

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2013.06047

长江口外海域沉积物重金属分布特征 及其环境质量评价

密蓓蓓¹, 蓝先洪¹, 张志珣¹, 刘升发²

(1. 国土资源部 海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 青岛 266061)

摘要:通过对长江口外海域 187 个表层沉积物进行重金属(Zn、Cr、Pb、Cu、As、Cd、Hg)测试,分析其空间分布特征及其污染等级。结果显示,长江输运的重金属污染物基本沉积在长江口-浙江近岸一带,而随着离岸距离的增大,重金属含量逐渐降低,等值线大致有平行于海岸的趋势。运用沉积物富集系数法和潜在生态危害法对重金属做了污染程度评价,122.5°E 以西的长江口及其邻近的浙江近岸一带,沉积物富集系数大于 2,处于中等环境危害等级,而其他大范围区域均处于无-低污染程度,为低生态危害程度。重金属污染程度的这种空间分布特征主要受控于长江入海物质供给和闽浙沿岸流的输运作用。

关键词:沉积物;重金属;污染;长江口

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2013)06-0047-08

河口是海陆相互作用的枢纽,是河流入海物质的重要归宿地,也是人类活动影响最为强烈的地区^[1-3]。人类活动产生的重金属污染物质在河流的输运下入海,在河口及其周边海域运移、扩散和沉积,在经历了吸附作用、絮凝作用等复杂的物理、化学、生物过程,致使大部分溶解态重金属转移到颗粒态中并随之沉积在河口三角洲及其邻近海域,而海水中的有害重金属元素的浓度则大大降低^[4-6]。由于河口和邻近海域沉积环境特殊的物理化学性质,进入沉积物中的重金属通常能够长期稳定存在,成为持久污染物,对生物群落结构和生态环境产生明显影响;另外,沉积物中的重金属还可以释放到水体之中,造成水体二次污染。为此,近年来,国内外很多学者开展了河口及邻近海域沉积物环境质量调查与评价方面的研究,旨在查清人类活动对重金属污染的影响,客观评价沉积物重金属环境质量,为海洋环境评价与防治提供科学依据。

长江是中国第一大河流,沉积物年入海通量为 4.8 亿 t^[7],其中重金属污染物达 2~3 万 t^[8],如此大量的重金属入海后在河流径流、沿岸流及潮流等水动力要素及河口区地形地貌的综合作用下,形成空间分布的不均一性。因此,本文通过高密度采样,系统研

究长江口外表层沉积物重金属含量,评价重金属污染等级,探讨其控制因素及其对人类活动的响应。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本文选用 2006 年 8—9 月取自长江口海域的 187 个表层沉积物样品,采样站位以 25 km 为间隔(图 1),基本覆盖了整个长江口-杭州湾海域。样品均用箱式取样器采取,为保证样品的等时性,每个站位均取 0~5 cm 的表层沉积物 200 g,放入预先清洗过的样品袋中,密封后带回实验室低温冷藏保存。

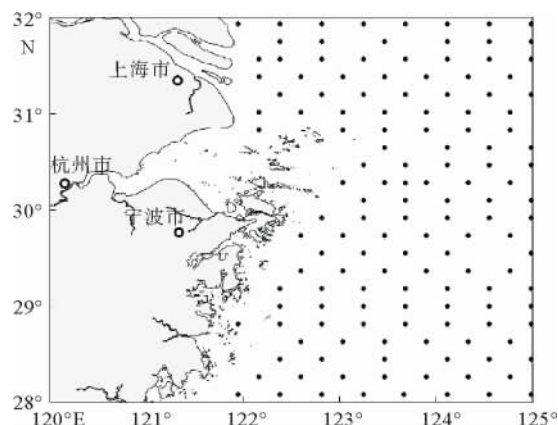


图 1 重金属元素采样站位分布

Fig. 1 Location of the sampling stations for heavy metals

基金项目:国土资源部国土资源大调查项目(1212010611301)

作者简介:密蓓蓓(1984—),女,工程师,从事海洋地质学研究,

E-mail: mpp302@163.com

收稿日期:2012-08-27;改回日期:2012-11-20. 周立君编辑

1.2 样品分析

选取 10 g 样品在 65 °C 下烘干后于玛瑙研钵中研磨至 200 目,制成标准压片,采用 X 射线荧光光谱法测试 Cu、Cr、Zn、Pb 含量,采用原子荧光光谱法 (AF) 测定 As、Hg 含量,采用等离子质谱法 (ICP-MS) 测定 Cd 含量。为了监控测试精度和准确度,元素分析过程中进行了平行样和标样分析,相对误差小于 10%,分析结果可靠。样品分析在国土资源部青岛海洋地质研究所测试中心完成。

