

# 台风“凤凰(Fung-wong)”对泉州湾重金属分布的影响

李云海<sup>1,2</sup>, 陈坚<sup>2</sup>, 陈建宁<sup>2</sup>, 黄财宾<sup>2</sup>, 王爱军<sup>2</sup>, 李东义<sup>2</sup>

(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)测定了台风“凤凰(Fung-wong)”登陆后泉州湾6个13h连续站悬浮颗粒物及1个13h连续站(Q4站)表层沉积物的样品中Cr、Ni、Cu、Zn、As、Pb和Cd等元素的含量. 表层沉积物中其平均含量分别为60.4、50.3、26.5、101.7、3.36、40.0和0.180  $\mu\text{g/g}$ ; 悬浮颗粒物中其平均含量分别在1.108~7.408、0.476~3.394、0.809~5.046、3.190~19.337、0.087~0.595、2.621~10.073  $\mu\text{g/L}$ 和4.160~50.828  $\text{ng/L}$ 之间, 从内湾向外湾逐渐降低. 与平静海况下相同站位和潮时中相同元素含量及分布进行对比, 结果显示台风过境后在1个潮周期内的样品中重金属含量和分布特征较正常海况下均有显著变化: Q4站表层沉积物中除Ni元素显著增加外, 其他元素含量明显降低, 分布特征与正常海况下类似, 但变化幅度增加; 悬浮颗粒物中重金属含量增加, 其分布特征与正常海况下的有显著差异, 因地理位置而异. 台风期间的强动力过程导致的重金属“二次污染”, 以及伴随的强降雨增加了入海物质及其扩散范围是影响重金属含量和分布的直接原因. 本研究结果将为泉州湾重金属污染的准确评价和科学治理提供依据, 为评估台风对重金属污染的综合影响提供直接佐证.

**关键词:**泉州湾; 重金属; 台风“凤凰(Fung-wong)” ; 表层沉积物; 悬浮颗粒物

中图分类号: X145 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)06-1450-09

## Impact of Typhoon “Fung-wong” on the Distribution Patterns of Heavy Metals in the Quanzhou Bay

LI Yun-hai<sup>1,2</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, CHEN Jian-ning<sup>2</sup>, HUANG Cai-bin<sup>2</sup>, WANG Ai-jun<sup>2</sup>, LI Dong-yi<sup>2</sup>

(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 Administration, Xiamen 361005, 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 1 13-hours-mooring stations, respectively, in Quanzhou Bay 4 days after the landing of typhoon “Fung-wong”. The average contents of Cr, Ni, Cu, Zn, As, and Cd are 60.4, 50.3, 26.5, 101.7, 3.36, 40.0 and 0.180  $\mu\text{g/g}$ , respectively, in the surface sediments, and are 1.108-7.408, 0.476-3.394, 0.809-5.046, 3.190-19.337, 0.087-0.595, 2.621-10.073  $\mu\text{g/L}$  and 4.160-50.828  $\text{ng/L}$ , respectively, in different stations in the suspended particles. The contents and distribution patterns of 7 heavy metals during a tidal cycle were significantly changed after typhoon “Fung-wong” by contrasting with that in same stations and tidal time at an ordinary situation. The contents of heavy metals, besides Ni, evidently decreased but the distribution patterns were similar with that in an ordinary condition with relatively large grads after typhoon “Fung-wong” in the surface sediments at station Q4. While in the suspended particles, the contents of heavy metals were evidently increased with the distribution patterns varied obviously and differently due to their geographical position after typhoon “Fung-wong”. These impacts of typhoon “Fung-wong” to the contents and distribution patterns of heavy metals could be attribute to the “second contamination” and the increased supply of particles materials from continent during the typhoon process. The results of this study provide a reference to accurate assessing and scientific governing the heavy metals’ contamination, and provide a directly support to evaluating the integrated impacts of typhoon process on the contamination of heavy metals in the Quanzhou Bay.

**Key words:** Quanzhou Bay; heavy metals; typhoon “Fung-wong”; surface sediments; suspended particles

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<sup>[1]</sup>. 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,又会返回上覆水中,造成“二次污染”. 另外,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,是一个污染物的扩散过程<sup>[2-9]</sup>. 其中短时间尺度的冬季风暴及夏季台风等强动力过程对重金属的“二次污染”和重新分配影响巨大.

