

泉州湾悬浮颗粒物中重金属的分布特征及其影响因素

黄财宾¹, 李云海^{1,2*}, 陈坚¹, 王爱军¹, 李东义¹

(1. 国家海洋局第三海洋研究所, 厦门 361005; 2. 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)

摘要:利用等离子质谱仪(ICP-MS)对泉州湾 6 个 13 h 连续站悬浮颗粒物及 2 个 13 h 连续站(Q2 和 Q4 站)表层沉积物中 Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb 和 Cd 等元素的含量进行测试, 悬浮颗粒物中其平均含量分别在 1.610~0.359、0.730~0.150、2.249~0.319、6.421~1.266、0.131~0.027、4.176~1.101 $\mu\text{g/L}$ 和 17.526~2.260 ng/L 之间, 从内湾向外湾逐渐降低; 表层沉积物中其平均含量分别在 65.3~82.6、37.8~39.8、37.4~51.4、121.0~172.8、3.3~3.4、42.2~76.9 和 0.217~0.493 $\mu\text{g/g}$ 之间, Q2 站含量一般高于 Q4 站的. 综合分析 1 个潮周期内重金属含量及其分布特征发现: 河口及其附近海域悬浮颗粒物中重金属含量变化相对较大, 其分布特征与潮汐及河口过程相关; 外湾的含量变化相对较小, 其变化受局地表层沉积物再悬浮的影响要大于潮汐影响下的河流输入影响; 表层沉积物中重金属的含量变化与悬浮颗粒物中的可以相对应, 指示了两者之间的交换. 本研究结果为全面了解泉州湾重金属的分布、运移和交换提供了重要参考.

关键词:泉州湾; 悬浮颗粒物; 重金属; 表层沉积物; 分布与交换

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)05-1167-09

Distribution Patterns of Heavy Metals in Suspended Particles of the Quanzhou Bay and Their Influence Factors

HUANG Cai-bin¹, LI Yun-hai^{1,2}, CHEN Jian¹, WANG Ai-jun¹, LI Dong-yi¹

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

Abstract: Based on the inductively coupled plasma mass spectroscopy (ICP-MS) data of concentrations of 7 heavy metals (including Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb and As) in suspended particles and surface sediments samples collected at 6 and 2 13-hours-mooring stations, respectively, in Quanzhou Bay. The average contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, Pb, and Cd are 1.610-0.359, 0.730-0.150, 2.249-0.319, 6.421-1.266, 0.131-0.027, 4.176-1.101 $\mu\text{g/L}$ and 17.526-2.260 ng/L , respectively, in different stations in the suspended particles and are 65.3-82.6, 37.8-39.8, 37.4-51.4, 121.0-172.8, 3.3-3.4, 42.2-76.9 and 0.217-0.493 $\mu\text{g/g}$, respectively, in the surface sediments of two stations. The concentrations of heavy metals in suspended particles varied significantly and the distribution patterns corresponded to the tidal and estuarine processes at the estuary area in a tidal cycle. While at the outer area, the varieties of concentrations were relatively unobvious and the re-suspension from surface sediments might play a significant role on distribution patterns of heavy metals in suspended particles. In a tidal cycle, the varieties of heavy metals concentrations in surface sediments were corresponding to that in suspended particles', which indicated that exchanges of heavy metals existed between surface sediments and suspended particles. These study results provide a reference to comprehensive understanding on distribution, migration and exchange of heavy metals in the Quanzhou Bay.

Key words: Quanzhou Bay; suspended particles; heavy metals; surface sediments; distribution and exchange

河口海湾是陆源物质向海运输的主要通道,也是受人类活动影响最强烈的地区^[1]. 人类活动产生的重金属污染物质通过河口进入海湾,进而向外海扩散运输. 陆源输入的重金属污染物大部分被吸附在悬浮颗粒物中,并随之在河口附近迅速沉降到沉积物中,沉降下的部分重金属污染物在人类活动、物理、化学以及生物过程作用下,又会返回上覆水(大部分重金属污染物是随再悬浮的颗粒物重新进入水体中的),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,但重金属在与沉积物永久结合之前,通过水-沉积物界面循环多次,其结果:一方面结合于沉积物中的重金属被释

放出来,造成“二次污染”,即沉积物中污染物的长期积累与突然释放;另一方面,再悬浮的细颗粒物被水流带至其它海域,使重金属在更大范围内进行重新分配,这也是一个污染物的扩散过程^[2-8]. 悬浮颗粒物在重金属交换过程中起到了重要的纽带作用^[9-12]. 另外,在河口附近,2种性质及组分截然不同的水体(携带大量重金属污染物的径流和相对

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:黄财宾(1953~),男,工程师,主要研究方向为海洋地质学, E-mail: jrly911@sina.com

* 通讯联系人, E-mail: liyunhai1980@gmail.com

“洁净”的海水)在潮汐影响下相互作用,此消彼长,会直接影响重金属污染物的搬运、沉降和再悬浮、再搬运、再沉积过程^[11,12].

