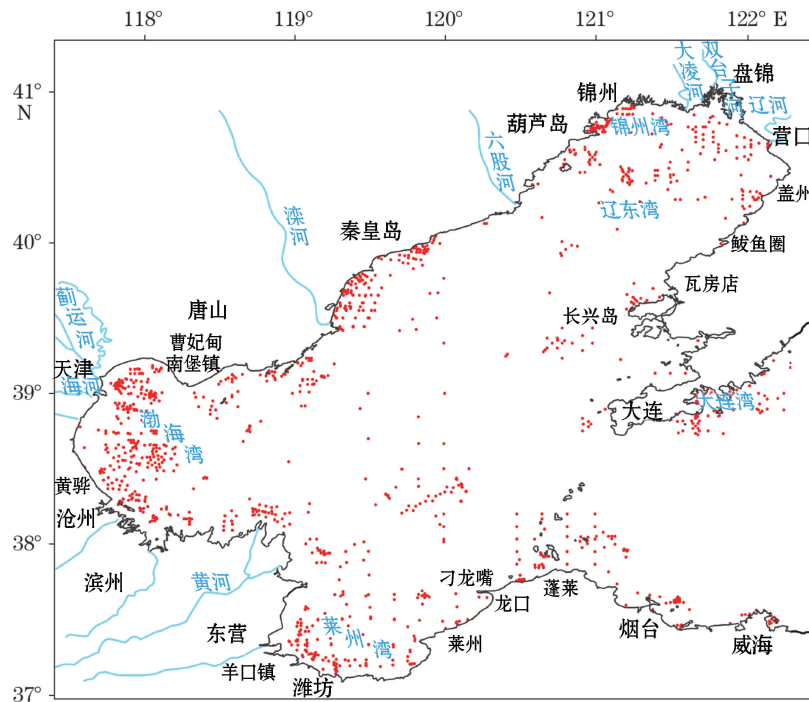


图 1 渤海典型海湾沉积物采样站位分布图

Fig.1 Sampling sites of sediments in the typical bays of the Bohai Sea

## 2 重金属分布特征

### 2.1 辽东湾重金属分布特征

对 2010—2014 年辽东湾海域沉积物重金属质量浓度进行统计(表 1),其中 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 的平均值分别为 0.11,18.4,21.94,0.76,40.61,69.28 和 8.58 mg/L,值域范围分别为 0.001 9~2.720 0,0.24~58.50,1.13~66.10,0.024 5~38.800 0,0.049~188.000,11.40~251.04 和 0.72~40.40 mg/L,除了 Cr 以外,辽东湾沉积物重金属平均值均超过中国海域的平均值;相对 2003 年渤海海域沉积物重金属的平均值,Pb,Cd 和 As 分别大于其相应的均值。其中,Hg 和 Cd 超标严重,最大值分别达到 2.72 和 38.8 mg/L,与林曼曼等研究结论<sup>[14]</sup>一致。辽东湾表层沉积物重金属分布特征:Hg 高值区分布在葫芦岛以南近岸及锦州湾以东海域、盖州近岸和大连湾附近海域;Cu 高值区位于锦州湾、鲅鱼圈和大连湾海域;Pb 高值区位于锦州湾以北大凌河口以西海域;Cd 高值区位于葫芦岛沿岸至大凌河口附近海域、瓦房店和大连附近海域;Cr 高值区位于大凌河口至锦州湾口附近海域、瓦房店沿岸至长兴岛附近海域以及大连沿岸海域;Zn 高值区位于锦州湾和大连湾附近海域;As 高值区位于锦州湾沿岸、盖州沿岸北部及以东海域和长兴岛、大连的南部海域(图 2)。

表 1 环渤海典型海湾沉积物重金属元素质量浓度(mg·L<sup>-1</sup>)

Table 1 Statistics of heavy metal contents in surface sediments in the typical bays of the Bohai Sea(mg·L<sup>-1</sup>)

区 域	元 素	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
辽东湾	最大值	2.720 0	58.50	66.10	38.800 0	188.000	251.04	40.40
	最小值	0.001 9	0.24	1.13	0.024 5	0.049	11.40	0.72
	平均值	0.110 0	18.40	21.94	0.760 0	40.610	69.28	8.58
	标准差	0.240 0	9.49	18.64	2.960 0	29.110	43.38	5.42
	方差	0.060 0	90.08	347.55	8.780 0	847.150	1 881.43	29.33
	变异系数	2.150 0	0.52	0.85	3.950 0	0.720	0.63	0.63
渤海湾	最大值	1.030 00	93.40	44.10	0.450 0	109.000 0	102.30	39.00
	最小值	0.001 08	2.56	2.51	0.013 4	0.069 4	8.47	1.38
	平均值	0.034 40	23.30	18.79	0.170 0	49.950 0	63.40	5.95
	标准差	0.035 40	7.86	4.74	0.082 1	19.290 0	14.50	3.56
	方差	0.001 30	61.79	22.49	0.006 7	372.020 0	224.89	12.69
	变异系数	1.030 00	0.34	0.25	0.490 0	0.390 0	0.24	0.60
莱州湾	最大值	0.250 0	31.50	48.200	5.950 0	50.20	117.46	17.70
	最小值	0.003 5	0.68	1.140	0.011 0	12.50	13.60	1.37
	平均值	0.052 0	14.30	15.510	0.220 0	26.01	45.35	7.29
	标准差	0.056 6	16.97	13.130	0.190 0	6.79	23.93	3.17
	方差	0.003 2	287.95	172.360	0.034 5	46.17	572.44	10.09
	变异系数	1.090 0	1.19	0.850	0.850 0	0.26	0.53	0.44
中国海域 <sup>[14]</sup>	平均值	0.025	15	20	0.065	60	65	7.7
2003 年渤海海域 <sup>[10]</sup>	平均值	0.57	27.21	17.34	0.12	—	98.92	6.66