台风过程是短时间尺度的极端天气过程. 伴随

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-1-09)

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

的强动力过程引起细粒级颗粒物的再悬浮、再搬运和再沉积<sup>[10-13]</sup>,重金属随之向上覆海水中扩散,引起重金属的“二次污染”。同时,台风带来的强降雨,也增加了入海径流通量(包括重金属通量)及其扩散范围。其综合效应导致沉积物在海湾内再悬浮、再沉积和再分配,及其向外海的扩散,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。由于台风期间取样难度较大,相关研究开展较晚,目前随着取样手段的不断提高和调查仪器的不断改进,关于台风等极端天气对河口海岸以及陆架颗粒物沉积过程的研究已有开展<sup>[12-18]</sup>,但对河口海湾重金属分布、运移及交换影响的专门研究尚未见到报道。

泉州湾湾口开敞,口阔底浅,水域面积大,水体交换好<sup>[19]</sup>,水体结构、底质沉积物和海洋环境极易受到台风强烈影响。福建沿海是我国受台风影响最严重的海域之一,影响福建沿海的台风频率和强度在全国高居第二位<sup>[20]</sup>,台风过程对泉州湾水体和沉积物中的重金属的分布、转移和扩散应该有重大影响,但由于台风期间取样难度较大,在我国其他海域也不多见,因此有关台风过程对重金属分布影响的研究尚鲜见报道。本研究在对比台风“凤凰(Fung-wong)”过境后与平静海况下<sup>[21]</sup>泉州湾表层沉积物与水体悬浮颗粒物中重金属含量和分布特征的基础上,探讨台风的动力与海洋水文效应对重金属含量、分布的影响,以期为全面了解泉州湾重金属的分布、运移和交换,评价台风对重金属分布影响提供直接佐证,为泉州湾重金属污染评价和治理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 台风“凤凰(Fung-wong)”情况简介

台风“凤凰(Fung-wong)”是2008年登陆我国的最强的台风,登陆强度大、风大雨急、影响时间长、影响范围广,于2008年7月28日22:00在福建省福清市登陆,登陆时风力达12级,风速33 m/s。在我国影响时间非常长,直至7月31日才停止编号<sup>[22]</sup>。登陆点距离泉州湾约110 km,距离小于台风12级风圈。泉州湾内水浅滩多,只能用小型渔船进行观测取样,直至8月2日渔船才能出港。

### 1.2 研究区域及样品采集

调查研究区域及采样站位见图1,调查时间为2008年8月2日。共布设13 h连续站6个,每站采样间隔为2~3 h。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。

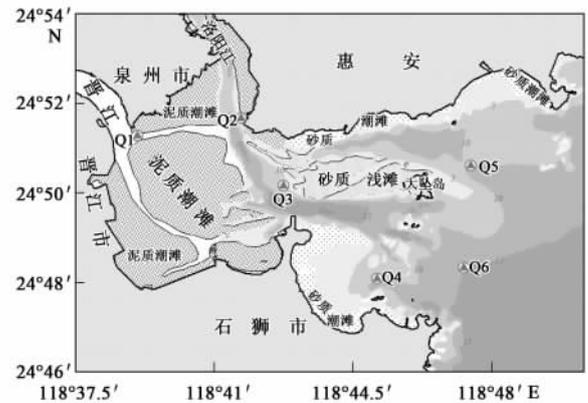


图1 泉州湾取样站位示意<sup>[21]</sup>

Fig. 1 Investigated areas and sampling sites

根据水深设定采样层位,水深<5 m时采3层,5~7 m时采4层,7~10 m时采5层,>10 m时采6层,利用有机玻璃采水器,每层采水样2 L。所有水样在8月3日统一用事先称重的双层微孔滤膜(直径为47 mm,孔径为0.45 μm)抽滤,抽滤体积为1 000~1 500 mL。滤膜经洗盐后在实验室内低温下(<40℃)烘24 h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厚约3 cm的样品装入样品袋,以备实验室分析。