河口海湾是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,悬浮颗粒物在其中起到了纽带作用^[9-12].近年来,对潮汐影响下河口海湾重金属污染物在悬浮颗粒物及表层沉积物中的分布和交换开展了大量的研究工作^[10-18].这些研究的成果,使得人类对重金属污染物在河口海湾沉积环境内循环的认识更加全面,为科学制定环境保护和治理政策提供了重要的依据.

泉州湾水体及沉积物中重金属的含量、分布等研究开展较早,这些研究主要集中在潮滩、表层沉积物和海湾水体环境质量上^[19-28],尚未见到专门针对悬浮颗粒物中重金属分布特征的研究,该方面的研究在我国其他海域也不多见.本研究在分析悬浮颗粒物中重金属分布特征及其影响因素的基础上,与底质沉积物中重金属的分布特征进行对比,探讨重金属在悬浮颗粒物与表层沉积物之间的交换,以期全面了解泉州湾重金属的分布、运移和交换提供参考.

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13h连续站6个,每站采样间隔为2~3h. Q1站位于晋江入海口处,底质为细砂,主要受径流和涨潮海水交替控制; Q2站位于晋江与洛阳江入海口的交界处,底质为粉砂质粘土,晋江径流仅在低平潮前后能直接扩散至该站; Q3站位于泉州湾的内湾和外湾交界处,底质类型为砂质粘土; Q4站位于泉州湾外湾内侧,沉积动力环境相对较稳定,底质为粉砂质粘土; Q5和Q6站分别位于泉州湾与外海交汇处,受外海水影响较大,底质为粘土质粉砂.

根据水深设定采样层位,水深<5m时采3层,5~7m时采4层,7~10m时采5层,>10m时采6层,利用有机玻璃采水器,每层采水样2L.所有水样在13日统一用事先称重的双层微孔滤膜(直径为47mm,孔径为0.45μm)抽滤,抽滤体积为1000~1500mL.滤膜经洗盐后在实验室内低温下(<40℃)烘24h之后用精度为十万分之一的电子天平称其质量.在采水样的同时,利用不锈钢蚌式抓斗采集对应时段的底质样,采集后用木勺取其表层约3

cm厚样品装入样品袋中,以备实验室分析.

1.2 实验室分析

在实验室将烘干后的滤膜及表层沉积物样品放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(前处理过程及分析方法见DZ/T0223-2001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%.各元素含量单位为μg/g,根据抽滤水样体积与滤膜抽滤前后质量将滤膜样品中元素含量单位换算为μg/L, Cd元素含量极低,单位为ng/L.

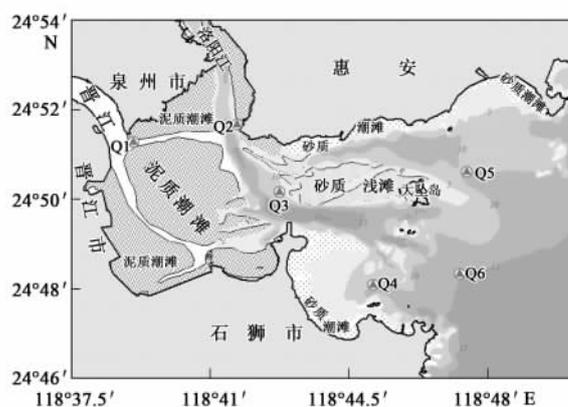


图1 泉州湾取样站位示意

Fig. 1 Investigated areas and sampling sites

2 结果与分析

2.1 重金属在悬浮颗粒物中的含量

悬浮颗粒物中各元素含量情况见表1,从中可以看出:①同一站位悬浮颗粒物中同一元素含量变化较大,最大值是最小值的几倍到上百倍,显示出不同时刻以及不同层位元素组成及含量的差异较大;②悬浮颗粒物中同一元素在不同站位的含量差别较大,最高含量是最低含量的6~10倍. Pb元素的含量变化最小(在Q1站最高,为4.176μg/L,在Q6站最低,为1.101μg/L),说明整个海水中Pb元素的背景值较高,可能是受到湾内船舶排污及大气沉降等的影响;③总体看,悬浮颗粒物中元素含量在河口附近最大(Q1站),并从内湾向外湾逐渐降低.在内外湾交界的Q3站即降到与外湾3个站位(Q4、Q5、Q6站)相当的水平.不同站位悬浮颗粒物中重金属