1.3 评价方法

(1) 沉积物富集系数法^[9-12]

单个重金属富集系数:

$$K_{\text{SEF}} = (S_n / S_{\text{ref}}) / (a_n / a_{\text{ref}}) \quad (1)$$

式中, K_{SEF} 为沉积物中单个重金属富集系数; S_n 为沉积物中重金属实测含量; S_{ref} 为沉积物中参比元素含量; a_n 为重金属的背景值; a_{ref} 为参比元素的背景值。通常情况下,参比元素选择在迁移过程中性质稳定的元素,如 Al。

环境危害指数 I_{ER} 为单个元素超过其背景值的加权值,算法如下:

$$I_{\text{ER}} = \sum_i^m (K_{\text{SEF}} - 1) \quad (2)$$

(2) 潜在生态危害指数法^[11,13]

单个重金属污染系数:

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

式中, C_i^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。

某一区域重金属 i 的潜在生态危害系数:

$$E_r^i = T_r^i \cdot C_i^i \quad (4)$$

式中, E_r^i 为重金属 i 的潜在生态危害系数; T_r^i 为重金属毒性响应系数,反映重金属的毒性水平及生物对重金属污染的敏感程度。

沉积物中多种重金属的潜在生态危害指数 E_{RI} 为所有重金属潜在生态危害系数的总和:

$$E_{\text{RI}} = \sum_i^m E_r^i = \sum_i^m T_r^i \cdot C_i^i = \sum_i^m T_r^i \cdot \frac{C_i}{C_n^i} \quad (5)$$

2 重金属空间分布特征

长江口外海域重金属含量测试结果如表 1 所示,其平均富集次序为 $\text{Zn} > \text{Cr} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Cd} > \text{Hg}$,重金属空间分布如图 2 所示。

表 1 研究区表层沉积物重金属含量统计

Table 1 Heavy metals contents in surface sediments of study areas

元素	最小值 ($\mu\text{g/g}$)	最大值 ($\mu\text{g/g}$)	平均值 ($\mu\text{g/g}$)	变异系数
Cu	5.30	41.20	15.07	6.93
Zn	41.30	111.40	67.40	16.99
Pb	17.10	33.50	22.49	3.60
Hg	0.01	0.13	0.03	0.02
Cr	39.60	98.30	66.80	14.88
Cd	0.02	0.27	0.06	0.03
As	1.08	43.94	7.08	4.82

Cu 元素含量为 5.3~41.2 $\mu\text{g/g}$,平均含量为 15.1 $\mu\text{g/g}$,在研究区西部的长江口及以南的浙江近岸海域含量较高,呈带状分布,基本在 20 $\mu\text{g/g}$ 以上,而在研究区的东北角海域,出现一低值中心,最低值为 5.3 $\mu\text{g/g}$ (图 2)。

Zn 元素平均含量为 67.40 $\mu\text{g/g}$,其空间分布与 Cu 较为相似,高值区出现在长江口及其以南的近岸一带,含量基本在 70 $\mu\text{g/g}$ 以上,而在 124°E 以东区域,含量基本在 60 $\mu\text{g/g}$ 以下(图 2)。