为便于对比,本次调查站位及方法与2008年7月10~12日正常海况下的调查完全一致,正常海况下调查情况见文献<sup>[21]</sup>。

### 1.3 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  $\mu\text{g}/\text{g}$ ,根据抽滤水样体积与滤膜抽滤前后质量将各滤膜样品中元素含量单位换算为  $\mu\text{g}/\text{L}$ ,Cd 元素含量极低,单位为  $\text{ng}/\text{L}$ 。为便于对比,本次调查样品分析方法与正常海况下时调查获得样品的完全一致,并同时进行。

## 2 结果与分析

Q1 与 Q3 站分别位于河道和航道中,难以取得表层沉积物样品,Q5 与 Q6 站位于泉州湾外湾开阔海域,表层沉积物中各重金属元素含量较低,变化较小<sup>[23]</sup>,故只选取了沉积环境相对稳定的位于泉州湾内部的 Q4 站各个时间段的表层沉积物样品进行了元素测试并与平静海况下的对比。悬浮颗粒物样品则全部进行测试。根据泉州湾悬浮颗粒物中重金属含量的分布特征<sup>[23]</sup>,仅选择 Q2、Q4 和 Q6 站悬浮颗粒物样品,与正常海况下的进行对比分析,来阐述台风“凤凰(Fung-wong)”对泉州湾重金属含量和分布的影响。

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<sup>[19]</sup>。为了便于对比,在绘制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 > 0 的值。三站取样时间为 2008 年 8 月 2 日

表 1 2 次调查 Q4 站表层沉积物中重金属含量对比表<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

Table 1 Contract of the concentrations of heavy metals in surface sediment at station Q4 in two surveys/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$

站位	指标	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
Q4-1	最大值	89.5	44.3	43.0	134.0	6.04	0.237	48.5
	最小值	82.6	39.8	37.4	121.0	3.44	0.217	42.2
	平均值	86.1	41.6	39.1	127.8	4.82	0.228	44.2
Q4-2	最大值	65.3	55.3	29.3	114.0	4.30	0.214	42.0
	最小值	56.1	46.1	19.4	91.7	2.58	0.143	37.8
	平均值	60.4	50.3	26.5	101.7	3.36	0.180	40.0

1) Q4-1 为正常海况下调查结果<sup>[21]</sup>; Q4-2 为台风过境后的调查结果

悬浮颗粒物中各元素含量见表 2,从中可以看出:①台风后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,与平静海况下的含量变化情况类似<sup>[21]</sup>;②台风后悬浮颗粒物中同一元素在不同站位之间含量差别均较大,最高含量是最低含量的 6~10 倍。总体看,元素含量在河口附近最大(Q1 站),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,与平静海况下的含量变化情况类似<sup>[21]</sup>;③台风之后各站悬浮颗粒物中各元素含量均比平静海况下的高,最高增加了 12 倍。台风

06:00~19:00,坐标原点为 2 日高平潮时刻 12:18。平静海况下的各站重金属含量及分布的具体情况见文献[21]。

### 2.1 重金属含量分布范围及其对比

Q4 站表层沉积物中重金属含量情况见表 1,从中可以看出:①与平静海况下对比,除 Ni 元素外, Q4 站表层沉积物中其他 6 种元素含量的最大值、最小值及平均值在台风过程之后均有明显降低,降低幅度在 10%~40% 之间。其中 Cd 元素含量降幅最大,从 0.228  $\mu\text{g}/\text{g}$  降到 0.180  $\mu\text{g}/\text{g}$ ;②与平静海况下对比, Ni 元素含量的最大值、最小值和平均值均有明显增加,平均值从 41.6  $\mu\text{g}/\text{g}$  增加至 50.3  $\mu\text{g}/\text{g}$ 。这种变化显示,台风过程中强动力搅动海底沉积物,引起了表层沉积物的再悬浮、再搬运,台风之后表层沉积物中的细粒会先被悬浮带走,引起沉积物的粗化<sup>[10-13]</sup>,沉积物中的重金属元素(主要附着在细粒级组分中)也随之向其他海域扩散。表层沉积物中的 Ni 元素物质来源与其他几种元素有明显差异,泉州湾周边海域的相对湾内的要高<sup>[23]</sup>,台风引起的颗粒物再悬浮和再搬运可能将 Ni 元素相对含量较高而其他元素含量相对较低的颗粒物从泉州湾周边海域搬运到 Q4 站并发生沉积,从而引起了沉积物中 Ni 元素的显著增加(由于缺乏台风过程下的泉州湾流场观测数据,无法明确判断其来源和过程)。

