

胶州湾外海洋倾倒区表层沉积物中的重金属及其潜在生态风险

张乃星¹, 曹丛华¹, 任荣珠¹, 孙旭², 林森¹, 张绍萍¹, 吴凤从¹, 孙滨¹

(1. 国家海洋局北海预报中心, 青岛 266033; 2. 滨州技术学院, 滨州 256600)

摘要:依据 2003 ~ 2008 年 6 a 间所获得的胶州湾外海洋倾倒区沉积物重金属 (Cr、Hg、Cd、Pb、Zn、Cu) 的调查数据, 重点分析了 2007 年 8 月倾倒区重金属的分布特征和影响因素, 并对重金属的潜在生态风险及 6 a 的年际变化趋势进行了初步的分析评价. 结果表明, 2007 年 8 月调查海域沉积物表层中 Cr、Hg、Cd、Pb、Zn、Cu 的平均浓度 (干重) 分别为 29.47、0.065、0.105、1.145、9.63、3.355 $\mu\text{g/g}$. 除 Cr 之外, 表层沉积物中重金属的分布均呈现出倾倒区内含量高、倾倒区外部含量低的分布特征, 这说明疏浚物的倾倒是该海区重金属污染的主要来源. 有机碳与重金属 (Cr 除外) 关系密切, 二者呈一定的正相关关系. 2007 年倾倒区表层沉积物中重金属除 Hg 具有中等潜在生态风险外, 其它均为低潜在生态风险, 风险指数低于 40. 6 a 间, 该倾倒区沉积物中各种重金属含量 (Hg 除外) 在小范围内波动并呈一定的下降趋势, 重金属总体生态风险程度处于低潜在生态风险, 这从重金属角度说明倾倒区沉积物质量良好.

关键词:胶州湾; 倾倒区; 沉积物; 重金属; 生态风险

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1315-06

Heavy Metals in the Surface Sediment of the Dumping Ground Outside Jiaozhou Bay and Their Potential Ecological Risk

ZHANG Nai-xing¹, CAO Cong-hua¹, REN Rong-zhu¹, SUN Xu², LIN Sen¹, ZHANG Shao-ping¹, WU Feng-cong¹, SUN Bin¹

(1. North China Sea Marine Forecasting Center of State Ocean Administration, Qingdao 266033, China; 2. Binzhou Technical College, Binzhou 256600, China)

Abstract: Based on the monitoring data of heavy metals (Cr, Hg, Cd, Pb, Zn, Cu) in the surface sediment of the dumping ground outside Jiaozhou Bay from 2003 to 2008, the distribution patterns, factors controlling the distribution, and the potential ecological risks of heavy metals were studied with the data in 2007-08, and the fluctuation trends of heavy metals in the surface sediment over the 6 years were also discussed. The average concentrations of heavy metals Cr, Hg, Cd, Pb, Zn, Cu in the surface sediment were 29.47, 0.065, 0.105, 1.145, 9.63, 3.355 $\mu\text{g/g}$, respectively. Except for Cr, the concentration of heavy metals was high in the central dumping area while low outside the dumping ground, suggesting that the dredged material dumped was the main source of heavy metals. Organic carbon content in the surface sediment had a significant positive correlation with heavy metals except for Cr. Based on the results of ecological risk assessment, Hg had a medium potential ecological risk, while the other heavy metals had low potential ecological risk. The overall risk index (RI) of the heavy metals was 100.50, which was considered as a level of low potential ecological risk. The average concentration of heavy metals showed a decreasing trend over the 6 years, except Hg. In conclusion, the quality of surface sediment in term of heavy metals in the dumping ground outside Jiaozhou Bay is relatively good.

