泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价

李云海[1,2], 陈坚[2], 黄财宾[2], 王爱军[2], 李东义[2]

(1. 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005)

摘要: 利用等离子质谱仪(ICP-MS)测定了泉州湾 48 个表层沉积物样品中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Cd 和 Pb 等元素的含量, 其平均值分别为 47.66、52.2、30.86、111.6、5.29、0.399 和 50.3 μg/g. 表层沉积物中各元素分布特征显示 Cd、Pb、Zn 和 As 元素主要来源于晋江径流; Cr 元素主要来源于海湾周边输入; Ni 和 Cu 元素既有晋江河流输入也有海湾周边输入. 多元潜在生态风险指数评价结果显示, 除 Cd 元素为强污染强潜在生态风险外, 其他元素污染指数在中度污染左右, 潜在生态风险轻微; 泉州湾表层沉积物综合污染和潜在生态风险程度在中等以上, 主要的污染和生态风险重金属是 Ni 和 Cd; 高污染区域与高潜在生态风险程度区域一致, 位于晋江与洛阳江入海口交汇处. 泉州湾表层沉积物中重金属污染仍然严重, 应继续加强控制与治理.

关键词: 泉州湾; 表层沉积物; 重金属; 环境评价; 污染

中图分类号: X55 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2010)04-0931-08

Distribution Patterns of Heavy Metals in Surface Sediments of the Quanzhou Bay and Environmental Quality Assessment

LI Yun-hai[1,2], CHEN Jian[2], HUANG Cai-bin[2], WANG Ai-jun[2], LI Dong-yi[2]

(1. Key Laboratory of Submarine Geoscience and Exploring Technology of Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Third Institute of Oceanography, State Oceanic Adiministration, Xiamen 361005, China)

Abstract: The concentrations of 7 heavy metals were determined in 48 surface sediments in the Quanzhou Bay by an inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS). The average contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd and Pb are 47.66, 52.2, 30.86, 111.6, 5.29, 0.399 and 50.3 $\mu g \cdot g^{-1}$, respectively. The Cd, Pb, Zn and As were mainly discharged into the Quanzhou Bay by Jinjiang River, while the materials near the Bay might supply a considerable amount of Cr, Ni and Cu. The result of the multi-analysis ecological risk index analyses revealed that Cr, Ni, Cu, Zn, Pb and As were moderately contaminated and presented low potential ecological risk, while Cd was heavily contaminated and raised high potential ecological risk. In general, moderately contaminated and potential ecological risk were occurred in whole Quanzhou Bay with the dominated polluted metals were Ni and Cd. The heavily contaminated area was corresponded to the high potential ecological risk area, which located at the confluent area of Jinjiang River and Luoyangjiang River. From the results of this study, we conclude that the Quanzhou Bay has been heavily polluted by heavy metals, therefore much environmental control should be continued and strengthen to Quanzhou Bay and its adjacent areas.

Key words: Quanzhou Bay; surface sediments; heavy metals; environment assessment; contamination

河口海湾是陆源物质向海输运的主要通道, 也是受人类活动影响最强烈的地区之一[1]. 人类活动产生的大量重金属污染物质通过河口进入海湾, 进而向外海扩散输运. 陆源输入的重金属污染物在近岸海域的环境地球化学过程非常复杂, 随着上覆水中的细颗粒物质沉降进入沉积物中, 在人类活动、物理、化学以及生物等因素的影响下, 部分又会返回上覆水, 其表现是重金属在沉积物中的累积和释放. 虽然沉积物是许多污染物的最终归宿, 但在与沉积物永久结合之前, 通过水-沉积物界面循环多次[2~6].

河口海湾是研究重金属污染物发生沉降、埋藏、搬运、转化等各种物理、化学和生物过程的重要环境, 作为载体的沉积物是重点研究对象之一. 近年来, 针对河口海湾沉积物的重金属环境质量开展了大量的研究工作[7~16], 一方面增强了对不同海湾沉积物重金属污染现状的了解, 另一方面也揭示了重金属在整个海洋环境中的(生物)地球化学行为; 同时, 为了客观评价沉积物重金属环境质量, 引入了多元统计方法[17,18]. 这些研究, 使得人类对河口海岸及其周边区域海洋环境及重金属污染程度和过程有了更加深入的认识, 为社会经济可持续发展的政策制定以及受损底质环境的生态修复提供了重要的依据.