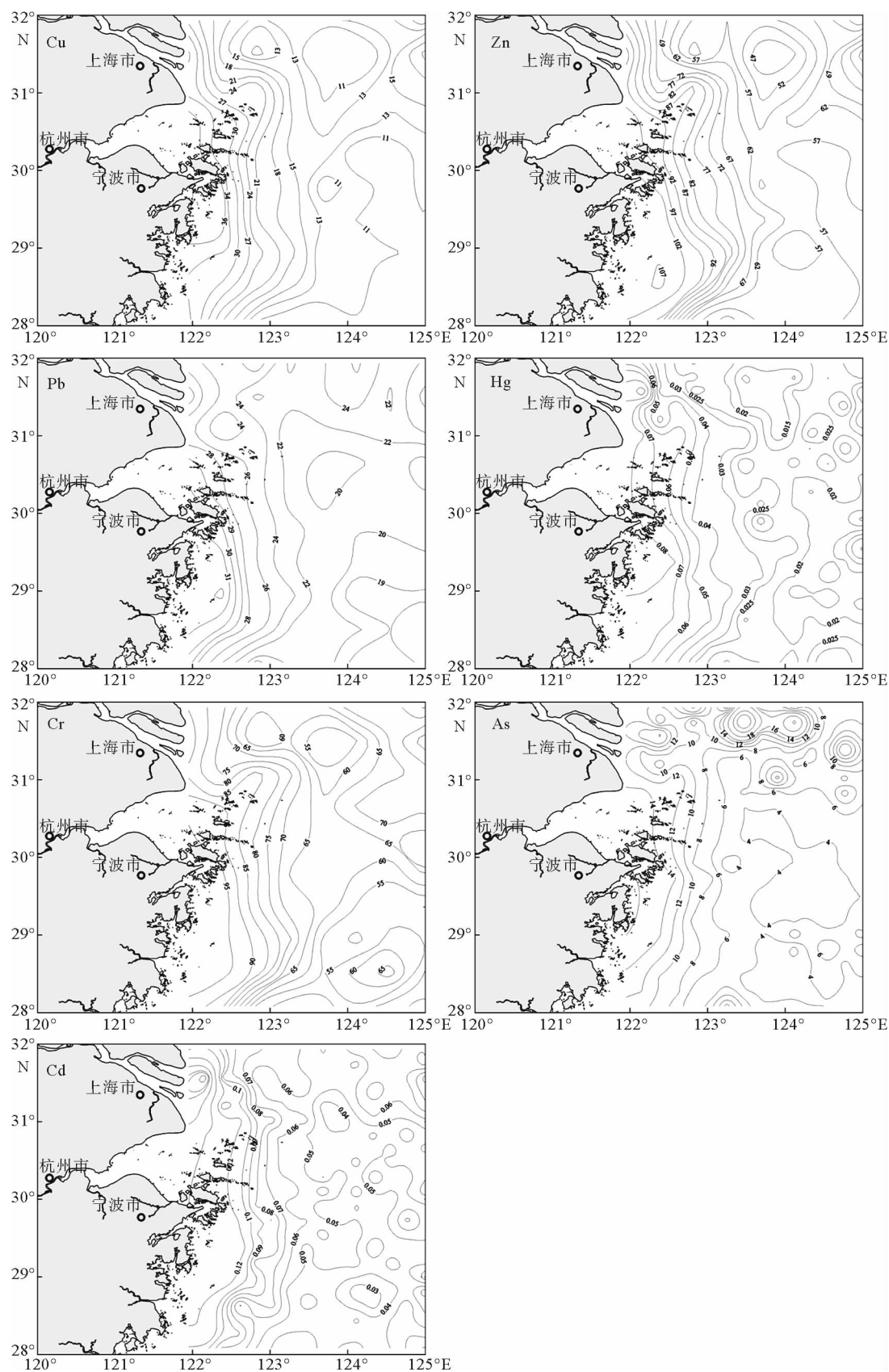
Pb 元素平均含量为 22.49 $\mu\text{g/g}$,最高值出现在长江口外及杭州湾南岸一带,含量在 28 $\mu\text{g/g}$ 以上,随着离岸距离的增加,含量逐渐减低,而在研究区东南部 Pb 元素含量基本不超过 20 $\mu\text{g/g}$ (图 2)。

Hg 元素为研究区含量最低的重金属元素,平均含量仅为 0.03 $\mu\text{g/g}$,最高值出现在长江入海口区域,可达 0.13 $\mu\text{g/g}$,而在 31°N 以南近岸区域等值线大致表现为平行于海岸线分布,远岸区域则呈斑块状分布(图 2)。

Cr 含量为 39.60~98.30 $\mu\text{g/g}$,平均值为 66.80 $\mu\text{g/g}$,其空间分布大致表现出自岸向海含量逐渐降低的趋势,最高值出现在杭州湾湾口南岸区域,可达 98.30 $\mu\text{g/g}$,而研究区 124°E 以东区域,Cr 含量基本在 70 $\mu\text{g/g}$ 以下(图 2)。

Cd 元素平均含量为 0.06 $\mu\text{g/g}$,高值区分布在研究区西部长江入海口及其以南的浙江近岸一带,含量基本高于 0.10 $\mu\text{g/g}$,最高值在长江入海口门处达到 0.27 $\mu\text{g/g}$,而 123°E 以东区域,Cd 含量基本低于 0.05 $\mu\text{g/g}$ (图 2)。

