

烟台港倾倒区表层沉积物重金属的富集特征及风险评价

宁璇璇, 夏炳训, 姜军成, 杨鲁宁, 纪殿胜

(国家海洋局 烟台海洋环境监测中心站, 山东 烟台 264006)

摘要: 分析了 2001~2011 年烟台港倾倒区表层沉积物中 6 种重金属的含量及时空分布特征, 采用地累积指数(I_{geo})和潜在生态风险指数(ERI)对重金属富集现状及潜在生态风险进行评价。结果显示: 历次调查重金属含量均较低且空间分布差异小, 与黄海背景值相比, Cd 和 Cu 出现一定程度的富集。 ERI 评价表明 2011 年倾倒区潜在生态风险性较低, 年际变化顺序为: 2008 年 > 2006 年 > 2009 年 > 2011 年 > 2001 年, Cd 和 Hg 是近年来的主要风险因子。

关键词: 烟台港; 倾倒区; 表层沉积物; 重金属; 富集特征; 生态风险评价

中图分类号: X826 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2013)04-0088-07

烟台港位于山东半岛北侧, 扼守渤海湾口, 隔海与辽东半岛相望, 与日本、韩国一衣带水, 特殊的地理位置使它不仅成为我国海上南北通道的枢纽, 也是贯通日韩至欧洲的重要节点。烟台港倾倒区是为环芝罘湾港口码头建设及航道清淤倾抛疏浚物而设定, 位于烟台港东北方 8.5 n mile, 面积约 4 km², 主要接受来自烟台港及周边小港的 3 类疏浚物, 自 1988 年 1 月启用至今累计倾倒量已超过 $1.1 \times 10^7 \text{ m}^3$ 。

疏浚物的倾抛必将对倾倒区周边海域的生态环境产生危害, 如水深改变、生境破坏及生物资源损失等^[1-3]。港口航道疏浚物往往受到石油类、重金属和有机污染物的污染, 因此需要关注倾倒物沉降后的化学过程及毒害效应^[4]。重金属具有不易分解的特点, 可以通过海洋生物的吸收和摄食进入食物链, 且存在价态转化有逐级放大的可能, 一旦污染将对海洋生态系统和人体健康产生很大危害^[5-6]。Power 等^[7]曾指出重金属对水生生物不仅有“致死、致畸、致突变”效应, 而且构成了类似“定时炸弹”的潜在生态风险。

烟台港倾倒区自启用至今已有 20 余年, 期间进行过几次环境质量变化的跟踪监测, 然而采用的评价方法是以质量标准为参比的单因子指数法, 忽视了环境因子、生物对污染的响应特征等因素, 不能充分说明该区域重金属富集可能存在的危害效应。鉴于此, 本文在分析倾倒区表层沉积物重金属含量变化特征的基础上, 采用地累积指数和生态风险指数法分别对重金属的富积现状及潜在生态风险进行客观评价, 对规范倾倒区使用及港口航道的健康发展

具有重要的现实意义。

1 样品采集与分析

对倾倒区进行监测的采样站位如图 1 所示, 沉积物样品用曙光采泥器(张口面积 0.05 m²)采集, 按照《海洋监测规范》GB17378.5-2007 进行储存、预处理及分析^[8]。称取 0.2 g 烘干样品, 经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解后, 采用日本岛津 AA-6800 型原子吸收分光光度计火焰光谱法测定样品中 Zn 含量; 石墨炉原子吸收光谱法测定样品中的 Cu、Pb、Cd 的含量; 经 $\text{HNO}_3\text{-HCl}$ 体系消解后采用 XGY6080 型原子荧光光度计测定 Hg、As 含量; 分析过程使用近海海洋沉积物标准物质 GBW07314 作内控样进行质量控制。

2 研究方法

2.1 评价与计算方法

2.1.1 空间变化特征评价

采用变异系数^[9]评价重金属的空间变化特征, 变异系数越大表明污染物空间分布越不均匀。计算公式如下:

$$C_v = \frac{S^2}{X} \quad (1)$$

式中 S^2 表示各重金属元素空间序列的标准偏差, X 表

收稿日期: 2012-11-28; 修回日期: 2013-01-23

基金项目: 国家海洋局北海分局海洋科技项目(2012B18)