泉州湾位于福建省东南部, 总面积约 136.42 km^2, 南岸为晋江、石狮市, 北岸为泉州市区和惠安县, 湾顶是晋江和洛阳江的入海口, 属敞开性海湾,

收稿日期: 2009-07-23; 修订日期: 2009-11-05
基金项目: 福建省青年人才项目(2007F3058); 中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室开放基金项目(2008-08); 国家 908 专项(908-ZC-Ⅰ-09)
作者简介: 李云海(1980~), 男, 博士, 主要研究方向为海洋沉积学, E-mail: liyunhai1980@gmail.com

口阔底浅,水域面积大,水体交换好,洛阳江由于人工筑坝已无径流入海,残存河段为海水[19]. 近年来,随着泉州湾腹地城市人口的密集化,工农业生产和水产养殖业的发展,航运和修建码头、围海筑堤、修桥造路等经济性开发强度加大,近岸海域生态环境发生了较大的变化,环境污染日趋严重[20~22],沿海工业废水和生活污水大量进入泉州湾,在湾内水体中形成"黑白奇观"[21]. 废水中的重金属是主要的污染物之一,泉州湾沉积物是海湾腹地重金属的汇[26~30]. 多年来,对泉州湾重金属污染做了大量的研究,这些研究主要集中在潮滩和海湾水体环境质量上[23~26],专门针对表层沉积物的研究较少也不全面[22]. 本研究在综合分析泉州湾表层沉积物中重金属含量及分布的基础上探讨其物质来源并进行环境质量评价,以期为准确评价泉州湾重金属污染情况,制定科学的综合整治措施提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

调查研究区域及采样站位见图 1,取样时间为 2008 年 7 月 10~12 日. 共布设站位 48 个,主要分布在水深 >2 m 无潮滩出露海域. 样品用不锈钢蚌式取样器获取后,随即用木勺取其表层约 3 cm 厚的表层沉积物装入样品袋中,以备实验室分析.

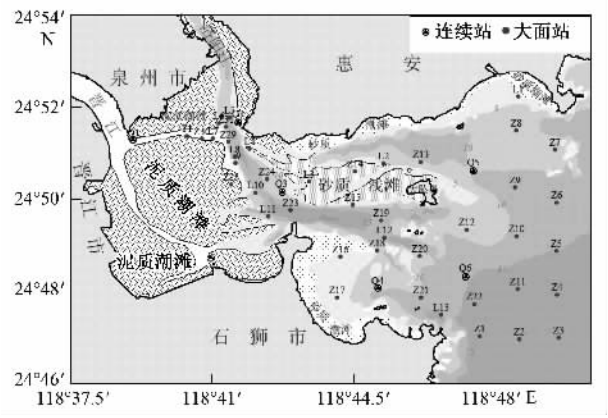

图 1 泉州湾取样站位示意

Fig. 1 Investigated areas and sampling sites

1.2 实验室分析

在实验室称取 0.05 g 烘干、研磨后样品在聚四氟乙烯密闭溶样罐中加硝酸和氢氟酸进行消解并制成试样溶液,在 ICP-MS 上进行元素分析(样品前处理、分析方法见 DZ/T 0223-2001 电感耦合等离子质谱分析方法通则). 分析元素为 Cr、Ni、Cu、Zn、Cd、Pb 和 As 等 7 种元素,元素分析在北京核工业地质研究院进行. 采用国家一级标准物质 GBW(GSD9~GSD12)系列样品进行测定,所用仪器为德国 Finnigan-MAT 公司生产的 ELEMENT I 型等离子质谱仪,测量精度标准偏差 <5%.

2 重金属的分布和来源

2.1 表层沉积物中重金属的含量

表层沉积物中 7 种元素的含量变化范围见表 1. 从重金属含量变化范围可以看出,7 种元素在不同站位之间含量相差较大,最大含量比最小含量高 7~40 倍(Cd 元素). 说明不同元素富集程度在地域上有差异,各元素入海后大部分随悬浮颗粒物迅速沉降到表层沉积物中,随着搬运距离的增加,沉降量降低. 不同元素的分布特征是其物质来源、输运和沉积的有效指标.

表 1 表层沉积物中重金属含量统计表/$\mu g \cdot g^{-1}$

Table 1 Statistics values of heavy metals contents in surface sediments of investigated areas/$\mu g \cdot g^{-1}$

元素	最大值(站位)	最小值(站位)	平均值
Cr	96.60 (L13 站)	7.61 (Z13 站)	47.66
Ni	163.0 (L1 站)	24.3 (Z30 站)	52.2
Cu	74.70 (L8 站)	5.11 (Z20 站)	30.86
Zn	290.0 (L8 站)	27.2 (Z20 站)	111.6
As	12.70 (Z9 站)	1.12 (Q1 站)	5.29
Cd	2.260 (L8 站)	0.056 (Q1 站)	0.399
Pb	149.0 (L8 站)	22.5 (Z20 站)	50.3

与福建省其他海域表层沉积物中重金属含量相比较(表 2),泉州湾表层沉积物中 Cd 元素的含量远高于湄洲湾、闽江口-马祖海域和厦门西港的,低于兴化湾的;As 元素的含量显著低于厦门西港的;Pb、Cu 和 Zn 元素的含量高于兴化湾、湄洲湾和闽江口-马祖海域的,略低于厦门西港的;Cr 元素的含量略高于厦门西港的. 与泉州湾 20 世纪 90 年代以前的数据相比,Pb 和 Zn 元素的含量有明显降低,Ni 和 Cu 元素则显著升高. 与泉州湾 2004 年的数据相比,Cd、Cu 元素的含量相差不大,As、Pb、Zn、Cr 元素的含量有不同程度的降低.