### 2.2 渤海湾重金属分布特征

渤海湾重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn 和 As 平均值分别为 0.034 4,23.3,18.79,0.17,49.95,63.4,和 5.95 mg/L,值域范围分别为 0.001 08~1.030 00,2.56~93.40,2.51~44.10,0.013 4~0.450 0,0.069 4~109.000 0,

8.47~102.30 和 1.38~39.00 mg/L,渤海湾重金属 Hg,Cu 和 Cd 平均值超过中国海域的平均值;相对 2003 年渤海海域沉积物重金属的平均值,Pb 和 Cd 分别大于其相应的均值。其中,Hg 和 Cd 相对超标严重,最大值分别达到 1.03 和 0.45 mg/L(表 1)。渤海湾表层沉积物重金属分布特征:Hg 高值区位于南堡镇附近以西海域;Cu 高值区位于曹妃甸以南海域;Pb 高值区位于曹妃甸以西的南堡镇附近海域、黄骅市附近海域以及南部湾口附近海域;Cd 值在渤海湾普遍较低;Cr 高值区位于黄骅市附近海域;Zn 高值区主要分布在曹妃甸至南堡镇沿岸海域、渤海湾中部海域以及沧州东南海岸海域;As 高值区位于南堡镇以南海域、黄骅附近及沧州以东海域(图 2)。