作者简介: 宁璇璇(1983-), 女, 硕士, 主要从事海洋环境监测与评价研究, E-mail: ningxx05@163.com

示各重金属元素空间序列的平均值。

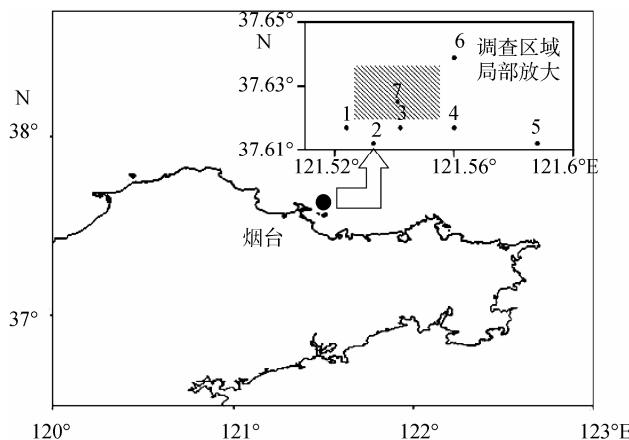


图 1 表层沉积物采样站位(阴影处为倾倒区)

Fig. 1 Sampling stations of Surface Sediments (The shadow shows Yantai Port Ocean Dumping Site)

2.1.2 地累积指数法

地累积指数法是德国科学家 Müller 提出的评价沉积物重金属累积程度的指标^[10], 计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \frac{C_n}{KB_n} \quad (2)$$

式中, C_n 是指沉积物中重金属 n 的实测值; K 是考虑

表 1 地累积指数(I_{geo})与污染分级

Tab. 1 I_{geo} and polluted level of heavy metals

级别	0	1	2	3	4	5	6
I_{geo}	$I_{\text{geo}} < 0$	$0 \leq I_{\text{geo}} < 1$	$1 \leq I_{\text{geo}} < 2$	$2 \leq I_{\text{geo}} < 3$	$3 \leq I_{\text{geo}} < 4$	$4 \leq I_{\text{geo}} < 5$	$I_{\text{geo}} \geq 5$
污染程度	清洁	轻度	偏中度	中度	偏重	严重	极重

表 2 评价指标与污染程度及潜在生态风险的关系

Tab. 2 The relations between evaluation indices, pollution levels and potential ecological risk degrees

C_f^i	单因子污染程度	C_d	综合污染程度	E_r^i	单因子污染生态风险程度	ERI	生态风险程度
< 1	低	< 8	低	< 40	低	< 150	低
1~3	中等	8~16	中等	40~80	中等	150~300	中等
3~6	重	16~32	重	80~160	较重	300~600	较重
≥ 6	严重	≥ 32	严重	160~320 ≥ 320	重 严重	≥ 600	严重

2.2 参数确定

2.2.1 参比值确定

由于背景值的选定无统一标准, Hakanson^[11]选取现代工业化前沉积物重金属的最高背景值为参比

到造岩运动可能引起的背景值波动而设定的常数,通常取 1.5; B_n 是指在沉积母质中元素 n 的地球化学背景值。依据地质累积指数(I_{geo})将重金属富集程度划分为 7 个等级(表 1)。

2.1.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险评价指数法是瑞典学者 Hakanson 建立的应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法^[11], 计算公式为:

$$C_f^i = \frac{C^i}{C_n^i} \quad (3)$$

$$C_d = \sum_{i=1}^n C_f^i \quad (4)$$

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i \quad (5)$$

$$ERI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i C_f^i) \quad (6)$$

式中, C^i 为重金属元素 i 的实测值; C_n^i 为污染物 i 的背景浓度; C_f^i 为污染物的单因子污染指数; C_d 为重金属的总体污染程度; T_r^i 为污染物 i 的毒性响应系数; E_r^i 为重金属 i 的潜在生态风险系数; ERI 为沉积物中多种污染物的潜在生态风险指数。各评价指标相应的污染程度分级见表 2。

值, 何孟常等^[12]采用当地沉积物重金属背景值作参比。由于区域背景差异性, 为了避免采用大尺度平均值产生的偏差, 本文选取黄海沉积物中重金属的背景值^[13]作参比来评价烟台港倾倒区表层沉积物中重金属的综合污染情况, 见表 3。