元素含量的差别与表层沉积物中的略有不同(尤其是在河道内 Q1 站)^[28],这种分布特征及其差异显示了悬浮颗粒物中各元素主要由晋江径流带来,随颗粒

物在河口附近最大混浊带(而非河道内)迅速沉降到了沉积物中,悬浮颗粒物和表层沉积物在此过程中分别充当了重金属运移的载体和归宿的作用。

表 1 悬浮颗粒物中重金属含量的统计特征

Table 1 Statistics values of heavy metals in suspended particles

站位	项目	Cr/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Ni/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Cu/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Zn/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	As/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	Cd/ng $\cdot \text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
Q1	最大值	3.443	1.535	4.584	13.631	0.276	37.682	10.742
	最小值	0.110	0.119	0.156	0.542	0.006	1.182	0.358
	平均值	1.610	0.730	2.249	6.421	0.131	17.526	4.176
Q2	最大值	1.663	0.875	1.318	4.846	0.137	9.879	3.660
	最小值	0.314	0.115	0.357	1.425	0.031	2.818	0.690
	平均值	0.811	0.400	0.742	2.818	0.066	6.396	2.157
Q3	最大值	1.064	0.432	0.964	3.639	0.082	20.227	4.309
	最小值	0.185	0.008	0.153	0.638	0.015	0.970	0.578
	平均值	0.477	0.208	0.517	1.969	0.040	4.412	1.805
Q4	最大值	7.082	3.237	2.966	12.166	0.343	18.727	6.226
	最小值	0.221	0.039	0.204	0.806	0.014	1.136	0.619
	平均值	0.646	0.333	0.474	1.834	0.042	3.534	1.585
Q5	最大值	1.302	0.610	0.653	5.152	0.105	6.091	5.166
	最小值	0.157	0.046	0.172	0.694	0.016	1.682	0.552
	平均值	0.458	0.211	0.400	1.774	0.038	3.040	1.249
Q6	最大值	1.173	0.459	0.882	2.635	0.081	4.667	3.845
	最小值	0.209	0.021	0.146	0.835	0.014	1.318	0.433
	平均值	0.359	0.150	0.319	1.266	0.027	2.260	1.101

2.2 重金属在悬浮颗粒物中的分布特征及其影响因素

为了全面了解重金属元素在水体中的分布、变化及其影响因素,选择 Q1、Q2 和 Q4 这 3 个站位探讨 1 个潮周期内水体中各元素含量变化情况. Q3 站位于航道附近,观测期间由于船舶通行,几次移位,水深及底质类型差异巨大; Q5、Q6 站位于外海,主要为外海水控制,水体悬浮颗粒物中各元素含量较小,不同时刻的变化不大,均不具有典型对比性。

泉州湾潮汐类型为正规半日潮,平均潮差 4.27 m,属强潮海湾^[19]. 为了便于对比,在绘制悬浮颗粒物重金属含量分布图时,将高平潮时刻作为时间轴原点,低平潮时刻为 6,将实际取样时间按照落潮-涨潮时间关系换算成大于 0 的值. Q1、Q2 站取样时间为 2008 年 7 月 12 日 07:00 ~ 19:00,12 日高平潮时间为 06:30; Q4 站取样时间为 2008 年 7 月 10 日 18:00 ~ 次日 06:00 时,坐标原点为 10 日高平潮时间(17:15)。

Q1 站位于晋江入海口处,受晋江径流和涨潮海水交替控制. 悬浮颗粒物中各元素含量的分布模式类似(图 2),表现为:垂向混合均匀,水平梯度大;在高平潮时各元素含量最低,随着落潮的进行,迅速升

高,并在低平潮前达到最高,之后随着涨潮的进行,元素含量又逐渐降低,并在 08:00 ~ 12:00 时(坐标为 2 ~ 6)的水体中层出现最高含量中心[13:00(横坐标为 7)附近水体中部相对低含量点可能是样品误差引起,应剔除];表层水体悬浮颗粒物中各元素含量相对较低。

Q1 站水体悬浮颗粒物中各元素含量的分布表现出了强烈的潮汐性特征(图 2). 这种变化特征与各元素主要为径流输入相一致. 高平潮时,在各元素含量较低的海水顶托、控制下,元素含量相对较高的径流限制在河道感潮段上端,水体悬浮颗粒物中重金属元素含量最低. 落潮开始后携带大量重金属元素的径流水迅速进入湾内,相应的各元素含量急剧升高. 由于径流在高平潮时在河流感潮段上端河道内堆积,产生积聚效应,各元素含量会比正常径流中的略高,故各元素含量最高值出现在低平潮之前. 低平潮时,入海水体为正常径流,元素含量相对较高,但小于低平潮之前的量. 低平潮之后,海水开始入侵,水体中元素含量又逐渐降低,至高平潮时降到最低. 受到悬浮颗粒物沉降的影响,水体表层悬浮颗粒物含量相对较低,其中各元素含量也自然要低于中下层水体中的。