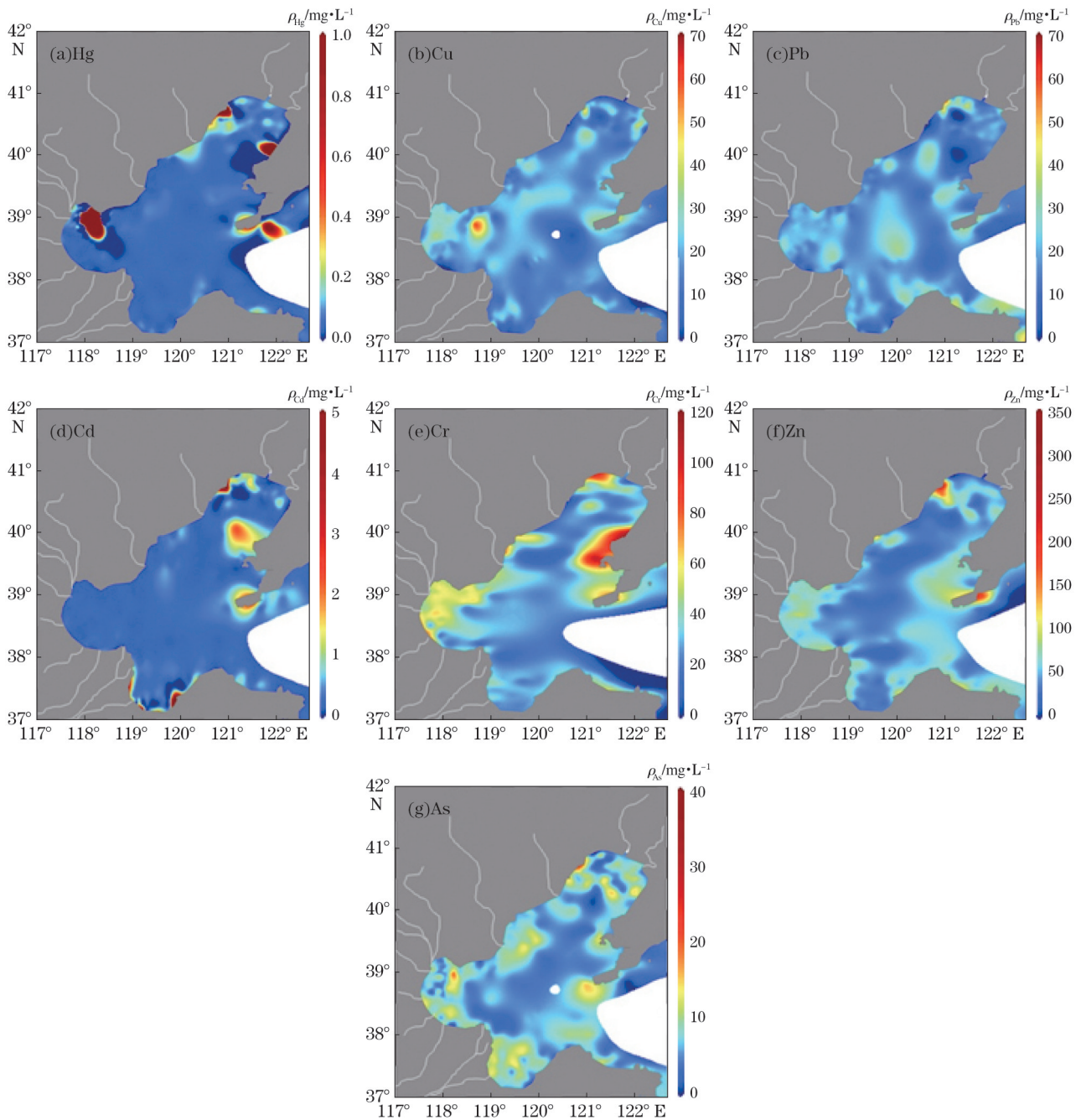


图 2 渤海沉积物重金属质量浓度分布

Fig.2 Distribution of heavy metal contents in surface sediments of the Bohai Sea

### 2.3 莱州湾重金属分布特征

莱州湾的重金属 Hg, Cu, Pb, Cd, Cr, Zn 和 As 的平均值分别为 0.052, 14.3, 15.51, 0.22, 26.01, 45.35 和 7.29 mg/L, 值域范围分别为 0.003 5~0.250 0, 0.68~31.50, 1.140~48.200, 0.011 0~5.950 0, 12.50~50.20, 13.60~117.46 和 1.37~17.70 mg/L, 莱州湾重金属 Hg 和 Cd 平均值超过中国海域的平均值; 与 2003 年渤海海域沉积物重金属的平均值相比, Cd 和 As 分别大于其相应的均值(表 1)。其中, Cd 相对超标严重, 最大值达到 5.95 mg/L。莱州湾表层沉积物重金属分布特征: Hg 值相对渤海其他海湾较低; Cu 仅在东营市羊口镇沿岸分布相对较高值; Pb 高值分布在东营沿岸、龙口至蓬莱沿岸海域; Cd 高值区分布在东营市沿岸海域、湾底部分地区和莱州市刁龙嘴附近海域; Cr 高值分布在东营沿岸地区; Zn 高值分布在东营沿岸和刁龙嘴以北海域; As 高值分布在东营以东至莱州湾中部区域(图 2)。

渤海典型海湾沉积物重金属质量浓度统计结果显示, Hg, Cu, Cd 的平均值均超过中国海域的平均值, 尤其是 Hg 和 Cd; 与 2003 年渤海重金属平均值的对比研究表明, 渤海 3 个海湾 Pb, Cd 和 As 的平均值均有不同程度的增长。其中, Hg, Cu 和 Cd 的高值区主要分布在锦州湾、大连湾附近海域, 南堡镇和曹妃甸以南海域以及东营沿岸海域。Pb 和 As 的高值区主要分布在锦州湾、长兴岛和大连的沿岸海域, 曹妃甸至南堡镇附近海域, 营口以东、莱州至龙口市附近海域。重金属高值分布区主要受物源和沉积物粒度环境影响。辽东湾三面环陆, 水动力交换较弱, 污染排放影响较大。再者辽宁省矿床丰富, 有色金属的开采、冶炼和运输, 为沉积物重金属提供了来源, 例如, 辽东湾西部的锦州湾和凌河口、鲅鱼圈附近主要产 Cu, Pb, Zn 等矿, 使得其附近海域沉积物中相应重金属质量浓度较大, 而且辽东湾高值区的沉积物粒度普遍相对较小<sup>[15-16]</sup>。渤海湾沉积物重金属质量浓度一般, 湾内集中了曹妃甸工业区、天津海岸带大沽口、北塘口等排污口, 对重金属输入有很大影响, 河口附近咸、淡水交汇混合, 有利于吸附了重金属的细颗粒泥沙加速凝聚和沉降<sup>[1, 17-18]</sup>。莱州湾沉积物重金属质量浓度相对较低, 主要受岩石风化的自然源和人为活动影响<sup>[19-22]</sup>。