之后 Q4 站悬浮颗粒物中各元素含量的最高值与最小值比平静海况下的虽有不同程度降低,但是各元素含量的平均值均有增加,说明整个水体中各元素含量总体仍有所增加;④总体上, Q1 与 Q2 站悬浮颗粒物中重金属含量要显著高于其他站位的,属于河口类型站位; Q3 与 Q4 站悬浮颗粒物中重金属含量中等,两站之间不同元素差异不等,属于过渡类型站位; Q5 与 Q6 站悬浮颗粒物中重金属含量最低,变化不大,属于外海类型站位。故分别选取 3 种类型站位中的一个,即 Q2、Q4 和 Q6 站为例详细说明台风对悬浮颗粒物中重金属含量的影响。

表 2 台风前后悬浮颗粒物中重金属含量对比表<sup>1)</sup>

Table 2 Contract of the concentrations of heavy metals in suspended particles before and after typhoon

站位	指标	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/ $\text{ng} \cdot \text{L}^{-1}$	Pb/ $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	文献
Q1-1	最大值	3.443	1.535	4.584	13.631	0.276	37.682	10.742	[21]
	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	
Q1-2	最大值	14.587	6.659	16.039	57.548	0.946	194.909	36.399	本研究
	最小值	1.161	0.493	0.832	4.382	0.088	7.014	1.807	
	平均值	5.945	2.392	4.741	18.006	0.322	50.828	10.073	
Q2-1	最大值	1.663	0.875	1.318	4.846	0.137	9.879	3.660	[21]
	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	
Q2-2	最大值	22.702	10.279	15.492	53.789	2.076	122.909	23.058	本研究
	最小值	1.286	0.572	1.018	5.454	0.090	11.212	2.220	
	平均值	7.408	3.394	5.061	19.337	0.595	37.622	9.600	
Q3-1	最大值	1.064	0.432	0.964	3.639	0.082	20.227	4.309	[21]
	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	
Q3-2	最大值	7.798	3.522	4.545	23.465	0.485	26.121	31.141	本研究
	最小值	0.760	0.246	0.536	2.596	0.053	3.942	1.362	
	平均值	2.451	1.101	1.511	6.716	0.158	10.668	4.697	
Q4-1	最大值	7.082	3.237	2.966	12.166	0.343	18.727	6.226	[21]
	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	
Q4-2	最大值	4.051	1.793	1.947	12.638	0.226	13.478	17.181	本研究
	最小值	0.373	0.163	0.321	1.066	0.045	1.652	0.798	
	平均值	1.108	0.476	0.700	3.190	0.087	4.160	3.164	
Q5-1	最大值	1.302	0.610	0.653	5.152	0.105	6.091	5.166	[21]
	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	
Q5-2	最大值	3.929	3.786	2.050	8.332	0.330	12.609	5.188	本研究
	最小值	0.601	0.231	0.281	1.678	0.050	2.174	0.870	
	平均值	1.529	0.740	0.809	3.661	0.121	5.424	2.621	
Q6-1	最大值	1.173	0.459	0.882	2.635	0.081	4.667	3.845	[21]
	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	
Q6-2	最大值	4.046	1.898	1.841	7.642	0.518	13.045	10.003	本研究
	最小值	0.381	0.084	0.261	1.224	0.025	1.609	1.047	
	平均值	1.613	0.693	0.851	3.662	0.131	5.323	3.151	