表 3 重金属的背景浓度值及毒性响应系数

Tab. 3 The background level and toxicity response factor of heavy metals

参数	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
$C_n^i (10^{-6})$	10.52	66.1	20.27	0.053	0.092	16.6
T_r^i	5	1	5	30	40	10

2.2.2 毒性系数 T_r^i 的确定

毒性响应系数反映了污染物的毒性水平及生物体的敏感程度, 揭示了重金属对人体和水生生态系统的危害性^[11], T_r^i 值见表 3。

3 结果与讨论

3.1 烟台港倾倒区表层沉积物重金属含量的时空变化

根据 2001~2011 年对烟台港倾倒区的跟踪监测结果, 表 4 列出了表层沉积物重金属各元素的浓度值, 其中 2001 年和 2006 年的调查仅监测了其中 2 个站位的沉积物质量, 因此只列出平均值。依据《海洋沉积物质量标准》(GB18668-2002)^[14], 除 2008 年 Cd

含量(最大值)出现超标外, 其他重金属测值均小于 I 类标准值, 表明该区域沉积物环境质量状况较好, 重金属污染程度较低。图 2 显示了 4 种金属元素含量(平均值)的年际变化特征, 其中 Cu 与 Hg 的变化趋势相似, 最高值均出现在 2008 年; Cd 含量在 2008 年升至最大后呈现下降趋势; Pb 浓度 2008 年降至最低后稍有增长; 与 2008 年相比, Zn 含量在 2011 年有所升高, As 含量降低。重金属含量的变动可能与疏浚物的污染状况及倾抛量有关。重金属含量的空间变化特征采用变异系数 C_v 来评价, 由于 2001 和 2006 年的调查只监测了 2 个站位的沉积物质量, 因此不予考虑, 2008、2009 和 2011 年的计算结果见表 5。可以看出, 3 次调查中评价区域各金属浓度的变异系数均小于 0.50, 表明污染物的空间分布差异不大。

表 4 2001~2011 年烟台港倾倒区沉积物表层重金属含量的特征值

Tab. 4 The heavy metal contents in surface sediments of Yantai port Ocean Dumping Site from 2001 to 2011

年份	测定值	元素质量分数(10^{-6})					
		Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
2001	平均值	10.39	—	25.54	0.0075	0.0071	—
2006	平均值	12.5	—	14.2	0.34	0.047	—
	最大值	33.37	72.84	17.09	0.58	0.11	18.19
2008	最小值	13.67	39.10	8.04	0.27	0.03	13.41
	平均值	19.61	53.94	11.20	0.48	0.07	15.96
	最大值	15.30	—	16.10	0.28	0.04	—
2009	最小值	12.70	—	13.20	0.22	0.02	—
	平均值	14.00	—	14.46	0.25	0.03	—
	最大值	27.90	79.70	27.40	0.21	0.06	8.89
2011	最小值	12.20	48.60	11.10	0.08	0.03	4.39
	平均值	16.91	65.29	15.39	0.13	0.05	7.78
GB18668-2002 I 类值		35.00	150.00	60.00	0.50	0.20	20.00

3.2 地累积指数评价

将 2011 年的监测数据带入公式(2)计算各金属元素的地累积指数, 结合表 1 进行 I_{geo} 污染分级, 结果见表 6。可以发现, 除了 Cd 和 Cu 以外, 其他重金属在所有站位均未超过背景值; Cd 以轻度污染为主, 在 2 号和 6 号站位出现偏中度污染; Cu 在 2 号、4 号、6 号和 7 号站位出现轻度污染现象, 其他站位保持清

洁状态。各重金属元素污染严重程度依次为: Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > As。

3.3 污染指数分析

将 2011 年的监测数据带入公式(3)和(4)计算各金属元素的单因子污染指数和综合污染指数, 结果见表 7。从 C_f^i 来看, Cd 污染状况最为严重, 在 2 号和 6 号站位出现重污染现象, 其余站位处于中等污染;