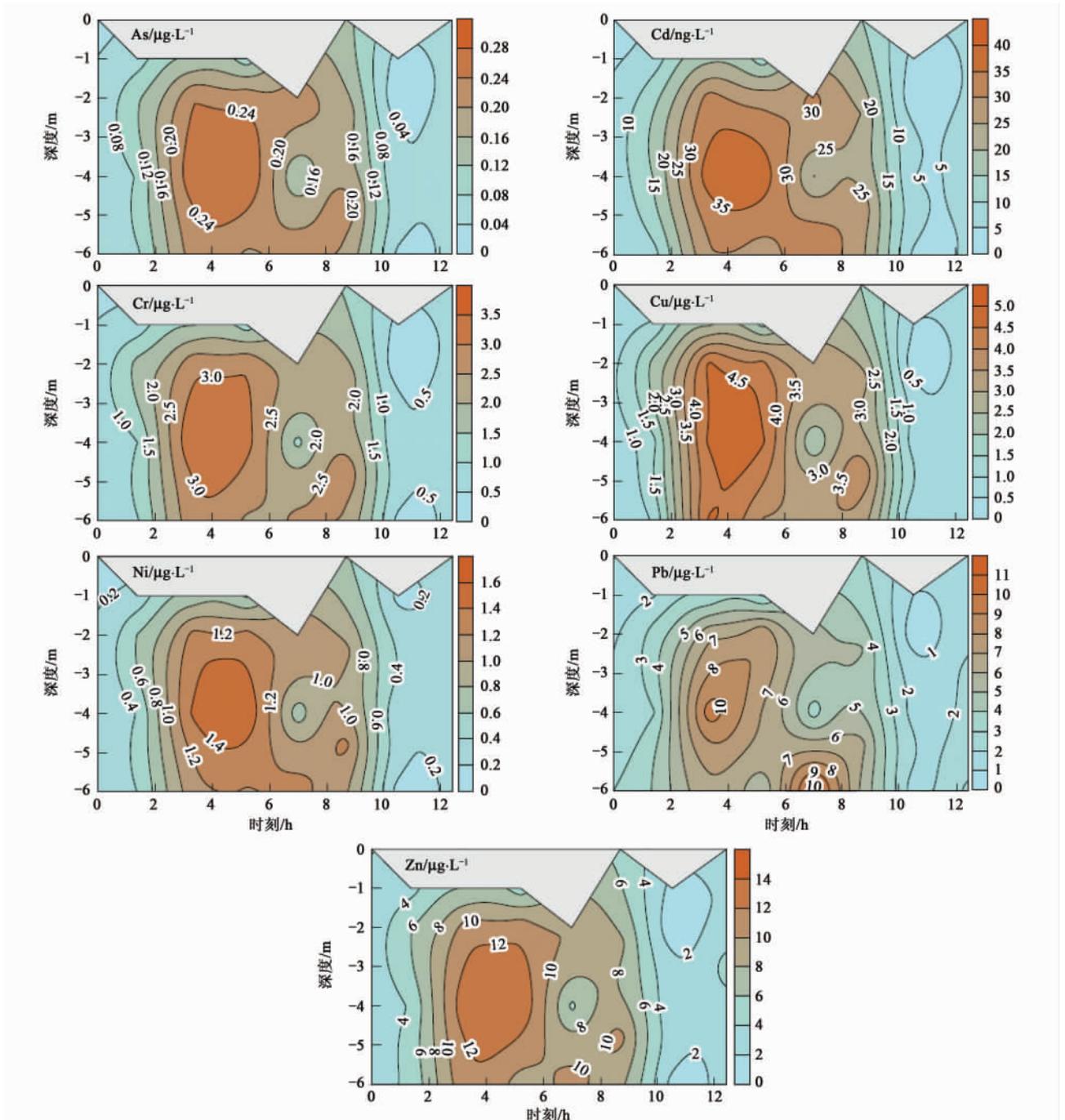


图2 Q1站悬浮颗粒物中重金属分布

Fig. 2 Distribution patterns of heavy metals in the suspended particles at station Q1

Q2 站位于洛阳江入海口附近, 洛阳江已经筑坝隔断, 无径流入海, 残存江段为海水^[19], 晋江径流在低平潮时可以扩散至 Q2 站附近. 悬浮颗粒物中各元素含量变化情况与 Q1 站有较大差异, 元素含量变化幅度明显比 Q1 站要小(图 3). 悬浮颗粒物中各元素分布模式类似: 高平潮时悬浮颗粒物中各元素含量最低, 随着落潮进行, 元素含量有所升高; 元素含量较高的水体主要集中在水体下部, 在低平潮前

后存在 2 个高含量中心; 在水体上部最高含量中心与 Q1 站分布位置不同, 在低平潮之后的涨潮时段.

Q2 站水体悬浮颗粒物中各元素含量的分布特征也表现出了潮汐性特征, 与 Q1 站不同的是高含量中心出现在低平潮之后. 受地形及河流惯性影响, 晋江径流在刚落潮时主要从西侧支流及在泥质潮滩上呈辐射状向湾内输运, 少部分从北侧支流流入湾内, 洛阳江落潮时流出为海水, 故在低平潮前 Q2 站