1) Q-1 为正常海况下调查结果;Q-2 为台风过境后的调查结果

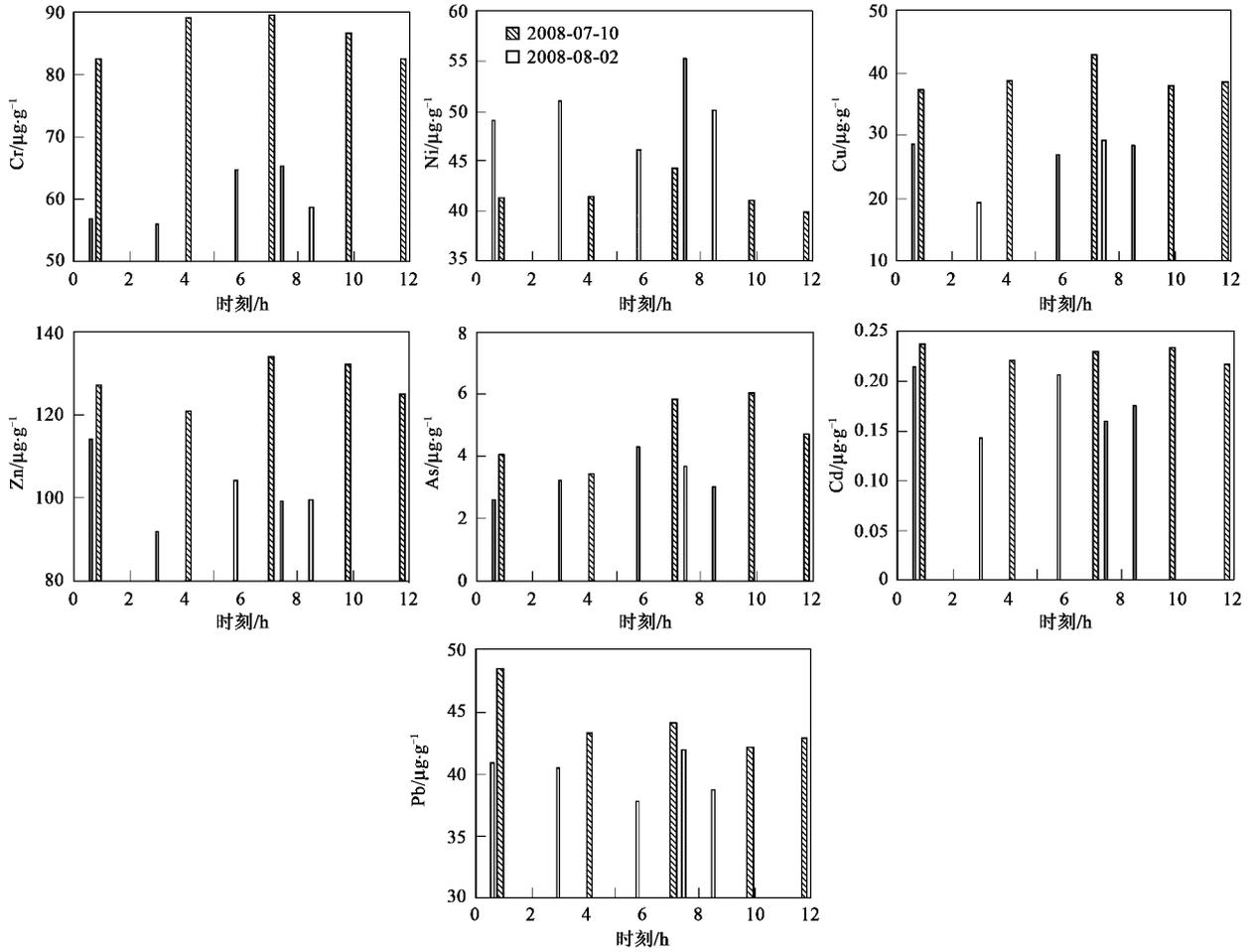
## 2.2 表层沉积物中重金属的分布特征对比

从 Q4 站表层沉积物中重金属的含量、分布特征上(图 2)可以看出:台风过境后在 1 个潮周期内与平静海况下<sup>[21]</sup>的对比,①除 Ni 元素外,Q4 站表层沉积物中其他 6 种元素含量均有明显降低,降低幅度在 10%~40%之间,其中 Cd 元素含量降低幅度最大;②Ni 元素含量有明显增加,增加幅度在 20%左右;③元素含量变化趋势与平静海况下的具有一致的潮汐性,表现为高平潮时较低,随着落潮逐渐增加,在低平潮附近达到最高,但台风之后重金属含量在 1 个潮周期内的变化幅度要比正常海况下要大,在高平潮时相对更低,而在低平潮时相对更高。