As 元素空间分布的一个明显特征是研究区 31.5°N 以北和 122.5°E 以西区域含量较高,基本在 10 $\mu\text{g/g}$ 以上,而其他区域 As 分布相对较为均匀,含量大致为 4~6 $\mu\text{g/g}$ (图 2)。

图 2 长江口外海域表层沉积物重金属含量分布($\mu\text{g/g}$)Fig. 2 Distribution of heavy metals in surface sediments out of Yangtze River estuary ($\mu\text{g/g}$)

3 环境质量评价

3.1 沉积物富集系数法

沉积物富集系数法是 Buat-Menard P 和 Cheselet R 于 1979 年提出的用于评价重金属污染程度的方法^[9-12],计算方法按方程(1)进行。重金属背景值选取工业革命以前的数值,数据引自文献^[14]。沉积物中重金属富集系数越大,表示沉积物被重金属污染程度越高^[15],按照富集系数(K_{SEF})的大小,可相应把污染程度分成 5 个等级: K_{SEF} 值 <2 时,污染程度划分为无—轻;值为 $2\sim5$ 时,污染程度划分为中等;值为 $5\sim20$ 时,污染程度划分为较强;值为 $20\sim40$ 时,污染程度划分为强;值 >40 时,污染程度划分为极强(引自文献^[15])。

从计算结果可以看出(表 2),研究区沉积物富集系数变化范围较大,7 种重金属平均富集系数均高于其背景值,其中 Zn、Pb、Cr 和 Hg 的平均富集系数还大于 2,表明该 4 种元素平均污染程度达到了中等,而 Hg、Cd 和 As 富集系数的最大值还大于 5,表明研究区局部位置甚至达到了较强污染程度,站位数分别为 2、1 和 8 个。

表 2 研究区表层沉积物重金属富集系数统计
Table 2 Enrichment factor of heavy metals in surface sediments of study areas

	最小值	最大值	平均值	变异系数
Cu	0.83	3.69	1.80	0.47
Zn	1.76	2.66	2.22	0.16
Pb	1.56	3.43	2.11	0.29
Hg	0.74	7.08	2.12	0.86
Cr	1.81	3.02	2.21	0.20
Cd	0.60	5.48	1.56	0.60
As	0.33	14.63	1.96	1.49

从环境危害指数 I_{ER} 可以识别出沉积物中自然来源和人类活动来源的重金属,类似研究方法可见文献^[16-17],通常情况下,根据计算所得 I_{ER} 值,可将所研究区域划分为多个等级。根据中国近海特殊的地质环境,可将重金属环境危害指数划分为三个级别,分别为轻微危害($I_{ER} < 11$),中等危害($I_{ER} = 11\sim14$)和严重危害($I_{ER} > 14$)^[3]。从图 3 可以看出,典型的人类活动影响区分布在 $122.5^{\circ}E$ 以西的长江口及其临近的浙江近岸一带,其沉积物富集

系数基本是背景值的 2 倍以上,处于中等环境危害等级;随着向海距离的增大, I_{ER} 值逐渐降低,大致在 11 和 8 之间,为重金属自然来源和人类活动来源的混合带,处于轻微环境危害等级;而 $123^{\circ}E$ 以东区域,沉积物中重金属以自然来源为主,基本不受人类活动影响。

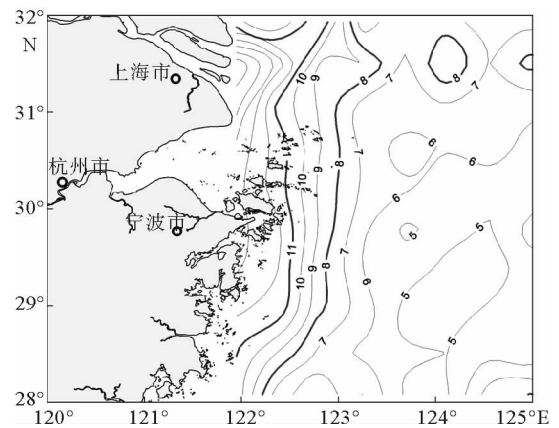


图 3 长江口外海域沉积物环境危害指数分布
Fig. 3 Environmental risk assessment map off Yangtze River estuary