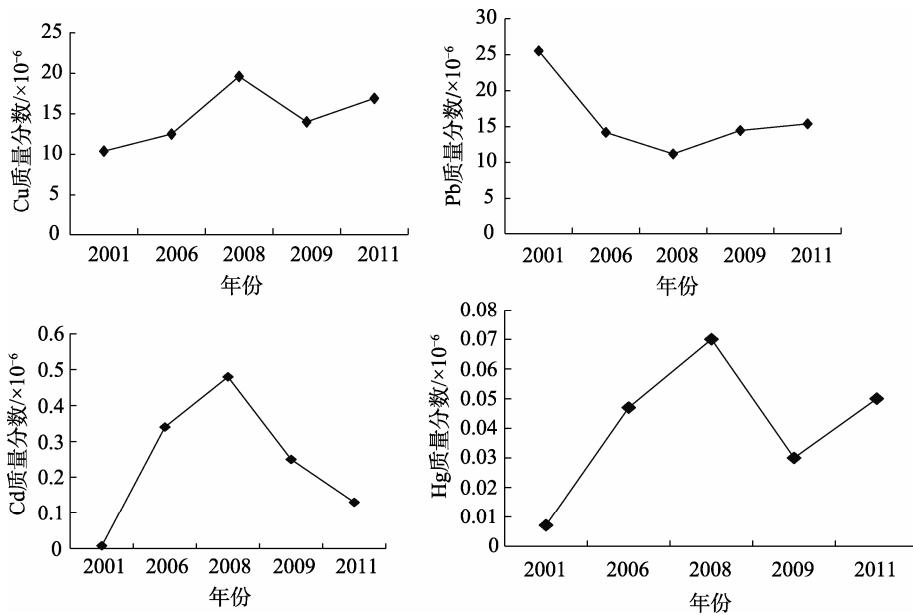


图 2 倾倒区表层沉积物重金属含量的时间变化特征

Fig. 2 Temporal variance of heavy metals in surface sediments of Yantai port Ocean Dumping Site

表 5 烟台港倾倒区表层沉积物重金属浓度变异系数

Tab. 5 The coefficient of variation of heavy metals in surface sediments of Yantai Port Ocean Dumping Site

年份	元素					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
2008	0.32	0.21	0.22	0.23	0.41	0.09
2009	0.08	-	0.09	0.09	0.33	-
2011	0.31	0.19	0.38	0.37	0.25	0.2

表 6 表层沉积物重金属的地累积指数评价

Tab. 6 I_{geo} of heavy metals in surface sediments of Yantai Port Ocean Dumping Site

站位	元素					
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As
1 (0, 清洁)	-0.37	-1.03	-1.43	0.18	-2.35	-2.50
	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
2 (1, 轻度)	0.82	-0.32	-0.15	1.40	-1.15	-1.49
	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(2, 偏中度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
3 (0, 清洁)	-0.14	-0.64	-1.32	0.59	-1.28	-1.59
	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
4 (1, 轻度)	0.11	-0.96	-1.08	0.82	-1.38	-1.50
	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
5 (0, 清洁)	-0.23	-0.62	-1.19	0.01	-1.30	-1.67
	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
6 (1, 轻度)	0.12	-0.33	-0.76	1.18	-1.52	-1.55
	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(2, 偏中度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
7 (1, 轻度)	0.05	-0.49	-1.45	0.33	-1.82	-1.67
	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)
均值	0.05	-0.63	-1.05	0.64	-1.54	-1.71
	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)	(1, 轻度)	(0, 清洁)	(0, 清洁)

表 7 表层沉积物重金属的单因子污染指数分析

Tab. 7 The results of single factor evaluation on heavy metal pollution in surface sediments of Yantai Port Ocean Dumping Site