总体来看,目前泉州湾表层沉积物中重金属含量相对较高,重金属污染依然严重.

2.2 表层沉积物中重金属的分布及来源讨论

从表层沉积物重金属含量分布上可以看出(图 2),7 种元素的分布存在 3 种模式,一种是重金属含量在晋江和洛阳江交汇处达到最高值,并从内湾向外湾含量逐渐降低;一种是重金属含量在泉州湾沿

岸海域最高,在湾内其他海域含量相对较低;还有一种重金属含量是在泉州湾沿岸以及晋江和洛阳江交汇处都较高,而在其他海域相对较低.以下分别对各元素的分布特征进行论述.

表 2　福建海域表层沉积物重金属含量对比/μg·g^{-1}

Table 2　Concentrations of heavy metals in surface sediments of Fujian area/μg·g^{-1}

地点	Cd	As	Pb	Cr	Ni	Cu	Zn	文献
泉州湾	0.399	5.29	50.3	47.66	52.2	30.86	111.6	本研究
泉州湾(2004)	0.332	9.69	64	52.3	22.9	30.8	121	[22]
泉州湾(1989)	—	—	52	—	42	21	220	[27]
兴化湾	1.67	—	31	—	—	16.1	97.9	[28,29]
湄洲湾	0.09	—	41.5	—	—	17.5	76	[30,31]
厦门西港	0.023	16.51	54.99	47.36	—	30.95	168.14	[32]
闽江口-马祖海域	0.165	—	52	—	—	27.9	100.3	[33]

表层沉积物中 Cd 元素含量分布特征属于第一种类型,高值区分布在晋江和洛阳江交汇处,最大值出现在 L8 站左右,并从内湾向外湾急剧降低.晋江航道内的 Q1 站 Cd 元素含量较低,仅为 0.056 μg/g,约是 L8 站(2.260 μg/g)的 1/40,这与其表层沉积物组成(Q1 站主要为细砂,而 L8 站附近以粘土质粉砂为主[19])及所在位置(Q1 站在晋江河道内,不利于细粒物质的沉降,而 L8 站相当于晋江的最大混浊带位置,携带重金属的细粒物质在此迅速沉降)有关.在泉州湾外湾表层沉积物中 Cd 元素含量总体较低,均小于 0.400 μg/g.与之相类似的元素还有 Pb、Zn 和 As 元素.

Pb 元素高值区也主要分布在晋江和洛阳江交汇处,最大值出现在 L8 站,为 149 μg/g,由内湾向外湾降低,外湾表层沉积物中 Pb 元素含量总体较低,均小于 50 μg/g,Pb 元素含量在整个泉州湾变化幅度最小,最高值与最低值相差不到 7 倍,湾内其他海域相对含量也不低,说明其背景值较高(可能是受到湾内船舶排污等的影响).Zn 元素高值区也主要出现在晋江和洛阳江交汇处,最大值出现在 L8 站,为 290 μg/g,由内湾向外湾降低.外湾沉积物中含量 < 100 μg/g,湾内含量起伏较大.As 元素高值区有 2 个区域,一个位于晋江和洛阳江交汇处,最大值在 L7 站,为 12.7 μg/g;另一个位于泉州湾外湾(Z7、Z5、Z9),最高值 > 12 μg/g.其他区域相对较低,一般小于 6 μg/g.外湾 3 个站位表层沉积物中 As 含量较高并呈点状分布,可能是样品污染造成的,需要进一步确认.

Cr 元素分布特征与 Cd、As、Pb 分布特征有较大差异,属于第二种类型.在整个湾内存在几个高值区,主要出现在泉州湾南侧 10m 等深线内,含量 > 65 μg/g;其他海域含量 < 60 μg/g,有点状的较高值区分布.

Cu 和 Ni 元素的分布特征属于第 3 种类型.Cu 元素高值区也主要出现在晋江和洛阳江交汇处,最大值在 L8 站(> 70 μg/g),由内湾向外湾降低,外湾表层沉积物中 Cu 元素含量一般 < 35 μg/g.另外,在泉州湾南侧沿岸含量也相对较高,可达 45 μg/g.Ni 元素总体含量较高,一般 > 60 μg/g,其中在晋江入海口及泉州湾北侧沿岸相对较高,最高值区出现在泉州湾北岸附近,可达 160 μg/g.

7 种元素的分布特征差异是其物质来源不同的表现,3 种分布模式代表 3 种不同的物质来源途径.第一种分布模式显示出 Cd、Pb、Zn 和 As 等 4 种元素主要来源于晋江径流输入,输入的重金属元素被细颗粒物质吸附在河口最大混浊带附近迅速沉降.第二种分布模式显示 Cr 元素主要来源于泉州湾周围(南侧)入海物质,晋江径流输入相对较低.第三种分布模式是一种混合的分布模式,显示 Cu 和 Ni 元素物源多元,除晋江径流输入外泉州湾沿岸也有相当部分的输入.