Key words: Jiaozhou Bay; dumping ground; sediment; heavy metal; ecological risk

海洋倾倒区是用来倾倒固体废弃物的特殊功能海域, 疏浚物的海上倾倒会对倾倒区环境产生一定的影响. 近年来, 因港湾开发、航道疏浚, 使疏浚物向海上倾倒的数量急剧增加, 其已成为全球性关注的环境问题^[1]. 受到工业废水和城市污水的影响, 港湾航道疏浚物往往不同程度地被营养盐、重金属及持久性有机物污染, 其中, 重金属污染尤其受到关注. 国际及国内对海洋倾倒区沉积物中的重金属污染从含量分布特征、来源、评价等方面进行了大量的研究^[2~5], 但是, 由于缺乏系统、连续的数据, 以往研

究大部分集中在重金属的分布及污染程度评价方面^[6], 缺乏对年际变化的分析. 为了对青岛胶州湾外海洋倾倒区生态环境有一个更全面的了解, 并探讨其生态环境演变趋势, 从 2003 年开始, 青岛海洋

收稿日期: 2010-05-25; 修订日期: 2010-07-12

基金项目: 国家海洋局海洋生态环境科学与工程重点实验室开放基金项目 (MESE-2008-07); 中国科学院海洋生态与环境科学重点实验室基金项目 (KLMEES201003); 国家海洋局青年海洋科学基金项目 (2010503); 国家海洋局北海分局海洋科技立项项目 (2010A01)

作者简介: 张乃星 (1980 ~), 男, 博士, 主要研究方向为海洋环境化学, E-mail: zhangnaix@ mails. gucas. ac. cn

环境监测中心站每年定期定点对倾倒区进行综合调查,共监测有关环境和生态因子 28 项.本研究依据对胶州湾外海洋倾倒区从 2003 ~ 2008 年连续 6 a 的监测数据,重点分析了 2007 年沉积物中重金属的分布模式,并结合以往的调查数据,首次阐述了该倾倒区重金属的分布状况、生物地球化学影响因素及其潜在生态风险程度,以期为海洋倾废的研究和海洋环境质量评价提供科学依据,为评估疏浚物海上倾倒对海洋生态环境影响,探讨倾倒区生态环境的

演变趋势提供依据.

1 材料与方法

1.1 站位布设

青岛胶州湾外疏浚物海洋倾倒区位于胶州湾口外,黄岛区的薛家岛东侧,包含了大、小桥岛在内的 35°59'24" ~ 35°58'39"N, 120°18'00" ~ 120°20'00"E 范围之内海域,面积约 7 km²,平均水深 22 m,监测站位布设及倾倒区位置见图 1.

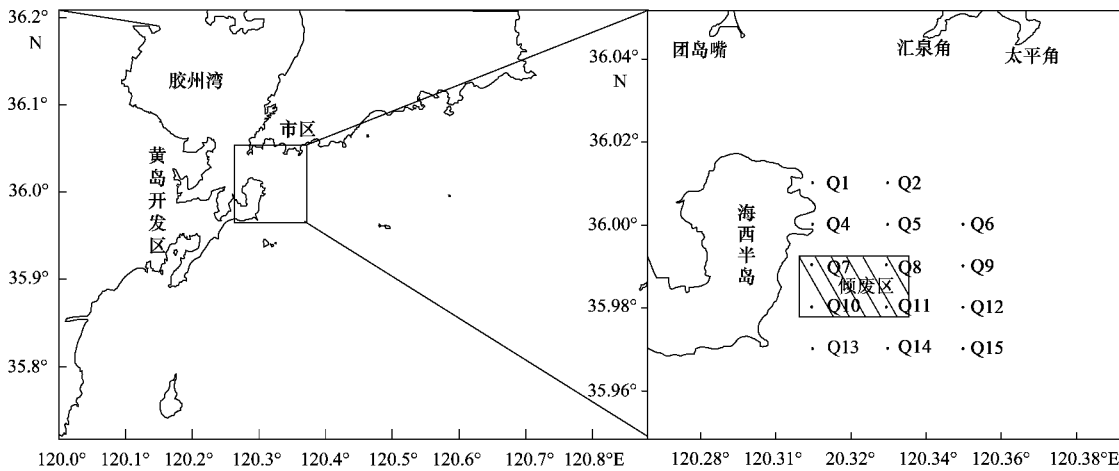


图 1 青岛海洋倾倒区位置及监测站位

Fig. 1 Map of the marine dumping ground in Qingdao and the location of sampling stations