站位	单因子污染指数 C_f^i						综合污染指数 C_d	污染程度分级
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As		
1 (中等)	1.16 (低)	0.74 (低)	0.56 (低)	1.70 (中等)	0.29 (低)	0.26 (低)	4.71	低
2 (中等)	2.65 (中等)	1.21 (中等)	1.35 (中等)	3.96 (重)	0.67 (低)	0.54 (低)	10.38	中等
3 (中等)	1.36 (低)	0.96 (低)	0.60 (低)	2.26 (中等)	0.62 (低)	0.50 (低)	6.30	低
4 (中等)	1.62 (低)	0.77 (低)	0.71 (低)	2.64 (中等)	0.58 (低)	0.53 (低)	6.85	低
5 (中等)	1.28 (低)	0.97 (低)	0.66 (低)	1.51 (中等)	0.61 (低)	0.47 (低)	5.50	低
6 (中等)	1.63 (中等)	1.20 (中等)	0.89 (低)	3.40 (重)	0.52 (低)	0.51 (低)	8.15	低
7 (中等)	1.55 (中等)	1.07 (中等)	0.55 (低)	1.89 (中等)	0.42 (低)	0.47 (低)	5.95	低
均值	1.61 (中等)	0.99 (低)	0.76 (低)	2.48 (中等)	0.53 (低)	0.47 (低)	6.83	低

Cu 在所有站位均处于中等污染水平; Zn 在 2 号、6 号和 7 号站位出现中等污染, 其余站位仍处于低污染; Pb、Hg 和 As 在所有站位均处于低污染水平。各金属元素的平均污染程度排序依次为: Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > As。从 C_d 来看, 除了 2 号站位的污染指数大于 8, 处于中等污染外, 其他站位均处于低污染水平。

表 8 表层沉积物重金属潜在生态风险系数及风险指数

Tab. 8 The potential ecological risk factors and indices of heavy metal pollution in surface sediments of Yantai Port Ocean Dumping Site

站位	单因子潜在生态风险系数 E_r^i						综合潜在生态风险评价指数 ERI	生态风险分级
	Cu	Zn	Pb	Cd	Hg	As		
1 5.80(低)	0.74(低)	2.79(低)	50.94 (中等)	11.74(低)	2.64 (低)	74.65	低	
2 13.26(低)	1.21(低)	6.76(低)	118.87 (较重)	26.96(低)	5.36 (低)	172.40	中等	
3 6.80(低)	0.96(低)	3.01(低)	67.92 (中等)	24.78(低)	4.97 (低)	108.45	低	
4 8.08(低)	0.77(低)	3.55(低)	79.25 (中等)	23.04(低)	5.30 (低)	119.99	低	
5 6.42(低)	0.97(低)	3.28(低)	45.28 (中等)	24.35(低)	4.70 (低)	85.00	低	
6 8.17(低)	1.20(低)	4.44(低)	101.89 (较重)	20.87(低)	5.13 (低)	141.69	低	
7 7.75(低)	1.07(低)	2.74(低)	56.60 (中等)	16.96(低)	4.72 (低)	89.84	低	
均值	8.04(低)	0.99(低)	3.80(低)	74.39 (中等)	21.24(低)	4.69 (低)	113.15	低

3.4 潜在生态风险评价

将上述结果带入公式(5)和(6), 得到重金属潜在生态风险系数 E_r^i 和风险指数 ERI 两项指标, 见表 8。从单个金属元素的潜在生态风险来看, Cd 具有中等偏重的潜在生态风险, 其他几种金属均为低风险, 排序依次为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Zn, 这与前述

I_{geo} 和 C_f^i 计算结果的排列顺序有所差别, 原因是风险评价中考虑了重金属的生物毒性效应因素, 能够反映研究区域的潜在生态危害性。从总体上看, 生态风险性最高的站位为 2 号站, 其 ERI 值位于 150~300 范围内, 风险等级处于中等; 其他站位的 ERI 均小于 150, 处于低风险水平。用单个金属的 E_r^i 均值除以 ERI 均值来计算各金属的贡献率, 其中 Cd 和 Hg 分别为 65.7% 和 18.7%, 两者之和共占 ERI 的 84.5%, 可以看出 Cd 和 Hg 为该倾倒区的主要风险因子。