重金属污染物主要是人类活动的产物,特别是来源于工业生产的"三废".泉州市县域经济发达,泉州湾南岸的晋江、石狮两市是全国著名的服装、鞋帽生产基地,与之相关的印染、纺织、电镀等工业发达[20],相关产业的污水通过晋江及南岸排污管道(渠)排入湾内;而北岸的泉州市辖各区化工、港口工业发达,加之大量城市生活污水也大多通过晋江排入湾内[20];惠安县是全国著名的石材生产基地[20],大量的石板材加工后的粉浆主要通过北岸的管道(渠)进入泉州湾.不同产业产生的污(废)水中重金属种类和含量相差较大,晋江输入的重金属大

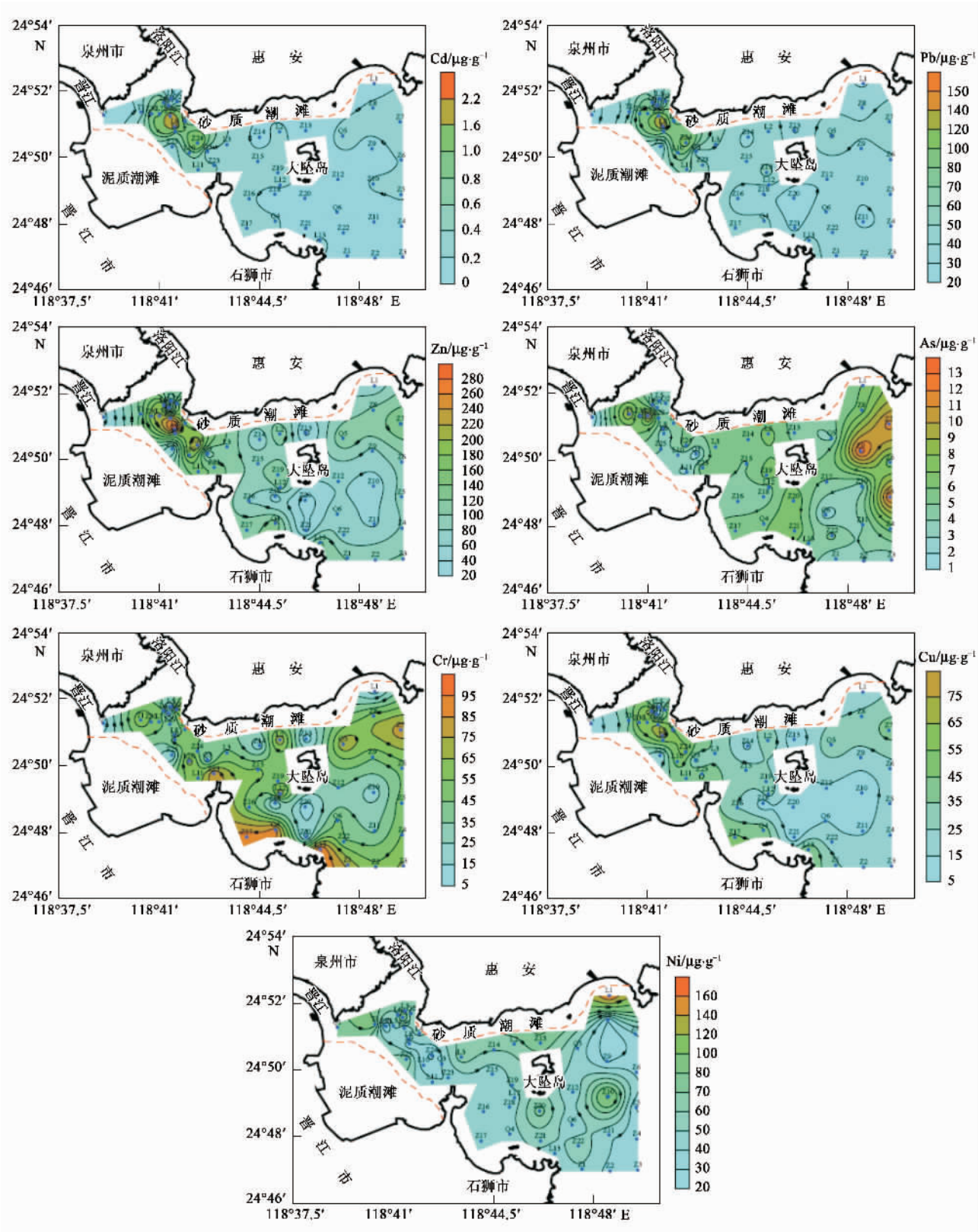

图 2 重金属含量分布

Fig. 2 Distribution patterns of heavy metals in surface sediments

部分在河口附近水动力条件较弱的海域(最大混浊带附近)随细粒级颗粒物沉降、富集. 沿岸输入的重金属在沿岸水动力较弱的海域沉降、富集. 泉州湾不同重金属分布的差异也显示了湾周边腹地各县域内

经济产业的不同.