3.2 潜在生态危害指数法

潜在生态危害指数法是瑞典学者 Hakanson 于 1980 年建立的一套应用沉积学原理评价重金属污染及生态危害的方法^[11,13],计算方法见方程(3)、(4)和(5)。通常情况下,参比元素背景值选取工业革命以前的最大含量值(表 3),重金属污染评价指标及其与污染程度和潜在生态风险程度的关系如下: $E_{RI} < 150$ 时,潜在生态风险程度划分为低; E_{RI} 为 $150\sim300$ 时,潜在生态风险程度划分为中等; E_{RI} 为 $300\sim600$ 时,潜在生态风险程度划分为重度; $E_{RI} \geq 600$ 时,潜在生态风险程度划分为严重(引自文献^[13,18])。

表 3 重金属的背景值和毒性系数^[13-14,18]
Table 3 Baseline values (C_n^i) and toxicity coefficient (T_r^i) of heavy metals^[13-14,18]

元素	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As
C_n^i (10^{-6})	75	20	75	0.1	27	0.034	9.1
T_r^i	2	5	1	50	5	40	10

由公式(2)、(3)和(4)可以计算得到研究区潜在生态风险指数 E_{RI} 值,结果显示 E_{RI} 介于 41.36 和 334.61 之间,平均值为 86.41,在所分析的 187 个样

品中,有 172 个样品 E_{RI} 值低于 150,有 14 个样品 E_{RI} 值介于 150 和 200 之间,仅有一个样品 E_{RI} 值高于 300。按照上述的评价标准,研究区大部分区域处于低生态风险程度,仅有 7% 的区域处于中等生态风险程度(仅有的 1 个 E_{RI} 值超过 300 的样品,不具有统计学意义,在此忽略)。 E_{RI} 值空间分布如图 4 所示,可以看出,中等生态风险程度的区域基本分布在长江口及其以南 122.5°E 以西的近岸一带,值得注意的是,中等生态风险区并未向长江口以北海域大范围扩散,这与现代长江入海物质的运移路径基本一致^[19],大量的长江入海物质进入河口后,由于

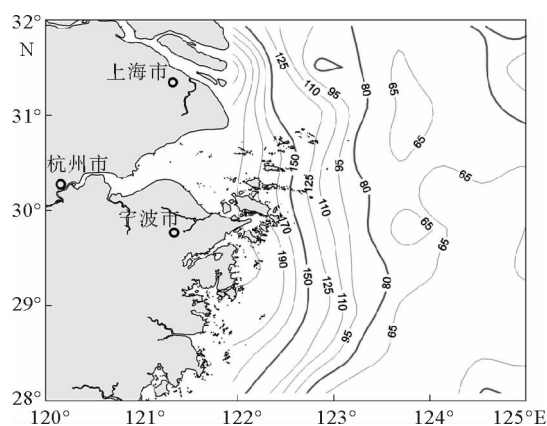


图4 长江口外海域沉积物潜在生态危害指数分布

Fig. 4 Potential ecological hazard index map off Yangtze River estuary

水动力条件的改变,部分粗颗粒陆源物质在河流区沉积,而颗粒较细的物质则在闽浙沿岸流的推动下,沿岸向南进行远距离运移^[20-23]; $122.5^{\circ}\text{E} \sim 123.5^{\circ}\text{E}$ 一带 E_{RI} 值为 $80 \sim 150$,可能指示了长江冲淡水与海水的混合带,该区域内沉积物中重金属的富集收到长江入海物质的轻微影响;而 123.5°E 以东区域, E_{RI} 值低于 80,基本反映了研究区重金属的背景值,长江入海物质在台湾暖流的顶托作用下很难扩散到该区域^[24]。

潜在生态危害指数法作为一种重要的重金属污染评价方法,近年来已被广泛用于评价河口区、陆架区、湖泊、沼泽地等区域沉积物的污染程度^[18,25]。表 4 为国内部分利用该方法评价重金属污染结果,可以看出不同区域的评价结果存在明显的差异,除受人类活动影响之外,相对而言,开放海域污染程度明显低于封闭和半封闭海域,这可能主要反映了水动力条件的控制作用,开放海域快速的水体交换和较强的水动力条件加快了重金属的扩散速度和运移范围,导致沉积物的污染等级相对较低,而封闭海域中水体流动性较差,导致了重金属仅在小范围沉积物中富集^[3]。因此,虽然本文结果显示长江口外海域仅有局部海域处于中等污染等级,但其分布范围之广,扩散速度之快,还是必须引起必要的注意,而且对比近十年来的监测结果,长江口周边海域重金属污染正呈现逐年增加的趋势^[26]。