1.2 样品采集和分析

用抓斗式采泥器于 2007 年 8 月在调查站位采集表层沉积物样品,用塑料勺取其中央未受干扰的表层泥样于聚乙烯袋中.沉积物样品带回实验室后,置于烘箱内 105℃ 恒温烘干,并用玛瑙研钵研磨后过 160 目筛供分析,用于 Cu、Pb、Cd、Zn、Hg、Cr 等的测定. Pb 和 Cd 用石墨炉原子吸收分光光度法测定, Cu、Zn 和 Cr 用火焰原子吸收分光光度法测定, Hg 用原子荧光法测定,具体分析方法参见《海洋监测规范》. 总有机碳 (TOC) 采用 Perkin Elmer Model 2400 CHNS 分析仪测定.

1.3 数据处理

本研究的平面分布图系使用 Golden Software 公司的 Surfer 8.00 软件绘制,应用克里格法 (Kriging) 网格化来反映数据的变化趋势,即通过线性加权法处理变量生成网格.

$$V = \sum_{j=1}^n W_j \cdot v$$
$$\sum_{i=1}^n W_i = 1$$

式中, V 为所得网格的内插值变量, W_j 为权重, v 为各站位数据.

另外,本研究采用重金属的潜在生态风险指数法,对 2007 年各站位的调查数据评测,数学表达式如下^[7,8]:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_f^i = T_r^i \cdot \frac{c^i}{c_n^i} \tag{1}$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i \tag{2}$$

式中, E_r^i 为某一污染物潜在生态风险指数; RI 为多种污染物总的潜在生态风险指数; T_r^i 为污染物毒性响应系数; C_f^i 为某一污染物的污染指数,又称富集系数; c^i 为沉积物中某一污染物的实测浓度; c_n^i 为沉积物中相应污染物的背景值. 污染物的背景值是指在未受污染的自然状态下环境要素的正常含量,又称环境污染本底值. 污染物背景值的地区性强,采用不同的背景值对计算潜在生态风险指数有较大的影响^[9],为反映特定区域的环境演变,定量地反映出污染程度,避免采用大尺度平均参考值的偏差,本研究中 c_n^i 采用倾倒区 1985 年调查本底值并结合文

献的研究结果选取背景值做参照^[10-12], c_n^i 和 T_r^i 的取值列于表 1^[13].

表 1 沉积物中重金属的背景参照值 (c_n^i) 及毒性响应系数 (T_r^i)

Table 1 Certified values (c_n^i) and toxicity coefficients (T_r^i) of heavy metals in sediment

参数	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
$c_n^i / \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$	0.04	11	3.94	83	65	0.1
T_r^i	40	5	5	1	2	30

依据重金属的潜在生态风险指数 (E_r^i) 可将沉积物中重金属污染状况划分为 5 个等级; 依据重金属的潜在生态综合风险指数 (RI) 可将沉积物中重金属污染程度划分为 4 个等级. 重金属的潜在生态风险指数 (E_r^i)、潜在生态综合风险指数 (RI) 与污染程度的具体关系见表 2^[14].

表 2 重金属潜在生态风险指数 (E_r^i) 和潜在生态综合风险指数 (RI) 与风险程度的关系

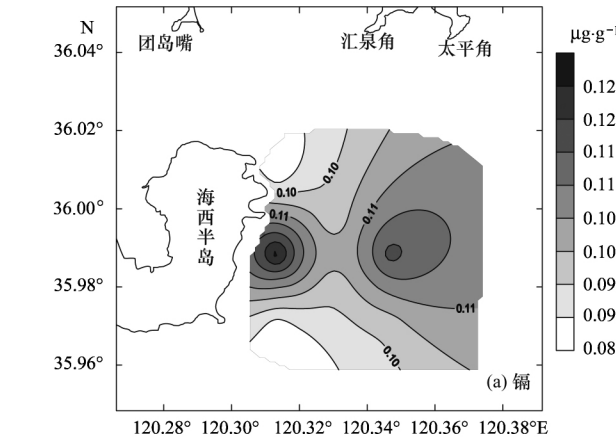
Table 2 Relationship among potential ecological risk coefficients (E_r^i), risk indices (RI) and risk level of heavy metals