3　表层沉积物中重金属环境质量评价

本研究采用多元潜在生态风险指数法进行重金属环境质量评价,该方法将重金属的含量、生态效应、环境效应与毒理学联系在一起,采用具有可比的、等价属性指数方法进行评价,应用广泛,效果较好[21,23,24,28,32].其计算公式为[18]:

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

$$C_d = \sum C_f^i$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i$$

$$RI = \sum E_r^i$$

式中,C_f^i 为单个金属污染系数,C^i 为表层沉积物中重金属含量实测值,C_n^i 为沉积物中重金属的参考值,本研究采用福建省沿海地区土壤中重金属背景

表 3　表层沉积物中重金属污染系数及综合污染程度1)

Table 3　Pollution indexes (C_f^i) and integrated pollution extent (C_d) of heavy metals in the surface sediments

站位	C_{Cu}	C_{Zn}	C_{Ni}	C_{Cr}	C_{Pb}	C_{As}	C_{Cd}	C_d
Z1	1.46	1.39	5.24	2.25	0.99	0.55	3.50	15.38
Z2	1.19	1.41	3.91	1.78	0.99	0.73	3.24	13.26
Z3	1.22	1.49	3.80	2.10	0.92	0.57	3.04	13.13
Z4	1.07	1.17	3.81	1.75	0.84	1.14	3.43	13.21
Z5	1.11	1.29	3.09	1.60	0.92	2.21	4.52	14.74
Z6	1.14	1.31	4.08	1.52	1.03	1.15	4.39	14.62
Z7	2.23	2.03	4.27	2.56	1.31	2.07	6.09	20.55
Z8	1.57	1.50	3.20	1.89	0.93	1.18	4.78	15.06
Z9	0.99	1.06	3.08	1.42	0.97	2.30	3.41	13.23
Z10	0.45	0.65	11.29	0.59	0.81	0.62	4.57	18.97
Z11	0.79	0.82	4.45	1.04	0.76	0.72	3.39	11.98
Z12	0.79	0.92	4.40	1.09	0.81	0.89	3.00	11.90
Z13	0.35	0.46	8.40	0.24	0.75	0.82	1.39	12.41
Z14	0.63	0.82	6.54	0.52	0.96	0.94	2.93	13.35
Z15	1.61	1.37	4.46	1.78	1.11	0.89	5.37	16.59
Z16	1.38	1.11	4.94	1.55	0.99	0.77	4.63	15.37
Z17	2.59	1.60	4.33	2.85	1.12	1.05	5.96	19.50
Z18	0.47	0.67	4.70	0.32	0.78	0.78	2.65	10.38
Z19	1.51	1.65	5.56	1.59	1.44	1.18	7.30	20.23
Z20	0.28	0.39	8.15	0.25	0.60	1.24	1.96	12.87
Z21	0.32	0.45	5.84	0.32	0.73	1.26	1.50	10.42
Z22	1.02	0.95	6.25	1.44	0.89	0.97	3.35	14.87
Z23	2.57	2.00	4.35	2.65	1.42	1.05	9.17	23.23
Z24	3.30	3.25	2.94	1.45	3.09	1.01	34.13	49.16
Z25	0.73	0.82	7.59	0.44	1.05	0.73	5.72	17.08
Z29	3.62	3.36	4.33	1.23	3.32	0.84	46.96	63.66
Z30	3.44	2.79	2.61	1.62	2.23	0.90	21.52	35.12
Z31	0.70	0.80	9.28	0.39	0.83	0.62	4.76	17.39
L1	0.88	0.92	17.53	0.30	0.77	1.11	3.26	24.76
L2	1.96	1.76	6.95	2.36	1.35	1.16	5.39	20.93
L3	1.93	1.69	7.14	1.49	1.36	1.05	7.63	22.30
L4	2.97	2.43	5.72	1.50	1.97	0.90	14.98	30.47
L5	0.72	0.86	7.69	0.31	0.98	0.54	2.91	14.01
L6	3.90	2.90	6.13	1.53	2.17	0.79	22.39	39.81
L7	3.57	2.96	5.77	1.60	2.30	1.99	18.04	36.25
L8	4.15	4.15	5.37	1.11	3.96	0.67	49.13	68.54
L9	3.23	2.60	3.25	1.67	2.18	0.57	17.22	30.71
L10	2.86	2.76	3.72	2.23	2.19	0.64	14.57	28.97
L11	2.36	2.12	4.52	1.82	1.68	0.53	11.39	24.41
L12	1.66	1.62	4.78	2.29	1.09	0.85	4.93	17.21
L13	2.51	1.79	4.72	3.01	1.13	0.88	4.72	18.75
T1	1.78	1.77	9.20	2.01	1.22	1.72	5.26	22.96
Q4	2.39	1.92	4.76	2.79	1.17	1.05	5.00	19.08
Q5	1.87	1.73	5.06	2.31	1.36	0.70	5.35	18.38
Q6	0.84	1.13	4.24	1.47	0.98	0.44	3.04	12.15
Q1	0.42	0.47	8.01	0.29	0.67	0.20	1.22	11.29
Q2	2.57	2.32	5.68	2.14	1.88	0.63	7.87	23.09
Q3	1.18	1.17	4.34	0.83	1.19	0.38	5.15	14.24
平均值	1.71	1.60	5.61	1.48	1.34	0.96	8.67	21.37