台风过程的动力、海洋水文效应主要分为 2 个方面:一方面强动力过程(动力效应包括直接搅动表层沉积物、增加沉积物表层的剪切应力以及风暴潮导致的沉积物表层的周期性荷载振幅增加),引起颗粒物(主要是细粒沉积物)的再悬浮、再搬运和再沉积,导致表层沉积物粗化<sup>[10-13]</sup>,主要赋存于细粒级颗粒物中的重金属随之向上覆海水中扩散,引起重金属的“二次污染”,这种效应导致了台风之后 Q4 站表层沉积物中重金属元素含量明显降低.泉州湾表层沉积物中 Ni 元素主要分布在泉州湾沿岸,在 Q4 站含量较低<sup>[23]</sup>,台风引起的颗粒物再悬浮和再搬运可能将 Ni 元素相对含量较高而其他元素含量

相对较低的颗粒物搬运到了 Q4 站并发生沉积,从而引起了沉积物中 Ni 元素的显著增加(由于缺乏台风过程下的泉州湾流场观测数据,无法明确判断其来源和过程).另一方面伴随台风过程而来的强降雨,增加了入海径流量(包括重金属通量)及其扩散范围,受潮汐影响,入海颗粒物的沉降呈潮汐性特征.这些入海物质沉降到海底,会引起表层沉积物中重金属含量的潮周期尺度的变化.由于台风后入海物

质(包括重金属)通量远远大于平常径流量,所以其改变的表层沉积物中重金属含量的变化幅度要大于平常海况时的,导致表层沉积物重金属含量在 1 个潮周期内的变化幅度显著增加.但是由于表层沉积物中重金属绝对含量要远远高于悬浮颗粒物中的,所以悬浮颗粒物沉降引起的表层沉积物中重金属含量的增加要小于沉积物再悬浮作用引起的重金属含量的降低(Ni 元素较特殊,可能与其物源不同有关).



2008-07-10:平静海况下观测<sup>[21]</sup>;2008-08-02:台风后观测,下同

图 2 Q4 站表层沉积物中重金属分布

Fig.2 Distribution patterns of heavy metals in the surface sediments at station Q4

### 2.3 悬浮颗粒物中重金属的分布特征对比

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,残存江段一般为海水<sup>[19]</sup>,在低平潮时晋江径流可以扩散至 Q2 站附近.正常海况下, Q2 站悬浮颗粒物中重金属含量、分布特征及其成因见文献<sup>[21]</sup>,总体上存在潮汐性特征,在低平潮时附近最高,高平潮时最低,高值区主要出现在水体中下层(图 3).在台风过境后,整个水体悬浮颗粒物中

重金属含量比正常海况下有明显增加,高含量区集中在高平潮前后的水体中下部,在低平潮时的水体上部相对含量最低但仍是平静海况下含量的 3 ~ 5 倍(图 3).

台风之后悬浮颗粒物中重金属含量的急剧增加,尤其是在海水控制的高平潮时显著增加,显然是海底表层沉积物在台风过程中强动力作用下再悬浮的结果.此时,平常海况下悬浮颗粒物中重金

属含量最高的入海径流含量已显著小于再悬浮的表层沉积物中的. 故台风之后水体悬浮颗粒物中

重金属含量在高平潮时最高, 并且最高值区出现在水体中下层.