潜在生态风险指数 E_r^i	潜在生态综合风险指数 RI	风险程度分级
$E_r^i < 40$	$RI < 150$	低潜在生态风险
$40 \leq E_r^i < 80$	$150 \leq RI < 300$	中潜在生态风险
$80 \leq E_r^i < 160$	$300 \leq RI < 600$	较重潜在生态风险
$160 \leq E_r^i < 320$	$RI \geq 600$	重潜在生态风险
$E_r^i \geq 320$	—	很严重潜在生态风险

2 结果与讨论

2.1 表层沉积物中重金属的地球化学分布特征

2.1.1 平面分布特征



2007 年表层沉积物 Cd 的分布, 呈南北两端低, 东西两端高的分布趋势 (图 2). 高值区出现在调查海域的中西部, 主要分布在倾倒区范围内, 说明疏浚物中 Cd 的含量较高. 调查海域 Cd 的浓度范围为 0.09 ~ 0.13 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 0.105 $\mu\text{g}/\text{g}$, 略高于背景值 5%, 但仍明显低于《海洋沉积物质量》第一类标准值限定的 0.50 $\mu\text{g}/\text{g}$. Cr 的分布则呈现出明显的倾倒区含量低, 周围海域高的分布趋势, 说明疏浚物中 Cr 的含量较低. 从总体上来看, Cr 表现出随着离岸距离的增加浓度逐渐增大的趋势. 高值区出现在调查海域的东南部. 调查海域 Cr 的浓度范围为 19.56 ~ 39.12 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 29.47 $\mu\text{g}/\text{g}$, 明显低于背景值.

沉积物表层 Pb、Cu、Zn 和 Hg 的分布 (图 3) 比较类似, 在整个调查海域均呈倾倒区范围内浓度高, 其外围浓度逐渐降低的分布趋势, 说明在该海区倾倒的沉积物中 Pb、Cu、Zn 和 Hg 的含量较高. 在调查海域的东北部, 沉积物中 Pb、Cu、Zn 和 Hg 的含量逐渐降低, 这与该区处于胶州湾口处, 水动力较强, 沉积物中吸附的重金属含量较低有关. 在数值上, Pb 的浓度范围为 0.99 ~ 1.32 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 1.145 $\mu\text{g}/\text{g}$; Cu 的浓度范围为 2.79 ~ 3.84 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 3.355 $\mu\text{g}/\text{g}$. Pb 和 Cu 的含量均略低于 1985 年的背景值. Zn 的浓度范围为 3.73 ~ 16.16 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 9.63 $\mu\text{g}/\text{g}$, 明显低于背景值; Hg 的浓度范围为 0.038 ~ 0.082 $\mu\text{g}/\text{g}$, 平均值为 0.065 $\mu\text{g}/\text{g}$, 比 1985 年的背景值高出 62.5%, 增加明显.

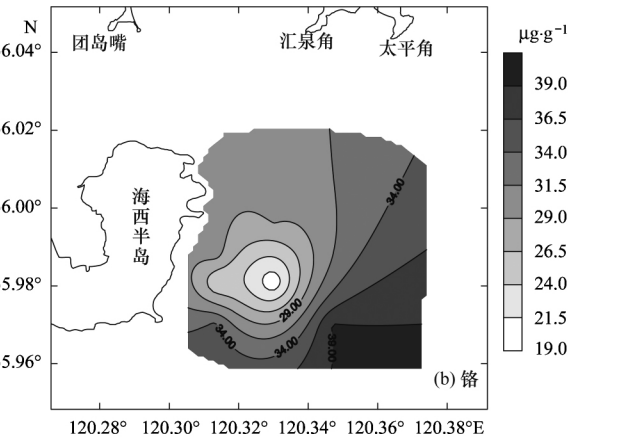


图 2 重金属镉、铬平面分布
Fig. 2 Distribution of Cd and Cr in surface sediment

除 Cr 之外, 2007 年表层沉积物中重金属 Cd、Hg、Pb、Cu、Zn 的分布基本上表现为倾倒区内含量高, 倾倒区外围含量低, 且调查海域东北部的重金属含量明显低于其它区域. 其中, 尤以 Cd、Hg、Pb、Cu、