## 3 环境风险评价

### 3.1 地累积指数法

地累积指数法<sup>[17]</sup>是研究水体沉积物重金属污染评价的一种重要方法, 地累积指数  $I_{geo}$  作为研究水环境沉积物中重金属污染的定量指标, 将沉积物中重金属污染状况划分为 7 个等级(表 2)。计算公式:

$$I_{geo} = \log_2 [\rho_n / (k \times B_n)], \quad (1)$$

式中,  $\rho_n$  是元素  $n$  在沉积物中的质量浓度(mg/L);  $B_n$  是沉积物中该元素的背景值, 分别是 Hg 0.05<sup>[10]</sup>, Cd 0.088<sup>[10]</sup>, Pb 13.96<sup>[10]</sup>, Zn 65.15<sup>[10]</sup>, Cu 22.1<sup>[10]</sup>, Cr 60<sup>[17]</sup>, As 15<sup>[17, 23]</sup>;  $k$  用于校正区域背景差异, 一般取值 1.5<sup>[10, 17, 23]</sup>。

表 2 地累积指数( $I_{geo}$ )与重金属污染级别

Table 2 Pollution grades of heavy metals and their  $I_{geo}$  values

$I_{geo}$	污染程度	级 别	$I_{geo}$	污染程度	级 别
$I_{geo} \leq 0$	清洁	0	$3 < I_{geo} \leq 4$	偏重度	4
$0 < I_{geo} \leq 1$	轻度	1	$4 < I_{geo} \leq 5$	重度	5
$1 < I_{geo} \leq 2$	偏中度	2	$I_{geo} > 5$	极重度	6
$2 < I_{geo} \leq 3$	中度	3			

对渤海典型海湾沉积物重金属  $I_{geo}$  和污染级别统计见表 3。单个重金属  $I_{geo}$  计算结果显示, 渤海典型海湾沉积物重金属 Cd 污染较为严重, 轻度污染; 其余沉积物中重金属未发生污染。辽东湾早期沉积物重金属

Hg, Pb, Cd 和 Zn 出现轻度污染, 随后恢复清洁, 其中 Cd 污染呈现较为明显地逐年减轻的趋势, 这与近年来, 我国将环境保护提到了国家基本政策的高度密切相关, 各级政府针对辽东湾环境污染的现状建成了一批污水处理厂、垃圾填埋场、企业和村庄的污染治理设施, 并进行严格监督管理, 使得各种污染物的排放得到有效的控制<sup>[16]</sup>, 辽东湾各重金属元素污染程度由强到弱依次为 Cd>Hg>Pb>Zn>Cu>As>Cr; 渤海湾仅 Cd 出现轻度污染, 各重金属元素污染程度由强到弱依次为 Cd>Pb>Cu>Zn>Cr>Hg>As; 莱州湾也仅 Cd 出现轻度污染, 各重金属元素污染程度由强到弱依次为 Cd>Pb>Hg>Zn>Cu>As>Cr。

表 3 2010—2014 年渤海典型海湾沉积物重金属  $I_{\text{geo}}$  和污染级别

Table 3 Pollution level of heavy metals and their sediment  $I_{\text{geo}}$  values of typical bays in the Bohai Sea in 2010—2014

年 份	辽东湾 $I_{\text{geo}}$ /级别						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	0.08/1	-0.93/0	0.44/1	2.48/1	-1.53/0	0.99/1	-1.10/0
2011	-0.12/0	-1.15/0	-0.75/0	1.39/1	-1.90/0	-0.93/0	-0.90/0
2012	-0.06/0	-1.30/0	-0.29/0	1.04/1	-1.51/0	-0.86/0	-1.34/0
2013	-0.34/0	-1.07/0	-0.02/0	1.12/1	-1.48/0	-0.74/0	-1.69/0
2014	-0.84/0	-1.00/0	-0.37/0	0.76/1	-1.73/0	-0.70/0	-1.69/0
年 份	渤海湾 $I_{\text{geo}}$ /级别						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	-1.21/0	-0.63/0	-0.22/0	-0.09/0	-1.46/0	-1.19/0	-1.59/0
2011	-1.55/0	-0.59/0	-0.19/0	0.20/1	-0.52/0	-0.50/0	-1.69/0
2012	-1.22/0	-0.61/0	-0.10/0	0.35/1	-0.90/0	-0.62/0	-1.68/0
2013	-1.89/0	-0.79/0	-0.32/0	-0.08/0	-1.28/0	-0.83/0	-2.22/0
2014	-1.67/0	-0.51/0	-0.20/0	0.22/1	-1.35/0	-0.55/0	-2.11/0
年 份	莱州湾 $I_{\text{geo}}$ /级别						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	-1.84/0	-1.72/0	-0.38/0	1.30/1	-1.92/0	-2.21/0	-1.67/0
2011	-0.91/0	-1.61/0	-0.67/0	0.91/1	-2.06/0	-1.86/0	-1.62/0
2012	-0.53/0	-1.54/0	-1.71/0	-1.51/0	-1.77/0	-1.38/0	-1.59/0
2013	-0.93/0	-1.87/0	-0.70/0	0.84/1	-1.59/0	-0.95/0	-2.22/0
2014	-0.80/0	-1.79/0	-0.75/0	0.33/1	-1.78/0	-0.82/0	-1.44/0