1)据文献[18],$C_f^i < 1$、$C_d < 5$ 为低污染;$1 \leqslant C_f^i < 3$、$5 \leqslant C_d < 10$ 为中污染;$3 \leqslant C_f^i < 6$、$10 \leqslant C_d < 20$ 为较高污染;$C_f^i \geqslant 6$、$C_d \geqslant 20$ 为很高污染

表 4 表层沉积物中重金属潜在生态风险指标及生态风险程度[1)]

Table 4 Potential ecological risk index (E_r^i) and their risk level (RI) of heavy metals in the surface sediments

站位	E_{Cu}	E_{Zn}	E_{Ni}	E_{Cr}	E_{Pb}	E_{As}	E_{Cd}	RI
Z1	7.28	1.39	26.18	4.50	4.97	5.49	105.00	154.81
Z2	5.94	1.41	19.57	3.56	4.96	7.34	97.17	139.96
Z3	6.08	1.49	18.98	4.19	4.60	5.72	91.30	132.37
Z4	5.33	1.17	19.03	3.50	4.19	11.43	103.04	147.71
Z5	5.56	1.29	15.43	3.19	4.61	22.10	135.65	187.83
Z6	5.72	1.31	20.38	3.03	5.13	11.52	131.74	178.84
Z7	11.14	2.03	21.34	5.12	6.56	20.65	182.61	249.45
Z8	7.86	1.50	16.02	3.78	4.67	11.76	143.48	189.06
Z9	4.94	1.06	15.38	2.85	4.85	23.01	102.39	154.48
Z10	2.23	0.65	56.45	1.18	4.03	6.23	136.96	207.72
Z11	3.97	0.82	22.26	2.09	3.82	7.16	101.74	141.85
Z12	3.97	0.92	21.99	2.17	4.07	8.93	90.00	132.05
Z13	1.75	0.46	41.99	0.47	3.74	8.22	41.74	98.37
Z14	3.17	0.82	32.69	1.03	4.81	9.40	88.04	139.97
Z15	8.06	1.37	22.31	3.56	5.56	8.88	161.09	210.82
Z16	6.89	1.11	24.68	3.10	4.96	7.72	138.91	187.37
Z17	12.94	1.60	21.67	5.69	5.61	10.47	178.70	236.69
Z18	2.36	0.67	23.49	0.64	3.91	7.79	79.57	118.43
Z19	7.53	1.65	27.80	3.18	7.22	11.78	219.13	278.28
Z20	1.42	0.39	40.75	0.50	2.99	12.43	58.70	117.18
Z21	1.62	0.45	29.19	0.65	3.63	12.55	45.00	93.10
Z22	5.11	0.95	31.24	2.87	4.44	9.73	100.43	154.78
Z23	12.86	2.00	21.77	5.31	7.09	10.53	275.22	334.78
Z24	16.50	3.25	14.68	2.91	15.43	10.05	1 023.91	1 086.73
Z25	3.67	0.82	37.96	0.87	5.24	7.32	171.52	227.40
Z29	18.08	3.36	21.67	2.45	16.62	8.37	1 408.70	1 479.25
Z30	17.19	2.79	13.06	3.25	11.16	9.02	645.65	702.13
Z31	3.50	0.80	46.40	0.79	4.15	6.21	142.83	204.67
L1	4.42	0.92	87.63	0.59	3.83	11.05	97.83	206.27
L2	9.81	1.76	34.73	4.72	6.74	11.59	161.74	231.09
L3	9.67	1.69	35.70	2.98	6.82	10.54	228.91	296.31
L4	14.86	2.43	28.60	3.00	9.83	9.02	449.35	517.10
L5	3.61	0.86	38.44	0.61	4.89	5.42	87.39	141.23
L6	19.50	2.90	30.65	3.06	10.85	7.88	671.74	746.58
L7	17.86	2.96	28.87	3.21	11.49	19.93	541.30	625.62
L8	20.75	4.15	26.83	2.21	19.81	6.72	1 473.91	1 554.39
L9	16.14	2.60	16.24	3.34	10.88	5.71	516.52	571.42
L10	14.28	2.76	18.60	4.47	10.94	6.43	436.96	494.44
L11	11.78	2.12	22.58	3.64	8.39	5.31	341.74	395.55
L12	8.28	1.62	23.92	4.57	5.43	8.46	148.04	200.32
L13	12.53	1.79	23.60	6.02	5.65	8.82	141.52	199.93
T1	8.89	1.77	46.02	4.02	6.09	17.19	157.83	241.81
Q4	11.94	1.92	23.82	5.58	5.86	10.53	150.00	209.64
Q5	9.33	1.73	25.32	4.61	6.82	6.97	160.43	215.23
Q6	4.22	1.13	21.18	2.94	4.88	4.42	91.30	130.08
Q1	2.11	0.47	40.05	0.57	3.36	2.03	36.52	85.13
Q2	12.86	2.32	28.39	4.29	9.40	6.34	236.09	299.68
Q3	5.92	1.17	21.72	1.65	5.94	3.77	154.57	194.74
平均值	8.57	1.60	28.07	2.97	6.69	9.58	260.08	317.55