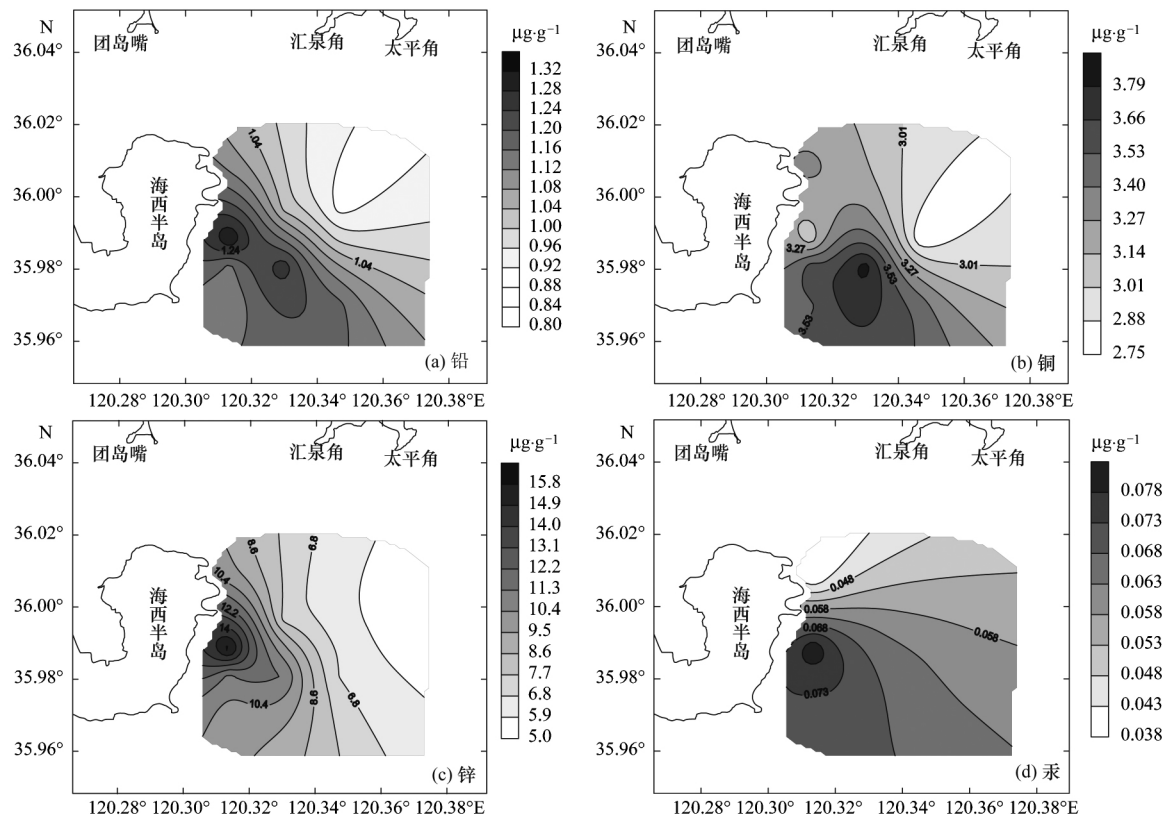


图 3 重金属铅、铜、锌、汞平面分布

Fig. 3 Distribution of Pb, Cu, Zn and Hg in surface sediments

Zn 在湾口处降低得最为明显,这与该调查海域东北部位于胶州湾进出水道,底质沉积物主要以大颗粒物质为主,重金属富集程度较低有关.