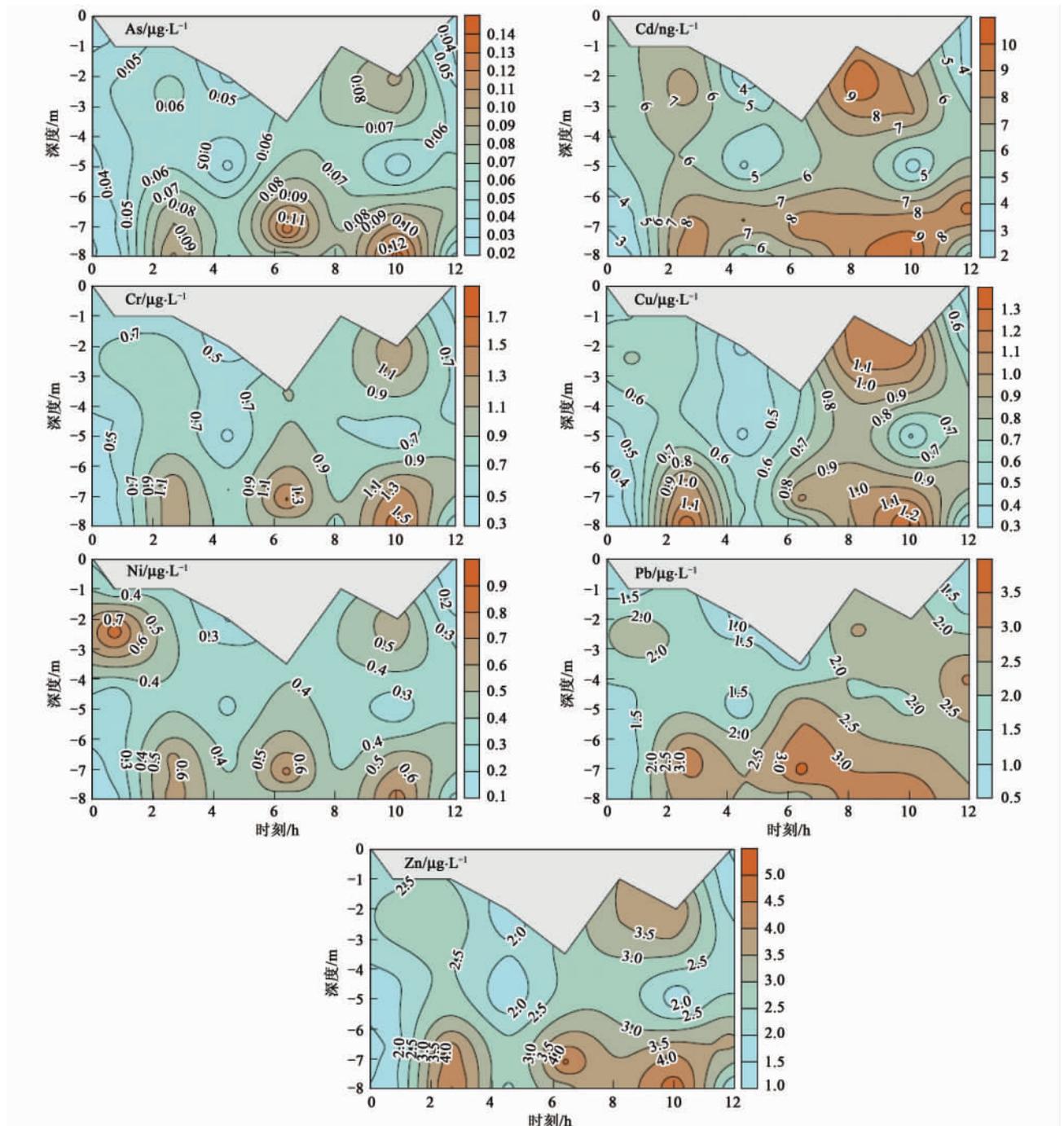


图3 Q2站悬浮颗粒物中重金属分布

Fig. 3 Distribution patterns of heavy metals in the suspended particles at station Q2

水体悬浮颗粒物中各元素含量仍然较低;在落潮后期晋江西侧支流及泥质潮滩已完全出露,晋江径流主要从北侧支流入湾,故此段时间Q2站水体表层(为晋江冲淡水)悬浮颗粒物中各元素含量明显升高.同时,该站位置特殊,在北侧是洛阳江残存河道,为相对闭塞的海水,西侧和南侧基本上是晋江的最大混浊带区域,水动力较弱,晋江径流携带的悬浮颗

颗粒物在周围沉降,故在水体下部整个时段内颗粒物含量丰富,包括径流入海时沉降颗粒物以及在潮汐作用下径流与海水混合引起底质沉积物再悬浮的颗粒物,两部分悬浮颗粒物中重金属含量都较正常海水中高,故在水体中下部存在高重金属含量区.在高平潮时该站水体主要为海水,元素含量相对较低.

Q4站位于泉州湾外湾南侧小湾内,沉积环境较

稳定. 水体悬浮颗粒物中各元素含量(除 Pb 外)分布模式类似, 含量变化不大, 仅在涨潮期间(坐标轴 10)存在由水体底部向上扩散的相对高值区, 该高值区的

形成可能与水体底质沉积物再悬浮有关. Pb 元素在高平潮时在整体水体中含量都较高, 其原因可能是局地污染(靠近码头, 船舶较多)造成的(图 4).