1)据文献[18]，$E_r^i < 40$、$RI < 135$ 为轻微；$40 \leqslant E_r^i < 80$、$135 \leqslant RI < 265$ 为中等；$80 \leqslant E_r^i < 160$、$265 \leqslant RI < 525$ 为强；$160 \leqslant E_r^i < 320$、$RI \geqslant 525$ 为很强；$E_r^i \geqslant 320$ 为极强

值[34]:Cu、Zn、Ni、Cr、Pb、As 和 Cd 的含量分别为 18.0、69.9、9.3、32.1、37.6、5.52 和 0.046 μg/g. C_d 为表层沉积物综合污染程度,E_r^i 为单个金属的潜在生态风险系数,T_r^i 为沉积物中各重金属的毒性系数,本研究采用 Hankanson[18] 制定的标准化重金属毒性系数:Zn(1) < Cr(2) < Cu(5) = Ni(5) = Pb(5) < As(10) < Cd(30). RI 为表层沉积物潜在生态风险指数. 计算得到的泉州湾表层沉积物重金属污染系数及潜在生态风险指数情况见表 3 和表 4.

从表层沉积物重金属污染系数和潜在生态风险指标可以看出(表 2、表 3):①各金属元素污染系数相对较高,一般在中污染以上,其中 Cd 为高污染. 污染程度由低到高的顺序为:As(0.96,低污染) < Pb(1.34,中污染) < Cr(1.48,中污染) < Zn(1.60,中污染) < Cu(1.71,中污染) < Ni(5.61,较高污染) < Cd(8.67,高污染). 各金属元素潜在生态风险指数较小,除 Cd 元素为很强外,其他为轻微. 潜在生态风险指数由低到高的顺序为:Zn(1.60,轻微) < Cr(2.97,轻微) < Pb(6.69,轻微) < Cu(8.57,轻微) < As(9.58,轻微) < Ni(28.07,轻微) < Cd(260.08,很强);②各站位综合污染程度在中等以上,主要污染金属为 Ni 和 Cd,其他金属所占比重较小. 潜在生态风险程度中等左右,主要的生态风险重金属也是 Ni 和 Cd,其他元素较低;③高污染区域与高潜在生态风险程度区域一致,主要集中在晋江与洛阳江河口交汇处,显示重金属的主要来源是晋江入海物质,这与重金属分布特征基本一致.

与以往相关研究对比,本研究中无论是重金属的污染程度还是潜在生态指数都相对高于 2007 年与 2008 年的结果[21,22]. 2008 年的研究中只考虑了污染程度相对较小的 Cu、Zn、Ni、Cr 和 Pb 等元素,没有 As 和 Cd 元素的数据,而本研究结果显示 Cd 元素是整个泉州湾污染程度最高的元素,其影响不可忽略. 与 2007 年研究相比,本研究采用的重金属元素背景值为福建省沿海土壤中重金属的背景值,比全球工业化以前沉积物中重金属的最高背景值更合适. 比如污染程度最高的 Cd 元素,其在福建省沿海土壤中背景值仅为 0.046 μg/g[34],而在工业化以前沉积物中为 0.5 μg/g[18],相差 10 倍多,这也影响了其评价的客观性.

4　结论

(1)泉州湾表层沉积物中重金属含量相对较高,重金属污染依然较严重.

(2)表层沉积物中重金属元素的分布特征与其物质来源相关,Cd、Pb、Zn 和 As 元素含量在河口附近站位最高,主要来源于晋江径流输入;Cr 元素含量在湾周边站位较高,主要来源于海湾周边输入;Ni 和 Cu 元素在河口和湾周边站位都有高值区出现,既有晋江河流输入也有海湾周边输入.

(3)整个泉州湾综合污染及潜在生态风险程度均在中等以上,主要的污染和生态风险重金属是 Ni 和 Cd. 高污染区域位于晋江与洛阳江交汇处.

致谢:本研究在采样过程中得到了黄福兴、陈抨发、苏炎成、蔡清池等的帮助,在此一并表示感谢.

参考文献:

[1] TalauE-McManus L, Smith S V, Buddemeier R W, *et al*. Biophysical and socio-economic assessments of the coastal zone: the LOICZ approach [J]. Ocean and Coastal Management, 2003, **46**(3-4): 323-333.

[2] Martinol M, Turner A, Nimmo M, *et al*. Resuspension, reactivity and recycling of trace metals in the Mersey Estuary, UK [J]. Marine Chemistry, 2002, **77**: 171-186.

[3] Huang K M, Lin S. Consequences and implication of heavy metal spatial variations in sediments of the Keelung River drainage basin, Taiwan [J]. Chemosphere, 2003, **53**: 1113-1121.