表4 中国近岸河口沉积物重金属潜在生态危害水平

Table 4 Potential ecological risk level of heavy metals in the sediments around China continent

研究区	Cr	Cu	Zn	Cd	Pb	Hg	As	E_{RI}	潜在生态危害水平
长江口 (自文献 26)	—	—	—	1.20~6.30	0.66~2.08	3.82~13.4	2.16~4.90	41.6~121	低
黄浦江 (自文献 27)	0.34~6.47	3.63~22.4	0.64~3.32	0~260	1.29~13.3	7.84~200	5.41~25.6	20.7~372.6	低-严重
厦门海域 (自文献 19)	0.8~2.4	4.3~15.6	0.5~1.9	9.4~209.9	6.4~16.5	1.1~2.9	5.2~13.4	32.7~238.0	低-中等
运河(杭州段) (自文献 28)	1.0~4.0	4.0~109.0	1.0~19.0	14.0~792.0	5.0~22.0	5.0~182.0	2.0~28.0	58.0~1001.0	低-严重
渤海湾河口 (自文献 29)	—	1.43~6.39	0.35~1.23	—	1.25~4.38	2.40~49.12	4.43~12.27	10.46~70.93	低
千岛湖 (自文献 30)	4.8~10.4	9.2~95.7	6.8~12.3	1841.4~3031.0	8.5~14.7	137.9~502.8	8.8~22.9	2140.2~3684.3	严重
东海内陆架 泥质区 (自文献 31)	1.2~3.8	4.7~12.3	1.1~1.9	43.6~103.8	4.5~9.8	59.6~181.8	8.4~17.3	128.9~299.7	低-中等
本文研究区	1.06~2.6	1.33~10.30	0.55~1.49	11.00~137.00	3.17~6.20	9.88~158.12	1.19~48.29	41.36~334.61	低-中等

注:“—”代表该元素未进行分析。

4 结论

通过对长江口外海域沉积物表层沉积物重金属空间分布特征分析及其污染等级评价,得到以下几点结论:

(1)重金属元素 Zn、Cr、Pb、Cu、As、Cd 和 Hg 的平均含量分别为 15.07、67.40、22.49、0.03、66.80、0.06 和 7.08 $\mu\text{g/g}$,其空间分布均表现出河口-近岸区域含量高于沿岸的特征,最大值均出现在长江入海口门处,沉积物物源和水动力条件是主要控制因素;

(2)沉积物富集系数法表明典型的人类活动影响区分布在 122.5°E 以西的长江口及其临近的浙江近岸一带,环境危害指数 I_{ER} 大于 11,处于中等环境危害等级。

(3)潜在生态危害指数法揭示长江口外海域大部分区域为低生态风险程度,仅在近岸一带为中等生态风险程度,指示了长江入海物质的输运路径,而 123.5°E 以东区域, E_{RI} 值低于 80,反映了研究区重金属的背景值,基本不受长江入海物质的影响。

参考文献 (References)