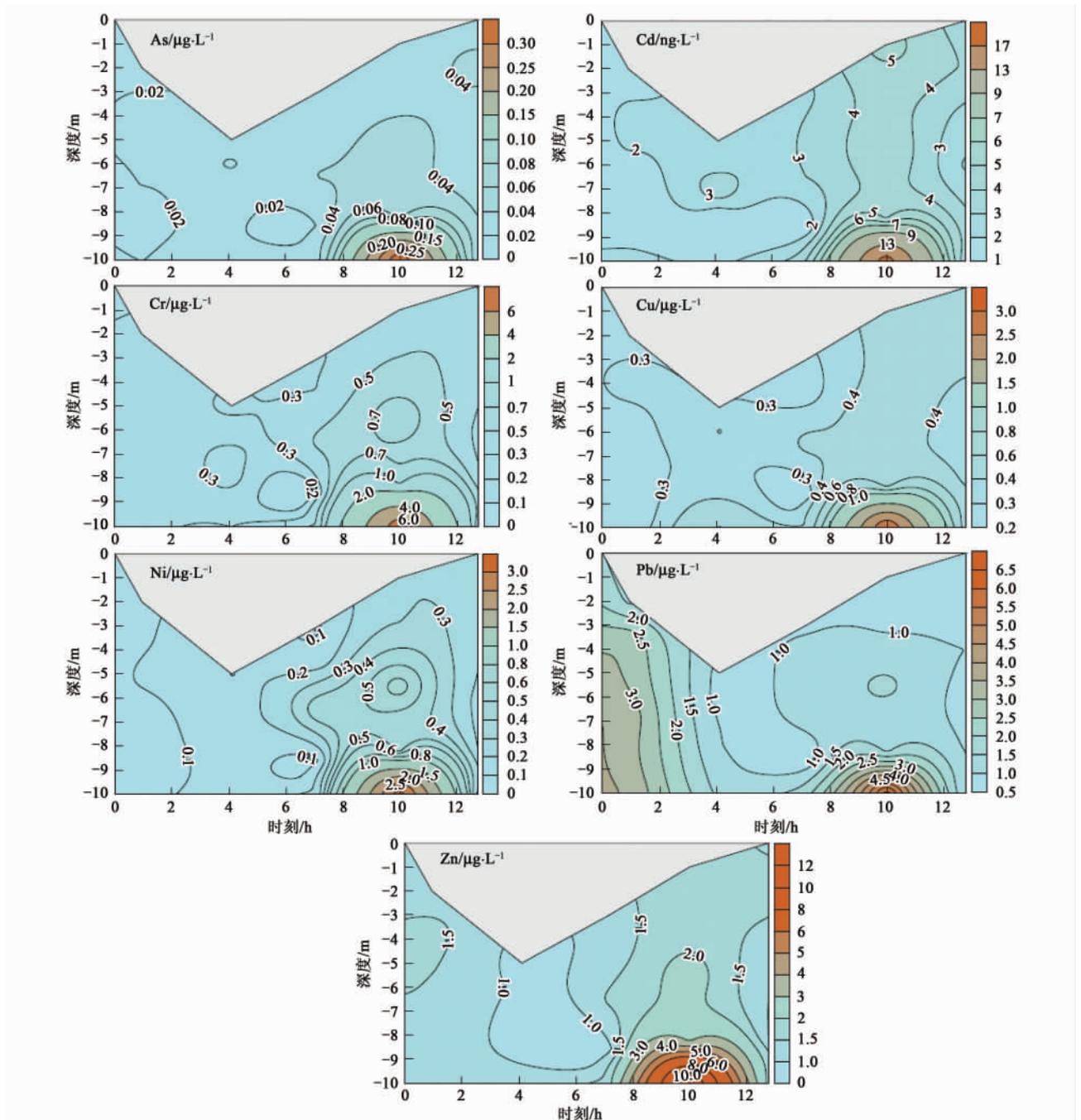


图 4 Q4 站悬浮颗粒物中重金属分布

Fig. 4 Distribution patterns of heavy metals in the suspended particles at station Q4

综上所述, 根据各站悬浮颗粒物中重金属含量及分布特征来看: 泉州湾水体悬浮颗粒物中重金属主要是晋江径流带入, 随着悬浮颗粒物在河口最大混浊带附近快速沉降, 其中重金属含量从河口向外湾降低, 在河口最大混浊带附近降幅最大; 在河流径

流难以直接影响的海域, 局地污染(船舶等)以及海湾周边排海污染物在水体悬浮颗粒物、重金属污染物中所占比重有所增加, 甚至大于河流径流的影响; 在河口及其附近海域, 潮汐过程控制的海水和淡水的混合作用导致水体悬浮颗粒物中重金属分布具有

潮汐性特征,一般在低平潮附近出现含量的峰值,出现层位及时间随地理位置不同而显著差异;在河流径流难以直接影响的海域,水体悬浮颗粒物中重金属元素的分布特征基本不受潮汐控制,底质沉积物的在悬浮过程成为重要的影响因素.

2.3 重金属在悬浮颗粒物与表层沉积物之间的交换

重金属污染物进入海湾,大部分在物理沉淀、化学吸附及生物等作用下迅速由水相转入固相,海底沉积物成为水体重金属的累积库^[4-8,29].海底沉积物是一个开放的系统,沉降到沉积物中的重金属在人为(海洋抽砂、航道疏浚等)和自然(界面交换、风暴搅动、潮汐等)等作用下,随着再悬浮的颗粒物与水体进行交换,并在海湾内再扩散、再分配和再沉积,及向外海扩散,改变了重金属原有的分布格局,对海湾原有的重金属污染状况产生直接影响.以下根据 Q2 和 Q4 站 1 个潮周期内表层沉积物中重金属含量变化特征及其与上覆水体悬浮颗粒物中的分布进行对比,对重金属在两者之间的交换进行初步探讨.