### 3.2 潜在生态风险指数法

瑞典学者 Håkanson 于 1980 年提出的潜在生态风险指数法用于综合反映沉积物中重金属污染程度及其对水域生态环境的影响潜力, 此方法是国内外沉积物质量评价中应用较为广泛的方法之一<sup>[23]</sup>。该方法通过测定沉积物样品中的重金属污染含量进行计算, 不仅考虑了沉积物中重金属的毒性, 重金属在沉积物中的转移规律, 以及受评价水体区域对重金属污染的敏感性, 还运用重金属测试结果与区域背景值比较, 以消除区域差异影响。此评价模型中的危害途径主要为水-沉积物-小型水生生物-鱼类-人体<sup>[24-25]</sup>。计算公式为

$$C_f^i = C^i / C_n^i, \quad (1)$$

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

$$RI = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \times C_f^i = \sum_i^m T_r^i \times \frac{C^i}{C_n^i}, \quad (3)$$

式中,  $C_f^i$  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  $i$  的评价参比值, 我们仍采用渤海沉积物中重金属背景值;  $E_r^i$  为金属  $i$  的潜在生态风险系数;  $T_r^i$  为单个金属  $i$  的毒性响应系数, 反映重金属毒

性水平及生物对重金属污染的敏感程度,重金属 Hg,Cu,Pb,Cd,Cr,Zn,As 的毒性响应系数分别取 40,5,5,30,2,1,10<sup>[26]</sup>;RI 为多种重金属潜在生态风险危害指数反映区域总体潜在生态风险危害程度<sup>[27]</sup>。单个沉积物重金属生态危害程度与值域范围关系见表 4。

表 4  $E_i^j$  和 RI 值对应的污染程度及总潜在生态风险程度

Table 4 Corresponding pollution degree and total potential ecological risk degree of  $E_i^j$  and RI

$E_i^j$ 范围	单个污染物生态危害程度	RI 范围	总潜在生态危害程度
$E_i^j < 40$	轻微	$RI < 150$	轻微
$40 \leq E_i^j < 80$	中等	$150 \leq RI < 300$	中等
$80 \leq E_i^j < 160$	强	$300 \leq RI < 600$	强
$160 \leq E_i^j < 320$	很强	$RI \geq 600$	很强
$E_i^j \geq 320$	极强		

对渤海典型海湾沉积物重金属污染的潜在生态风险系数  $E_i^j$  统计见表 5。结果显示,渤海典型海湾生态危害风险最大的沉积物重金属为 Cd,Hg 次之,其余 Pb,Cu,As,Cr,Zn 这 5 种重金属均为低生态危害等级。重金属元素对辽东湾海域生态构成危害风险顺序为  $Cd > Hg > Pb > As > Cu > Zn > Cr$ ,Cd 生态危害程度为很强-强,Hg 生态危害程度为强-中等;渤海湾海域重金属生态危害风险的顺序为  $Cd > Hg > Pb > Cu > As > Cr > Zn$ ,其中 Cd 生态危害程度为中等,Hg 的生态危害程度为轻微-中等;莱州湾重金属生态危害风险的顺序为  $Cd > Hg > Pb > As > Cu > Cr > Zn$ ,其中 Cd 生态危害程度为强-轻微-中等,Hg 的生态危害程度为轻微-中等。随时间变化,辽东湾 Cd 和 Hg 生态危害程度呈逐年减轻的趋势,与近年国家对辽东湾经济发展模式和环保政策的颁布实施密切相关;渤海湾和莱州湾 Cd 生态危害程度变化趋势不明显,Hg 生态危害程度略有加重的趋势,与沿岸工业活动和陆源污染排放的增加息息相关。

表 5 2010—2014 年渤海典型海湾沉积物重金属污染的总潜在生态风险系数  $E_i^j$

Table 6 Potential ecological risk parameter  $E_i^j$  of heavy metals in sediments of typical bays in the Bohai Sea in 2010—2014

年 份	辽东湾 $E_i^j$						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	82.81	5.22	12.13	299.69	1.37	6.15	13.30
2011	74.47	4.13	6.08	239.12	1.59	0.95	10.07
2012	95.21	3.54	8.69	228.11	1.29	1.17	7.50
2013	53.71	4.17	9.20	131.18	1.30	1.09	5.59
2014	46.75	4.18	6.63	111.33	1.32	1.09	5.51
年 份	渤海湾 $E_i^j$						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	30.07	5.08	6.64	43.58	1.27	0.75	4.87
2011	28.96	5.37	6.88	54.43	2.18	1.11	5.40
2012	40.95	5.32	7.19	61.86	1.68	1.01	6.18
2013	20.90	4.82	6.37	50.85	1.41	0.89	3.86
2014	21.47	5.61	6.70	56.96	1.57	1.04	4.19
年 份	莱州湾 $E_i^j$						
	Hg	Cu	Pb	Cd	Cr	Zn	As
2010	21.86	3.71	9.59	150.19	0.81	0.34	5.19
2011	40.72	2.77	5.20	93.95	0.75	0.43	5.48
2012	59.52	3.96	3.50	29.60	0.93	0.62	5.38
2013	39.83	2.39	6.11	97.42	1.03	0.85	3.62
2014	45.34	2.96	5.44	68.75	0.91	0.92	5.80