3.5 重金属潜在生态风险年际变化趋势分析

图 3 给出了倾倒区表层沉积物重金属 ERI 的年际变化及各重金属元素所贡献的比例。ERI 的年际变化顺序为: 2008 年 > 2006 年 > 2009 年 > 2011 年 > 2001 年, 2008 年的 ERI 值为 324.65, 属于较重级别的潜在生态风险; 2006 年和 2009 年 ERI 值介于 150~300, 为中等程度; 2001 年 ERI 为 18.57, 基本无生态风险。5 次调查中各金属元素 E_r^i/ERI 排序分别为: Pb > Cu > Cd > Hg(2001 年, 无风险); Cd(86.6%) > Hg(9.2%) > Cu > Pb(2006 年); Cd(83.7%) > Hg(9.4%) > As > Cu > Pb > Zn(2008 年); Cd(85.9%) > Hg(7.9%) > Cu > Pb(2009 年); Cd(65.7%) > Hg(18.7%) > Cu > As > Pb > Zn(2011 年)。结合前述重金属含量变化可以看出, 在 2001~2006 的 5 年间 Cd 成为该倾倒区潜在生态风险最大的金属元素, 原因不仅是 Cd 的含量明显增高(2006 年 Cd 浓度是 2001 年的 45 倍), 而且 Cd 对生物体具有很强的毒性效应。Hg 的含量虽未超过沉积物 I 类质量标准, 但由于具有极强的生物毒性, 因此其潜在生态危害性亦不容忽视。有的金属具有亲

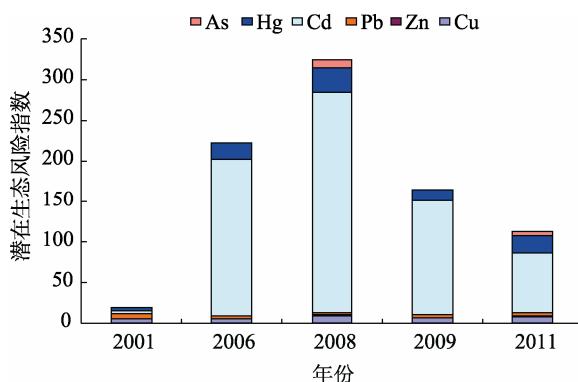


图 3 烟台港倾倒区表层沉积物重金属 ERI 的年际变化趋势
Fig. 3 ERI inter-annual variation of heavy metals in surface sediments of Yantai port Ocean Dumping Site

颗粒性^[15], 例如 Pb, 易随悬浮物迁移进入沉积物中矿化埋藏, 从而导致毒性减小及生态系统潜在危害的降低。

4 结论

综合 2001~2011 年烟台港倾倒区 5 次跟踪监测结果, 发现除了 2008 年个别站位 Cd 含量出现超标现象外, 其余金属元素的浓度均低于 I 类标准, 污染程度低且空间分布差异不大, 沉积物质量状况较好。

I_{geo} 评价结果表明, 与黄海沉积物重金属背景值相比, 调查区域表层沉积物除了 Cd 和 Cu 以外, 其他重金属均未超过背景值。Cd 以轻度污染为主, 2、6 号站位出现偏中污染; Cu 在 2、4、6、7 号站位出现轻度污染现象, 其他站位保持清洁状态。各重金属元素污染严重程度依次为: Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > As。

C_f^i 计算表明, Cd 污染状况较为严重, 在 2、6 号站位出现重污染现象, 其余站位处于中等污染; Cu 处于中等污染水平; Zn 在 2、6、7 号站位出现中等污染; 其余元素均为低污染。 C_f^i 排序与 I_{geo} 评价结果相同, 为: Cd > Cu > Zn > Pb > Hg > As。从 Cd 来看, 除了 2 号站位处于中等污染外, 其他站位均为低污染。

从 E_r^i 角度分析, 各金属元素的潜在危害程度排序依次为: Cd > Hg > Cu > As > Pb > Zn, Cd 和 Hg 是该倾倒区海域主要风险因子。除 2 号站位风险等级为中等外, 其他站位均为低风险。

ERI 变化趋势表明, 该倾倒区潜在生态风险现状较 2008 年有所降低, 但与倾倒初期相比, 由于疏浚物的多年倾抛已经造成了一定的风险性存在, 需要加强管理和监督, 尤其是 Cd 和 Hg。