2.1.2 重金属的潜在生态风险评价

将表 1 中各种重金属的环境背景值和各种重金属的毒性响应系数以及调查海域表层沉积物中的重金属浓度代入式(1)和式(2),将计算得到的该海域表层沉积物中各重金属的潜在生态风险指数 (E_r^i) 和多种重金属的潜在生态综合风险指数 (RI) 结果列于表 3.

表 3 倾倒区表层沉积物中各重金属的污染指数 (C_i^i),潜在生态风险指数 (E_r^i) 和潜在生态综合风险指数 (RI)						
Table 3 Contaminated index (C_i^i), potential ecological risk coefficients (E_r^i) and risk indices (RI) of heavy metals in surface sediments						
项目	Hg	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd
C_i^i	1.62	0.30	0.29	0.12	0.45	1.05
E_r^i	65	1.52	1.45	0.12	0.91	31.5
RI	100.50					

从表 3 的统计结果可知,在调查的 6 种重金属中, Hg 的潜在生态风险指数 (E_r^i) 为 65,高于 40,

潜在生态风险水平中等,对生态系统具有危害程度处于中等水平. 其它重金属的生态风险指数均远小于 40,这表明该海洋倾倒区沉积物环境中各种重金属的潜在生态危害大部分属低潜在生态风险,属于轻微生态危害范畴. 各重金属元素的潜在生态风险指数大小依次为: Hg > Cd > Cu > Pb > Cr > Zn. 调查海域重金属潜在生态综合风险指数 (RI) 为 100.50,低于 150,也属于低潜在生态风险范畴. 由此可见,尽管监测区域表层沉积物中 Hg 含量较背景值偏高,但是由于其它重金属 Cd、Cu、Cr、Pb 和 Zn 的浓度明显低于背景值或与背景值基本持平,从而导致重金属总的风险程度处于低潜在生态风险.

此外,从重金属的污染指数 C_i^i 看(表 3),调查海域重金属元素的污染程度排列顺序为: Hg > Cd > Cr > Cu > Pb > Zn,与各重金属的潜在生态风险程度排列顺序相对比,可以看出除 Cr 的位置有所变动外其它重金属元素的排列顺序基本一致,这也与 Cr 的分布特征与其它重金属显著不同有关. 从以上排序可以看出,重金属的污染程度与其潜在生态风险程度有一定的相似性.

2.2 盐度、有机碳与重金属之间的关系

有学者研究发现,在一定的区域内,沉积物中的重金属元素含量及其之间的比率具有相对的稳定性,当沉积物的来源相同或相似时,其间的重金属元素之间具有显著的相关性,且通过重金属元素之间

及其与沉积特征之间的相关分析,可以确定重金属的来源及其在沉积物中含量变化的控制因素^[15~17]. 本研究对 2007 年青岛倾倒区海域表层沉积物各重金属元素间及其与有机碳、盐度之间进行 Pearson 相关性分析,结果见表 4.

表 4 沉积物中各重金属元素之间及其与有机碳、盐度的相关分析矩阵¹⁾
Table 4 Pearson correlation coefficients among heavy metals, organic carbon and salinity

	有机碳	Hg	Cu	Pb	Zn	Cd	Cr	盐度
有机碳	1	0.542 *	0.290	0.196	0.073	0.180	-0.225	0.740 *
Hg		1	0.127	0.528	0.452	0.576	-0.077	0.611
Cu			1	0.428	0.308	-0.581	-0.447	0.359
Pb				1	0.879 **	0.250	-0.229	-0.102
Zn					1	0.235	-0.334	-0.099
Cd						1	-0.148	-0.051
Cr							1	-0.100
盐度								1