[4] Adamo P, Arienzo M, Imperato M, *et al*. Distribution and partition of heavy metals in surface and sub-surface sediments of Naples city port [J]. Chemosphere, 2005, **61**: 800-809.

[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**(5): 504-511.

[6] Fukue M, Yanai M, Sato Y, *et al*. Background values for evaluation of heavy metal contamination in sediments[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **136**: 111-119.

[7] Attrill M J, Thomesm R M. Heavy metal concentrations in sediment from the Thames estuary UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, **30** (11): 742-744.

[8] Mackey A P, Hodgkinson M C. Concentrations and spatial distribution of trace metals in mangrove sediments from the Brisbane River, Australia [J]. Environmental Pollution, 1995, **90** (2): 181-186.

[9] Emmerson R H C, O'reilly-Wiese S B, Macleod C L, *et al*. A multivariate assessment of metal distribution in inter-tidal sediments of the Blackwater estuary, UK [J]. Marine Pollution Bulletin, 1997, **34**(11): 960-968.

[10] 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): 968-980.

[11] Turner A. Trace Metal Contamination in Sediments from U. K. Estuaries: An Empirical Evaluation of the Role of Hydrous Iron and Manganese Oxides [J]. Estuarine, Coastal and Shelf

Science, 2000, **50**: 355-371.

[12] Balachandran K K, Lalu-Raj C M, Nair M, *et al*. Heavy metal accumulation in a flow restricted, tropical estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, **65**: 361-370.

[13] Osher L J, Leclerc L, Wiersma G B, *et al*. Heavy metal contamination from historic mining in upland soil and estuarine sediments of Egypt Bay, Maine, USA [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2006, **70**: 169-179.

[14] 郝泽嘉, 周丰, 郭怀成. 香港海域表层沉积物重金属空间分析[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(6): 110-117.

[15] 左平, 汪亚平, 程军, 等. 深圳湾海域表层和柱样沉积物中的重金属分布特征[J]. 海洋学报, 2008, **30**(4): 71-79.

[16] 张弛, 高效江, 宋祖光, 等. 杭州湾河口地区表层沉积物中重金属的分布特征及污染评价[J]. 复旦学报(自然科学版), 2008, **47**(4): 535-540.

[17] Liu W X, Li X D, Shen Z G, *et al*. Multivariant statistical study of heavy metal enrichment in sediment of the pearl River Estuary [J]. Environmental Pollution, 2003, **121**: 377-388.

[18] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sediment toxicological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[19] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志[M]. (第八分册). 北京: 海洋出版社, 1993. 49-92.

[20] 钟岷源. 拯救泉州湾[J]. 人民政坛, 2007, **9**: 10-14.

[21] 于瑞莲, 胡恭任. 泉州湾沉积物重金属形态特征及生态风险[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2008, **29**(3): 419-423.

[22] 龚香宜, 祁士华, 吕春玲等. 福建省泉州湾表层沉积物中重金属的含量与分布[J]. 环境科学与技术, 2007, **30**(1): 27-29.

[23] 袁建军, 谢嘉华. 泉州湾海洋生态环境质量评价[J]. 福建环境, 2002, **19**(6): 45-46.

[24] 袁建军, 谢嘉华. 泉州湾近岸海域水质状况调查与评价[J]. 台湾海峡, 2003, **22**(1): 14-18.

[25] 于瑞莲, 胡恭任. Cr(Ⅵ)在泉州湾滩涂沉积物上的吸附特性[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2006, **27**(1): 47-49.

[26] 于瑞莲, 胡恭任. 泉州湾滩涂沉积物对 Cu(Ⅱ)的吸附实验[J]. 地球与环境, 2005, **33**(1): 93-96.

[27] 许爱玉, 骆炳坤, 陈松. 泉州湾表层沉积物重金属的地球化学特征[J]. 台湾海峡, 1989, **8**(4): 383-388.

[28] 阮金山, 许翠娅, 罗冬莲. 福建兴化湾海水、沉积物及水产生物体内重金属的分析与评价[J]. 热带海洋, 2000, **19**(1): 52-57.

[29] 张雷, 郑丙辉, 田白强, 等. 西太湖黄型河口区湖滨带表沉积物营养评价[J]. 环境科学与技术, 2006, **29**(5): 4-6.

[30] 罗冬莲, 阮金山, 许翠娅, 等. 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, 2004, **23**(1): 33-36.

[31] 涂勇, 张洪珍. 固定化活性污泥吸附重金属离子的试验研究[J]. 环境科学与技术, 2004, **27**(6): 25-27.

[32] 李桂海. 厦门海域现代沉积环境及重金属元素的环境地球化学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.

[33] Hong L Y, Hong H S, Chen W Q, *et al*. Heavy metals in surface sediments from Minjiang Estuary-Mazu and Xiamen-Jinmen sea areas [J]. Journal of Environmental Sciences, 2003, **15**(1): 116-122.

[34] 程炯, 吴志峰, 刘平, 等. 福建沿海地区不同用地土壤重金属污染及其评价[J]. 土壤通报, 2004, **35**(5): 639-642.