对渤海典型海湾沉积物重金属总潜在生态危害程度的研究表明,目前辽东湾重金属污染生态危害程度相对严重,在长兴岛复州湾和锦州湾出现重金属总潜在生态危害程度很强和强的等级;在秦皇岛至锦州沿岸的重金属总潜在生态危害程度以中等等级为主,部分地区分布强的等级;在大凌河口和辽河口之间重金属总潜在生态危害程度以轻微等级为主。渤海湾重金属污染生态危害程度相对较轻,曹妃甸沿岸以及黄骅市南部沿岸部分出现重金属总潜在生态危害程度中等等级,其余地区重金属污染生态危害程度为轻微等级。莱州湾重金属生态危害程度一般,潍坊市沿岸地区重金属总潜在生态危害程度以中等为主,莱州市和湾口部分地区总潜在生态危害程度出现中等等级,其余地区以轻微生态危害等级为主。

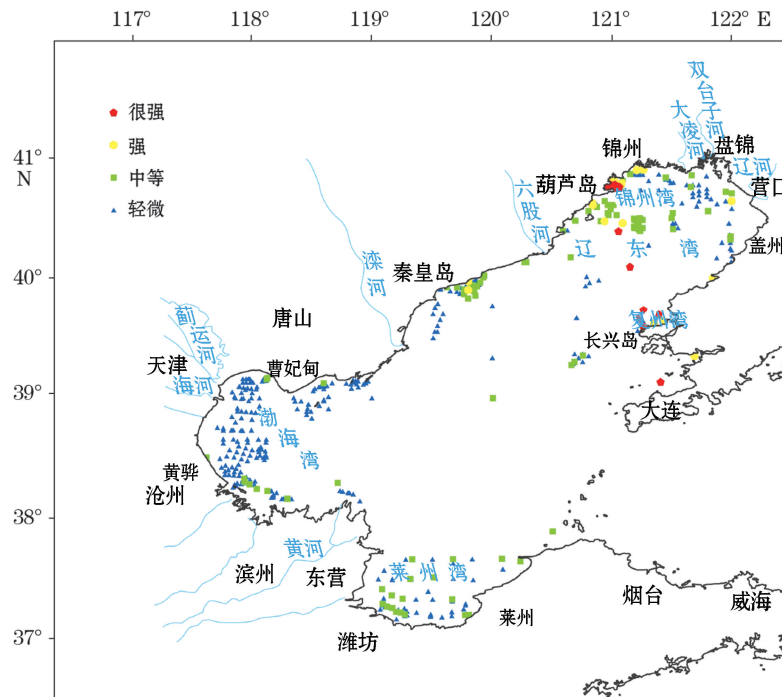


图3 渤海典型海湾沉积物重金属总潜在生态危害程度分布情况

Fig.3 Total potential ecological risk assessment for heavy metals in sediments of the typical bays in the Bohai Sea

## 4 结 论

1)渤海典型海湾沉积物重金属 Hg,Cd 超标严重,高值区主要分布在锦州湾、大连湾附近海域,南堡镇和曹妃甸以南海域,东营、莱州沿岸海域。渤海 3 个典型海湾均为三面环陆,水动力交换较弱,有工业废水排放,尤其是冶金厂的污水排放对沉积物重金属影响较大,其中辽东湾沉积物重金属污染较为严重。国家经济发展和环保政策的颁布与实施抑制、缓解、减轻了海湾沉积物重金属污染。地累积指数法对渤海典型海湾重金属污染程度评价的结果显示,沉积物重金属 Cd 污染较为严重,属于轻度污染,其余重金属未发生污染。辽东湾各重金属元素污染程度由强到弱依次为  $Cd > Hg > Pb > Zn > Cu > As > Cr$ ;渤海湾各重金属元素污染程度由强到弱依次为  $Cd > Pb > Cu > Zn > Cr > Hg > As$ ;莱州湾各重金属元素污染程度由强到弱依次为  $Cd > Pb > Hg > Zn > Cu > As > Cr$ 。

2)渤海典型海湾沉积物重金属污染的潜在生态风险系数研究结果表明,渤海典型海湾生态危害风险最大的沉积物重金属为 Cd,Hg 次之,其余 Pb,Cu,As,Cr,Zn 这 5 种重金属均为低生态危害等级。重金属元素对辽东湾海域生态构成危害风险的顺序为  $Cd > Hg > Pb > As > Cu > Zn > Cr$ ;渤海湾海域重金属生态危害风险的顺序为  $Cd > Hg > Pb > Cu > As > Cr > Zn$ ;莱州湾重金属生态危害风险的顺序为  $Cd > Hg > Pb >$