1) ** 表示 $p < 0.01$; * 表示 $p < 0.05$

从表 4 可以看出,该海域沉积物中 Zn 与 Pb 具有显著的相关性,相关系数为 0.879 ($p < 0.01$),说明该海域沉积物同时受到 Zn 和 Pb 的污染比较明显,这可能与沉积物主要来自港口航道的疏浚,从而受到轮船使用含 Pb 燃油及轮船防腐材料 Zn 的污染有关^[18]. 有学者研究认为,有机质对重金属的分布具有一定的影响^[19]. 从表 4 中可以看出,本调查海域有机碳与重金属 (Cr 除外) 均呈一定的正相关关系,这说明有大量金属与有机碳 (主要为腐殖质) 通过表面吸附、阳离子交换及螯合反应,形成金属-有机络合物并吸附于颗粒沉积物中^[19,20],其中 Hg 与有机碳的相关性最为明显,相关系数为 0.542 ($p < 0.05$),显示出 Hg 与沉积物中的有机碳具有更强的结合力. 这与李玉等^[18]在胶州湾内的调查结果比较相似,其计算认为,胶州湾内表层中有机碳的含量与重金属 Zn、Cu、Pb、Cd、Hg 和 Cr 的浓度之间均有一定的正相关关系,有机碳含量与成分的变化是决定胶州湾表层沉积物中重金属分布的主要因子之一. 从表 4 中可以看出, Hg、Cu、Cd 之间具有一定的正相关关系,表明沉积物中这几种重金属可能有着共同的来源,即工业污染所致^[21].

2.3 调查海域重金属含量的年际变化

对调查海域所有站点的重金属含量做算术平均值发现, Cu、Pb、Zn、Cr、Hg、Cd 的 6 a 均值分别为 11.48、13.57、26.10、29.29、0.04、0.17 $\mu\text{g/g}$, 与 1985 年在该海域进行的本底调查相比, Cu、Pb、Cd 均高于本底值,其中 Pb 和 Cd 增加最为明显,分别

较本底值增加了 71% 和 70%, Cu 增加了 4.36%; Zn 和 Cr 较本底值都有明显的下降,分别下降了 69% 和 55%; Hg 与本底值持平.

从时间序列来看,2003~2008 年间 Cu、Pb、Zn 和 Cr 的浓度基本在一个数量级内变化,并呈一定的波动下降趋势. 其中, Zn 和 Cr 的下降趋势比较明显,最低值较 2003 年分别下降了 80% 和 70%. Cu 和 Pb 在 2003~2008 年间也基本呈稳步下降趋势,但下降幅度明显小于 Zn 和 Cr. Hg 和 Cd 的浓度变化则呈一定的镜像关系. 当 Hg 浓度下降时, Cd 的浓度则上升,反之亦然 (图 4).

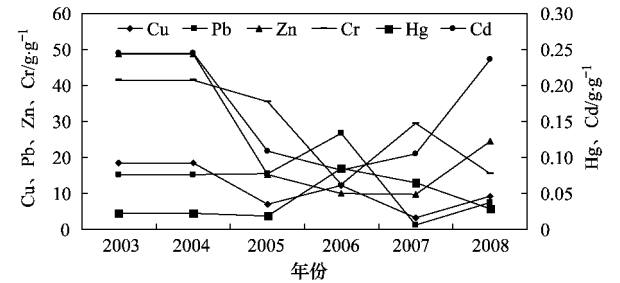


图 4 2003~2008 年沉积物表层重金属的浓度变化
Fig. 4 Heavy metal concentration changes of surface sediment, 2003-2008

6 a 间该倾倒区共倾倒了 2 770.2 万 m^3 疏浚物,疏浚物中各种重金属含量 (Hg 除外) 在小范围内波动并呈一定的下降趋势,这可能与该倾倒区近年来的倾倒以清洁疏浚物为主,疏浚物中污染物含量较低,覆盖于海床形成新的表层沉积物,从而使倾倒区

表层沉积物中污染物含量逐年降低.

3 结 论

(1) 调查区域沉积物中重金属除 Cr 外高值区均集中在倾倒区范围内,说明疏浚物的倾倒是该海区重金属污染的主要来源. 调查区域北部沉积物中重金属含量普遍偏低,这与该区靠近湾口,水动力较强有关.