从 Q2 站表层沉积物中重金属含量变化情况可以看出(图 5):除 Cr 和 Ni 元素外,其他 5 种元素都表现出高平潮时含量较低,随着退潮的进行含量逐

渐增加,在低平潮前后达到最高,之后又逐渐降低的趋势.这种变化趋势与悬浮颗粒物中重金属含量在一个潮周期内的变化恰好相对应(图 3).这种对应关系反映出在退潮及涨潮期间,Q2 站在重金属含量较高的晋江冲淡水的控制下,高重金属元素含量的颗粒物迅速沉降,显著增加了底质沉积物中相应元素的含量.根据表层沉积物中重金属元素的分布特征可以看出:Cr 元素主要来源于泉州湾周边,而非晋江径流输入;泉州湾东北侧海岸是 Ni 元素除由晋江径流输入外的另一个重要物源^[28].表层沉积物中两元素的含量并不主要受控于晋江径流,从而也不存在像其他元素一样的河口潮汐变化趋势,故在高平潮时底质中含量较高,随着落潮及涨潮中径流的影响(径流中两元素含量相对底质中的背景值低,相当于稀释作用),元素含量出现降低趋势.

位于外湾沉积环境相对稳定的 Q4 站,1 个潮周期内底质沉积物中各重金属元素含量变化幅度明显小于河口附近的 Q2 站,除 Cr 与 Ni 元素外(Cr 与 Ni 元素的物质来源与其他元素有较大差异^[26]是造成该站含量增加的原因),其他元素含量都较 Q2 站低(图 5).1 个潮周期内,除 Pb 元素外的其他 6 种元

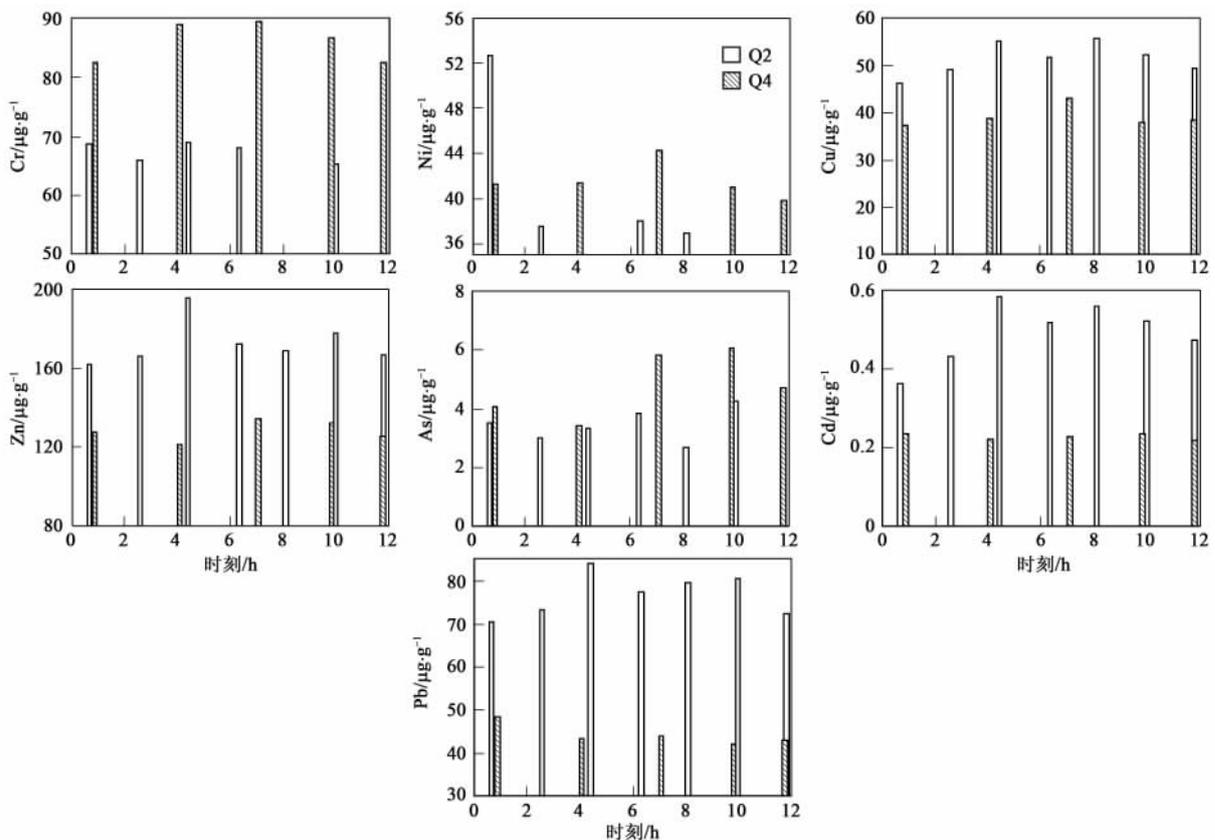


图 5 Q2、Q4 站表层沉积物中重金属分布

Fig. 5 Distribution patterns of heavy metals in surface sediments at station Q2 and Q4