As>Cu>Cr>Zn。

3)渤海典型海湾沉积物重金属总潜在生态危害程度研究表明,目前辽东湾重金属污染生态危害程度相对严重,总潜在危害程度较高的区域分布在长兴岛复兴湾、秦皇岛至锦州湾沿岸;莱州湾重金属生态危害程度一般,潍坊、莱州沿岸和莱州湾口部分地区总潜在生态危害程度较高;渤海湾重金属污染生态危害程度相对较轻,总潜在危害程度相对较高的区域分布在曹妃甸以及黄骅市南部沿岸。

#### 参考文献(References):

- [1] ZHOU X B, MEI P Y, PENG L L, et al. Contents and potential ecological risk assessment of selected heavy metals in the surface sediments of Bohai Bay[J]. *Ecology and Environmental Science*, 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[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(3): 452-456.
- [2] FANG Z G, MU Y S. Research in the trend of eutrophication in Liaodong Bay of Bohai Sea[J]. *Environmental Protection Science*, 2001, 27(105): 15-17. 方志刚, 穆云使. 渤海辽东湾富营养化的趋势研究[J]. *环境保护科学*, 2001, 27(105): 15-17.
- [3] GAO Y, LIU M Y, TANG Y, et al. Surveys and analysis of marine fishery resources and ecological environment in Liaodong Bay[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2013, 28(2): 211-216. 高音, 刘明勇, 汤勇, 等. 辽东湾渔业资源及生态环境的调查分析[J]. *大连海洋大学学报*, 2013, 28(2): 211-216.
- [4] LIU M, ZHANG A B, LIAO Y J, et al. The environment quality of heavy metals in sediments from the central Bohai Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 100(1): 534-543.
- [5] ZHANG H L, YANG J Q, CUI W L. Status of salinity changes and the effect on marine environments and ecosystem in Laizhou Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2006, 25(Supp.1): 11-14. 张洪亮, 杨建强, 崔文林. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(增1): 11-14.
- [6] WU Y K. Marine environment change trend and management measures of Laizhou Bay[J]. *Ocean Development and Management*, 2011, 28(9): 90-92. 吴云凯. 莱州湾海洋环境变化趋势及管理措施研究[J]. *海洋开发与管理*, 2011, 28(9): 90-92.
- [7] ZHANG X J, ZHAO S, FENG C H, et al. Distribution and accumulation factors of heavy metals in organisms in southern Bohai Bay[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(3): 267-271. 张晓举, 赵升, 冯春晖, 等. 渤海湾南部海域生物体内的重金属含量与富集因素[J]. *大连海洋大学学报*, 2014, 29(3): 267-271.
- [8] LI L Y, WANG Z L, WEI X H, et al. Distribution of dissolved heavy metals in the surface water in the west area of the southern Yellow Sea in winter[J]. *Advances in Marine Science*, 2009, 27(2): 201-209. 李劳钰, 王宗灵, 魏修华, 等. 南黄海西部冬季表层水中的溶解态重金属分布特征分析[J]. *海洋科学进展*, 2009, 27(2): 201-209.
- [9] AN L H, ZHENG B H, ZHANG L, et al. Occurrence of heavy metals in surface sediments from estuaries in Bohai bay and their ecological risk assessment[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(5): 666-670. 安立会, 郑丙辉, 张雷, 等. 渤海湾河口沉积物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(5): 666-670.
- [10] QIN Y W, SU Y B, ZHENG B H, et al. Heavy metals and pollution assessment in surface sediments of Bohai Bay[J]. *Marine Science*, 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.
- [11] HUANG H, OU W H, WANG L S. Semivolatile organic compounds, organochlorine pesticides and heavy metals in sediments and risk assessment in Huaihe River of China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(2): 236-241.
- [12] National Technical Committees of Ocean Standardization. Specification for marine monitoring: Part 3 Sample collection, storage and transportation; GB 17378. 3-2007[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008. 海洋监测规范: 第3部分 样品采集、贮存与运输:GB 17378. 3-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] National Technical Committees of Ocean Standardization. Specification for marine monitoring: Part 5 Sediment analysis;GB 17378. 5-2007[S]. Beijing: Standard Press of China, 2008. 全国海洋标准化技术委员会. 海洋监测规范: 第5部分 沉积物分析:GB 17378. 5-2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] LIN M M, ZHANG Y, XUE C T, et al. Distribution pattern of heavy metals in the surface sediments of the area of Circum-Bohai Bay and ecological environment assessment[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 41-46. 林曼曼, 张勇, 薛春汀. 环渤海海域沉积物重金属分布特征及生态环境评价[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 41-46.
- [15] XU D H, LI J, ZHAO J T, et al. Grain-size distribution of surface sediments of the Liaodong Bay, Bohai and sedimentary environment restoration[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2012, 32(5): 35-42. 徐东浩, 李军, 赵京涛, 等. 辽东湾表层沉积物粒度分布特征及其地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(5): 35-42.