(2) 倾废区表层沉积物中重金属除 Hg 具有中潜在生态风险外其它均为低潜在生态风险;重金属总的风险程度处于低潜在生态风险,这从重金属的角度说明该倾倒区沉积物质量良好.

(3) 6 a 间倾倒区海域沉积物质量基本维持在一个稳定的水平,各种重金属(Hg 除外)含量在小范围内波动并呈一定的下降趋势.

(4) Hg 为主要风险因子,今后倾倒区的管理应该加强对 Hg 的监测.

参考文献:

[1] Casado-Martínez M C, Fernández N, Forja J M, *et al.* Liquid versus solid phase bioassays for dredged material toxicity assessment[J]. *Environment Internationnal*, 2007, **33**: 456-462.

[2] 叶歆, 景有海, 余新田, 等. 厦门西海域拟疏浚沉积物中重金属含量及潜在生态危害评价[J]. *台湾海峡*, 2006, **25** (2): 202-208.

[3] 叶慧明. 洋山临时海洋倾倒区使用对所在海域及其周边环境的影响分析[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(增刊1): 29-33.

[4] Casado-Martínez M C, Forja J M, DelValls T A. A multivariate assessment of sediment contamination in dredged materials from Spanish ports[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, **163**: 1353-1359.

[5] Caplat C, Texier H, Barillier D, *et al.* Heavy metals mobility in harbour contaminated sediments; The case of Port-en-Bessin[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, **50**: 504-511.

[6] 纪灵, 王荣纯, 刘昌文, 等. 烟台海洋倾倒区环境监测及对比评价[J]. *海洋通报*, 2003, **22**(2): 53-59.

[7] Chapman P M, Ho K T, Munns W R, *et al.* Issues in sediment toxicity and ecological risk assessment [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2002, **44**: 271-278.

[8] 张丽旭, 任松, 蔡健. 东海三个倾倒区表层沉积物重金属富集特征及潜在生态风险评价[J]. *海洋通报*, 2005, **24**(2): 92-96.

[9] Jin Z B, Liang T, Lin J Z, *et al.* Study on heavy metal contamination and potential ecological risk in Hong Kong Rivers [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1997, **33**(4): 485-492.

[10] 刘芳文, 颜文, 王文质, 等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *海洋环境科学*, 2002, **21**(3): 34-38.

[11] 王增焕, 林钦, 李纯厚, 等. 珠江口表层沉积物铜铅锌镉的分布与评价[J]. *环境科学研究*, 2004, **11**(3): 214-219.

[12] Lu S Y, Zhu M Y. The background value of chemical elements in the Huanghai sea sediment [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, **6**(4): 115-121

[13] 李正华, 林建杰. 福建定海湾表层沉积物中重金属生态评价初步研究[J]. *海洋环境科学*, 2008, **27**(增刊1): 23-25.

[14] 刘孟兰, 郑西来, 林端, 等. 南海重点海洋倾倒区表层沉积物富集特征及其潜在生态风险评价[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(2): 158-165.

[15] 丁桑岚. 环境评价概论[M]. 北京: 化学工业出版社, 2001. 17-52.

[16] 郑琳, 崔文林, 贾永刚. 海洋倾倒导致生态环境变化实例研究[J]. *海洋环境科学*, 2007, **26**(5): 413-421.

[17] 贺志鹏, 宋金明, 张乃星, 等. 南黄海表层海水重金属的变化特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2008, **29**(5): 1153-1162.

[18] 李玉, 俞志明, 曹西华, 等. 重金属在胶州湾表层沉积物中的分布与富集[J]. *海洋与湖沼*, 2005, **36**(6): 580-589.

[19] Soares H M V M, Boaventura R A R, Machado A A S C, *et al.* Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave River Basin (Portugal): multivariate analysis of data [J]. *Environmental Pollution*, 1999, **105**: 311-323.

[20] Borg H, Jonsson P. Large-scale metal distribution in Baltic Sea sediments [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1996, **32**: 8-21.

[21] 徐晓达, 林振宏, 李绍全. 胶州湾的重金属污染研究[J]. *海洋科学*, 2005, **29**(1): 48-53.