从上述分析可以看出, 地质累积指数 I_{geo} 与污染指数 C_f^i 的计算方法都是基于重金属实测值与区域背景值的比较得出的, 因而得出的评价结果具有相对一致性: 金属元素污染程度的排序相同, 仅由于分级标准不同而使污染等级的划分出现一定的差异。潜在生态风险指数法综合考虑重金属毒性、迁移转化规律及评价区域敏感性等因素, 结果能够反映出重金属元素的潜在生态风险性。但由于没有充分考虑沉积物的地质特征(氧化还原条件、粒径分布)、上覆水的化学特性(pH、盐度、有机质含量)、

水动力条件等因素，因此也具有一定局限性。进一步的研究还需要结合其他方法如毒理学试验、底栖生境损害评估等，才能更准确评价沉积物的质量^[16-17]。

参考文献：

- [1] Roberts R D, Forrest B M. Minimal impact from long-term dredge spoil disposal at a dispersive site in Tasman Bay, New Zealand [J]. Marine and Freshwater Research, 1999, 33: 623-633.
- [2] Stronkhorst J, Ariese F, Van Hattumb B, et al. Environmental impact and recovery at two dumping sites for dredged material in the North Sea [J]. Environmental Pollution, 2003, 124: 17-31.
- [3] Radenac G, Miramand P. Search for impact of a dredged material disposal site on growth and metal contamination of *Mytilus edulis*(L.) in Charente Maritime [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, 34(9): 721-729.
- [4] Igor L, Katherine E, Dmitriy B, et al. Uncertainty and variability in risk from trophic transfer of contaminants in dredged sediments [J]. The Science of the Total Environment, 2001, 274: 255-269.
- [5] Eisler R. Trace metal concentrations in marine organism [M]. New York: Pergamon Press, 1981.
- [6] 王文雄, 潘进芬. 重金属在海洋食物链中的传递[J]. 生态学报, 2004, 24(3): 599-604.
- [7] Power E A, Chapman P M. Assessing sediment quality[M]// Burton G A .Sediment toxicity assessment. Boca Raton: Lewis-Publishers, 1992.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 17378.5-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [9] 王宪, 李文权, 张钒. 厦门市港湾沉积物质量现状和评价[J]. 海洋环境科学, 2002, 21(1): 57-59.
- [10] Müller G. Index of geo-accumulation in sediments of the Rhine River [J]. GEO Journal, 1969, 2: 108-118.
- [11] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [12] 何孟常, 王子健, 汤鸿霄. 乐安江沉积物重金属污染及生态风险性评价[J]. 环境科学, 1999, 20(1): 8-10.
- [13] 王菊英, 马德毅, 鲍永恩, 等. 黄海和东海海域沉积物的环境质量评价[J]. 海洋环境科学, 2003, 22(4): 21-25.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 18668-2002 海洋沉积物质量 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [15] 贾振邦, 梁涛. 香港河流重金属污染及其潜在生态危害研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 1997, 33(4): 185-192.
- [16] Chapman P M, Wang P Y. Appropriate applications of sediment quality values for metals and metalloids[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(22): 3937-3941.
- [17] Miller B S, Pirie D J, Redshaw C J. An assessment of the contamination and toxicity of marine sediments in the Holy Loch, Scotland[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(1): 22-35.

Enrichment and risk assessment of heavy metals in surface sediments of Yantai Port Ocean Dumping Site

NING Xuan-xuan, XIA Bing-xun, JIANG Jun-cheng, YANG Lu-ning, JI Dian-sheng
(Yantai Oceanic Environmental Monitoring Central Station of State Oceanic Administration, Yantai 264006, China)

Received: Nov.,28,2012

Key words: Yantai Port; dumping site; surface sediments; heavy metals; enrichment degree; ecological risk assessment

Abstract: Based on the monitoring data of Yantai Port Ocean Dumping Site from 2001 to 2011, the contents and distribution of heavy metals in surface sediments were analyzed, and the enrichment degree and potential ecological risk were assessed using I_{geo} and ERI . It was found that the concentrations of heavy metals in the surface sediments were relatively low and the spatial distribution varied slightly. Compared with the background values of the Yellow Sea, cadmium and copper appeared a certain extent accumulation. ERI assessment indicated that the ecological risk of year 2011 was slight and the annual variation trend was 2008 > 2006 > 2009 > 2011 > 2001. Additionally, cadmium and mercury were key factors of the potential ecological risk in the dumping site.

(本文编辑: 梁德海)