素的含量变化与 Q2 站的相类似,在低平潮附近最高.在涨潮期间(坐标轴 10),表层沉积物中各元素含量相对低平潮时要低,而在水体最底层的悬浮颗粒物中各元素含量相对低平潮时要高,同时,水体悬浮颗粒物中重金属含量在其他时刻没有明显变化.综合来看,水体悬浮颗粒物中重金属含量在涨潮期间的迅速增加应该是底质的再悬浮造成的,而此时水动力较强,有利于表层沉积物的再悬浮.沉积物中 Pb 元素含量变化不大,在高平潮时最高,同时整个水体悬浮颗粒物中的 Pb 元素含量也非常高,而其他元素没有显著变化(图 4).高平潮时水动力较弱,有利于颗粒物的沉降,综合来看,高平潮是表层沉积物中 Pb 元素含量的略微增加极可能是悬浮颗粒物沉降引起的.

综上所述,1 个潮周期内,Q2 和 Q4 站表层沉积物中重金属含量变化也存在明显的潮汐性特征,并且与上覆水体悬浮颗粒物中重金属含量互相对应,反映了两者之间的交换.交换过程包括了相对高重金属含量的悬浮颗粒物在河口及其附近海域迅速沉降,增加了底质沉积物中相应元素的含量;相对高重金属含量的底质沉积物在人为、生物、自然等作用下发生再悬浮,并在水体中扩散,增加了悬浮颗粒物中相应元素的含量.

3 结论

(1)泉州湾水体悬浮颗粒物中重金属含量在河口及其附近海域变化较大,其分布特征与潮汐及河口过程相关;在泉州湾外湾含量变化相对较小,表层沉积物的再悬浮是影响水体悬浮颗粒物中重金属含量和分布的重要因素.

(2)表层沉积物中重金属的含量变化与悬浮颗粒物中的相对应,两者之间存在明显的交换.

致谢:本研究在采样过程中得到了黄福兴、陈坪发、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 Coast Manage*, 2003, **46** (3-4):323-333.
- [2] Martinoi M, Turner A, Nimmo M, *et al.* Resuspension, reactivity and recycling of trace metals in the Mersey Estuary, UK [J]. *Mar Chem*, 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]. *Mar Pollut Bull*, 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]. *J Hazard Mater*, 2006, **136**: 111-119.
- [7] 陈宗团,徐立,洪华生.河口沉积物-水界面重金属生物地球化学研究进展[J]. *地球科学进展*, 1997, **12**(5): 434-439.
- [8] 黄小平,李向东,岳维忠,等.深圳湾沉积物中重金属污染累积过程[J]. *环境科学*, 2003, **24**(4): 144-149.
- [9] Saulnier I, Mucci A. Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada [J]. *Appl Geochem*, 2000, **15**: 203-222.
- [10] Huan F, Cochran J K, Hirschberg D J. Transport and sources of metal contaminants over the course of tidal cycle in the turbidity maximum zone of the Hudson River estuary [J]. *Water Res*, 2002, **36**(3): 733-743.
- [11] Lacerda L D, Martinelli L A, Rezende C E, *et al.* The fate of trace metals in suspended matter in a mangrove creek during a tidal cycle [J]. *Sci Total Environ*, 1988, **75**(2-3): 169-180.
- [12] Martin K, Klaus W. Remobilization events involving Cd and Zn from intertidal flat sediments in the elbe estuary during the tidal cycle [J]. *Estuar Coast Shelf S*, 1992, **35**(4): 371-393.
- [13] Zhang J. Heavy metal compositions of suspended sediments in the Changjiang (Yangtze River) estuary: significance of riverine transport to the ocean [J]. *Cont Shelf Res*, 1999, **19**(12): 1521-1543.
- [14] Van Alsenoy V, Bernard P, Van Grieken R. Elemental concentrations and heavy metal pollution in sediments and suspended matter from the Belgian North Sea and the Scheldt estuary [J]. *Sci Total Environ*, 1993, **133**(1-2): 153-181.
- [15] Woiitke P, Wellnitz J, Helm D, *et al.* Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube [J]. *Chemosphere*, 2003, **51**(8): 633-642.
- [16] Perićñez R. Environmental modelling in the Gulf of Cadiz: Heavy metal distributions in water and sediments [J]. *Sci Total Environ*, 2009, **407**(10): 3392-3406.
- [17] Radakovitch O, Roussiez V, Ollivier P, *et al.* Input of particulate heavy metals from rivers and associated sedimentary deposits on the Gulf of Lion continental shelf [J]. *Estuar Coast Shelf S*, 2008, **77**(2): 285-295.
- [18] Dunn R J K, Teasdale P R, Warnken J, *et al.* Evaluation of the in situ, time-integrated DGT technique by monitoring changes in heavy metal concentrations in estuarine waters [J]. *Environ Pollut*, 2007, **148**(1): 213-220.
- [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]. *人民政协*, 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] 李云海,陈坚,黄财宾,等. 泉州湾沉积物重金属分布特征及环境质量评价[J]. 环境科学,2010,31(4):931-938.
- [29] 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]. Environ Pollut, 2003, 121:377-388.