- [1] 张永战,王颖. 面向 21 世纪的海岸海洋科学[J]. 南京大学学报:自然科学版, 2000, 36(6):702-711. [ZHANG Yongzhan, WANG Ying. Coastal ocean sciences facing the 21 century[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences), 2000, 36(6):702-711.]
- [2] Xu K H, Milliman J D, Li A C, et al. Yangtze-and Taiwan-derived sediments on the inner shelf of East China Sea[J]. Continental Shelf Research, 2009, 29(18): 2240-2256.
- [3] Liu S F, Shi X F, Liu Y G, et al. Concentration distribution and assessment of heavy metals in sediments of mud area from inner continental shelf of the East China Sea[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(2): 567-579.
- [4] Rubio B, Nombela M A, Vilas F. Geochemistry of Major and Trace Elements in Sediments of the Ria de Vigo (NW Spain): an Assessment of Metal Pollution[J]. Marine Pollution Bulletin, 2000, 40(11): 780-968.
- [5] 邹景忠. 海洋环境科学[M]. 济南: 山东教育出版社, 2004: 54-58. [ZOU Jingzhong. Marine Environmental Science[M]. Jinan: Shandong Education Press, 2004:54-58.]
- [6] 盛菊江,范德江,杨东方,等. 长江口及其邻近海域沉积物重金属分布特征和环境质量评价[J]. 环境科学, 2008, 29(9): 2405-2412. [SHENG Jujiang, FAN Dejiang, YANG Dongfang, et al. Distribution patterns of heavy metals in surface sediments of the Yangtze Estuary and its adjacent areas and environmental quality assessment [J]. Environmental Science, 2008,29(9): 2405-2412.]
- [7] Milliman J, Meade R. World-wide delivery of river sediment to the oceans[J]. Journal of Geology, 1983, 91(1):1-21.
- [8] 国家海洋局. 2003—2005 年中国海洋环境质量公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2003—2005. [National Bureau of Oceanography. Annual bulletin of marine environmental quality of China [R]. Beijing: National Bureau of Oceanography, 2003—2005.]
- [9] Buat-Menard P, Chesselet R. Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1979, 42(3): 398-411.
- [10] Chen C W, Kao C M, Chen C F, et al. Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor[J]. Chemosphere, 2007, 66(3): 1431-1440.
- [11] Li G H, Cao Z M, Lan D Z, et al. Spatial variations in grain size distribution and selected metal contents in the Xiamen Bay, China [J]. Environmental Geology, 2007, 52(8): 1559-1567.
- [12] Wang S S, Cao Z M, Lan D Z, et al. Concentration distribution and assessment of several heavy metals in sediments of west-four Pearl river Estuary[J]. Environmental Geology, 2007, 55(5): 963-975.
- [13] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [14] 张志忠,李双林,董岩翔,等. 浙江近岸海域沉积物沉积速率及地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 25(3): 15-24. [ZHANG Zhizhong, LI Shuanglin, DONG Yanxiang, et al. Deposition rate and geochemical characters of sediments in Zhejiang offshore [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2005, 25(3): 15-24.]
- [15] 霍文毅,黄风茹,陈静生,等. 河流颗粒物重金属污染评价方法比较研究[J]. 地理科学, 1997, 17(1): 81-86. [HUO Wenyi, HUANG Fengru, CHEN Jingsheng, et al. Comparative study of assessment method for river particulate heavy metal pollution [J]. Scientia Geographica Sinica, 1997, 17(1): 81-86.]
- [16] Backman B, Bodiš D, Lahermo P, et al. Application of a groundwater contamination index in Finland and Slovakia [J]. Environmental Geology, 1998, 36(1-2): 55-64.
- [17] Rapant S, Salminen R, Tarvainen T, et al. Application of a risk assessment method to Europe-wide geochemical baseline data [J]. Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis, 2008, 8: 291-299.
- [18] 李桂海,蓝东兆,曹志敏,等. 厦门海域沉积物中的重金属及其潜在生态风险[J]. 海洋通报, 2007, 26(1): 67-72. [LI Guihai, LAN Dongzhao, CAO Zhimin, et al. Specificity and potential ecological risks of heavy metals in the sediments of the Xiamen sea area [J]. Journal of Marine Science Bulletin, 26(1): 67-72.]
- [19] 王国庆,石学法,刘焱光,等. 粒径趋势分析对长江南支口外沉积物输运的指示意义[J]. 海洋学报, 2007, 29(6): 161-166.