- [16] ZHANG X R, ZHANG Y, YE Q, et al. Environment quality of Liaodong Bay and pollution evolution of heavy metals[J]. *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[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(2): 21-29.
- [17] ZHANG L, QIN Y W, ZHENG B H, et al. Distribution and pollution assessment of heavy metals in sediments from typical areas in the Bohai Sea[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(8): 1676-1684. 张雷, 秦延文, 郑丙辉, 等. 环渤海典型海域潮间带沉积物中重金属分布特征及污染评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(8): 1676-1684.
- [18] LI S Y, MIAO F M, LIU G X, et al. The study of pollution history of heavy metals in Bohai Sea[J]. *Marine Environmental Science*, 1996, 15(4): 28-31. 李叔媛, 苗丰民, 刘国贤, 等. 渤海重金属污染历史研究[J]. *海洋环境科学*, 1996, 15(4): 28-31.
- [19] HU N J, SHI X F, LIU J H, et al. Distributions and impacts of heavy metals in the surface sediments of the Laizhou Bay[J]. *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[J]. *海洋科学进展*, 2011, 29(1): 63-72.
- [20] XU Y D, WEI X, XIA B, et al. Potential ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of the eastern Laizhou Bay[J]. *Advances in Marine Science*, 2015, 33(4): 520-528. 徐艳东, 魏潇, 夏斌, 等. 莱州湾东部海域表层沉积物重金属潜在生态风险评价[J]. *海洋科学进展*, 2015, 33(4): 520-528.
- [21] WANG C Y, WANG X L. Spatial distribution of dissolved Pb, Hg, Cd, Cu and As in the Bohai Sea[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, 19: 1061-1066.
- [22] ZHANG J F, GAO X L. Heavy metals in surface sediments of the intertidal Laizhou Bay, Bohai Sea, China: Distributions, sources and contamination assessment[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 98: 320-327.
- [23] CHEN J L, LIU W X, LIU S Z, et al. An evaluation on heavy metal contamination in the surface sediments in Bohai Sea[J]. *Marine Sciences*, 2004, 28(12): 16-21. 陈江麟, 刘文新, 刘书臻, 等. 渤海表层沉积物重金属污染评价[J]. *海洋科学*, 2004, 28(12): 16-21.
- [24] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control, a sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14: 975-1001.
- [25] TANG Y J. Application of Håkanson index method assessing ecological risk of heavy metal from sediments in the water[J]. *Environmental Science Survey*, 2008, 27(3): 66-68. 唐银健. Håkanson 指数法评价水体沉积物重金属生态风险的应用进展[J]. *环境科学导刊*, 2008, 27(3): 66-68.
- [26] XU Z Q, NI S J, TUO X G, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2): 112-115. 徐争启, 倪师军, 庾先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2): 112-115.
- [27] JIANG H Y, LIU X B, ZHANG Q F, et al. Distribution and risk analysis of heavy metals and As in the surface sediment of Tianjin offshore area[J]. *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[J]. *海洋科学*, 2013, 37(9): 82-89.

## Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Sediments From Typical Bays in the Bohai Sea

XU Yan, WANG Qiu-lu, LI Xiao, YANG Lu, HUANG Hai-yan, TAO Yi-jun

(National Marine Data and Information Service, Tianjin 300171, China)

**Abstract:** The study analyzed the contents of heavy metals in the surface sediments of the typical bays in the Bohai Sea. Compared to the average contents of the China sea, the contents of Hg, Cd, and Cu are relatively higher in the Bohai Sea. Of them, the contents of Cd and Hg reached a hazardous level, and the high-value areas were mainly distributed in the areas around the Jinzhou Bay and Dalian Bay, waters south of Nanpu Town and Caofeidian, and coastal areas of Dongying and Laizhou. The assessment by geoaccumulation index indicates that the Cd is at the slightly polluted level and Hg, Pb, As, Cu, Cr, Zn are at the unpolluted level. The assessment by the potential ecological risk index indicates that the potential ecological risk of Cd is at the highest risk level, and that of Hg is at the higher risk level, and those of Pb, As, Cu, Zn, Cr are at the low level. Heavy metals causing potential ecological risk in sequence is Cd > Hg > Pb > As > Cu > Zn > Cr in Liaodong Bay, Cd > Hg > Pb > Cu > As > Cr > Zn in Bohai Bay, and Cd > Hg > Pb > As > Cu > Cr > Zn in Laizhou Bay. Among the three studied bays, Liaodong Bay is the most seriously polluted area with the high total potential ecological risk, e.g., some parts of the Changxing Island, and the areas from Qinhuangdao to Jinzhou Bay. The risk level of coastal areas of Weifang is higher than that of Laizhou Bay. The heavy metals in surface sediments of Bohai Bay are of light ecological risk.

**Key words:** sediment; heavy metal; distribution; pollution assessment; Liaodong Bay; Bohai Bay; Laizhou Bay

**Received:** May 9, 2016