- [WANG Guoqing, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Grain-size trend analysis on the south branch of the Changjiang Estuary in China and its implication to sediment transportation [J], *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 26(1): 67-72.]
- [20] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [21] 孙效功, 方明, 黄伟. 黄东海陆架区悬浮体运输的时空变化规律[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31: 581-587. [SUN Xiaogong, FANG Ming, HUANG Wei. Spatial and temporal variations in suspended particulate matter transport on the Yellow and East China Sea shelf [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 581-587.]
- [22] 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 闽浙沿岸泥质沉积物物源分析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 268-274. [XIAO Shangbin, LI Anchun, JIANG Fuqing, et al. Provenance Analysis of Mud along the Min-Zhe Coast since 2 ka BP [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(2): 268-274.]
- [23] 肖尚斌, 李安春, 刘卫国, 等. 闽浙沿岸泥质沉积的物源分析[J]. *自然科学进展*, 2009, 19(2): 185-191. [XIAO Shangbin, LI Anchun, LIU Weiguo, et al. Geochemical characteristics of mud on the inner shelf of the East China Sea [J]. *Progress in Natural Science*, 2009, 19(2): 185-191.]
- [24] 郭志刚, 杨作升, 张东奇, 等. 冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用[J]. *海洋学报*, 2002, 24(5): 71-80. [GUO Zhigang, YANG Zuosheng, ZHANG Dongqi, et al. Seasonal distribution of suspended matter in the northern East China Sea and barrier effect of current circulation on its transport [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 24(5): 71-80.]
- [25] 马德毅, 王菊英. 中国主要河口沉积物污染及潜在生态风险评估[J]. *中国环境科学*, 2003, 23(5): 521-525. [MA Deyi, WANG Juying. Evaluation on potential ecological risk of sediment pollution in main estuaries of China [J]. *China Environmental Science*, 2003, 23(5): 521-525.]
- [26] 张丽旭, 蒋晓山, 赵敏, 等. 长江口海域表层沉积物污染及其潜在生态风险评估[J]. *生态环境*, 2007, 16(2): 389-393. [ZHANG Lixu, JIANG Xiaoshan, ZHAO Min, et al. Pollution of surface sediments and its assessment of potential ecological risk in the Yangtze estuary [J]. *Ecology and Environment*, 2007, 16(2): 389-393.]
- [27] 程祥圣, 刘汉奇, 张昊飞, 等. 黄浦江沉积物污染及潜在生态风险评估初步研究[J]. *生态环境*, 2006, 15(4): 682-686. [CHENG Xiangsheng, LIU Hanqi, ZHANG Haoifei, et al. Potential ecological risk of sediment pollution in Huangpu River [J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(4): 682-686.]
- [28] 何云峰, 朱广伟, 陈英旭, 等. 运河(杭州段)沉积物中重金属的潜在生态风险研究[J]. *浙江大学学报*, 2002, 28(6): 669-674. [HE Yunfeng, ZHU Guangwei, CHEN Yingxu, et al. Study on the ecological risk on the sediment from the Hangzhou section of the grand canal, China, with the potential ecological risk index [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2002, 28(6): 669-674.]
- [29] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 33-37. [LIU Cheng, WANG Zhaoyin, HE Yun, et al. Evaluation on the potential ecological risk for the river mouths around Bohai Bay [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2002, 15(5): 33-37.]
- [30] 文军, 骆东奇, 罗献宝, 等. 千岛湖底泥重金属污染的生态风险评估[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 11-14. [WEN Jun, LUO Dongqi, LUO Xianbao, et al. Ecological risk assessment on heavy metals in the bottom mud of the Qiandao lake [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 11-14.]
- [31] 刘升发, 刘焱光, 朱爱美, 等. 东海内陆架表层沉积物粒度及其净输运模式[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2009, 29(1): 15-24. [LIU Shengfa, LIU Yanguang, ZHU Aimei, et al. Grain size trends and net transport patterns of surface [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, 25(3): 15-24.]

DISTRIBUTION OF HEAVY METALS IN SURFACE SEDIMENTS OFF YANGTZE RIVER ESTUARY AND ENVIRONMENTAL QUALITY ASSESSMENT

MI Beibei¹, LAN Xianhong¹, ZHANG Zhixun¹, LIU Shengfa²

(1. Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environment Geology, Ministry of Land and Resource, Qingdao
Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2. First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Heavy metals (Zn, Cr, Pb, Cu, As, Cd and Hg) of 187 surficial sediments from the outer part of the Yangtze River estuary were tested for study of their spatial distribution pattern and contamination level in this paper. Our results indicate that the contaminations of heavy metals transported by the Yangtze River are mainly deposited along the Yangtze River estuary-ZheJiang shoreline. The content of heavy metals decreases with the increase in distance from the shore. The contours are almost paralleled with the water-front. The extent of heavy metal contamination is evaluated by Sediment Enrichment Factor (SEF) method and Total Potential Ecological Hazard method. The enrichment factor is larger than 2 in the west of 122.5° E off the Yangtze River estuary and the Zhejiang nearshore as a medium-hazardous polluted environment. The other part of the open sea remains unpolluted or in a low polluted level with low ecological risk. The spatial distribution pattern of heavy metal contamination level is controlled by the materials from the Yangtze River and the Min-Zhe Coastal Current.

Key words: sediment; heavy metals; contamination; Yangtze River estuary