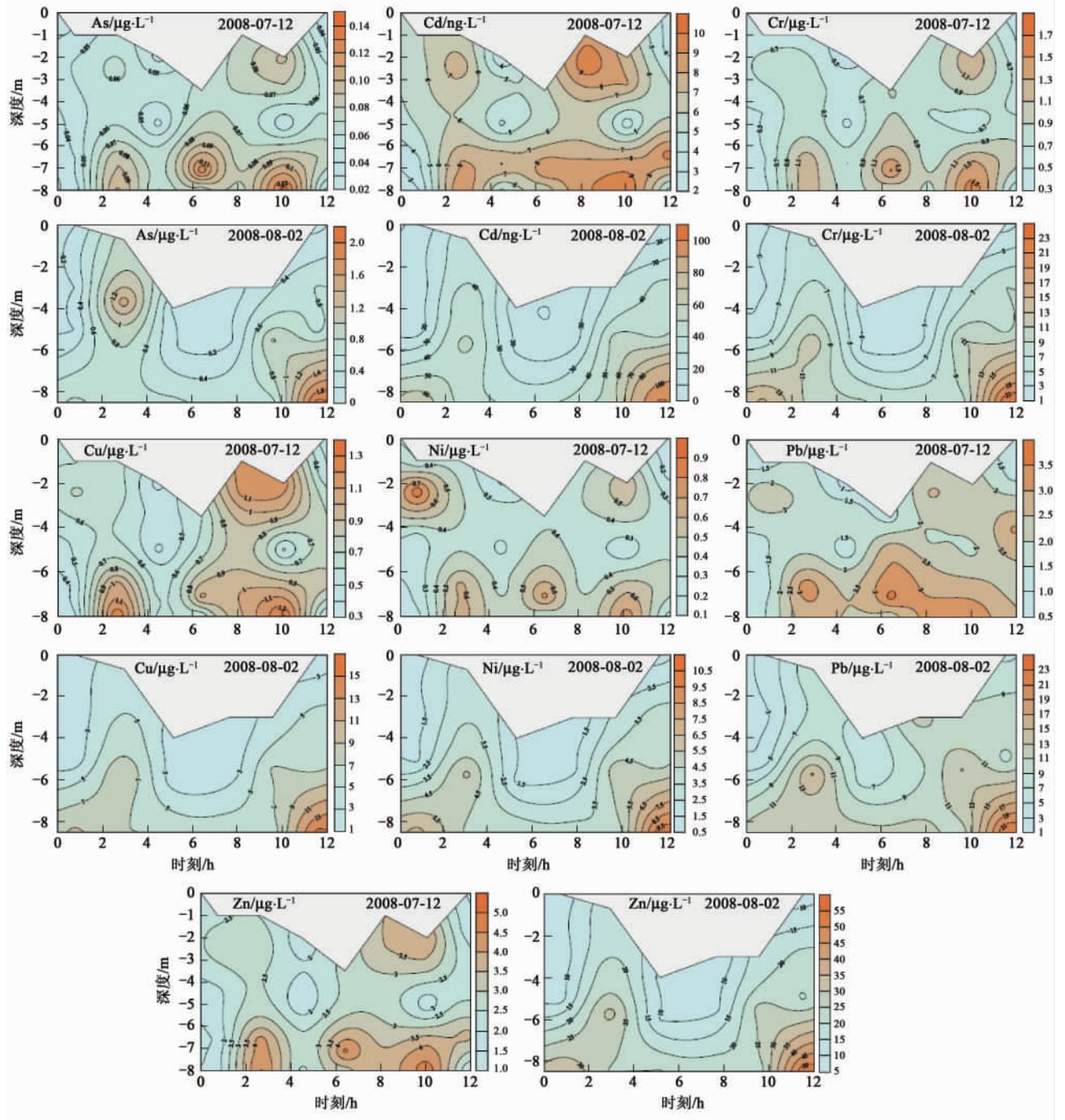


图3 Q2 站台风前后悬浮颗粒物中重金属的分布

Fig. 3 Distribution of heavy metals in the suspended particles before and after typhoon at Station Q2

Q4 站位于泉州湾外湾南侧小湾内, 沉积环境较稳定. 正常海况下, Q4 站悬浮颗粒物中重金属含量、分布特征及其成因见文献[21], 总体上除 Pb 外, 各元素含量变化不大, 仅在涨潮期间存在由水体底部向上扩散的相对高值区(图4). 在台风过境后, 虽然

部分元素最高值相对平静海况下的要小, 但整个水体悬浮颗粒物中重金属含量比正常海况下仍有明显增加, 在含量相对较低的大部分水体中增加约 1.5 ~ 3 倍, 台风后高含量区与平静海况下的出现时刻、层位基本一致(图3). 另外, 台风后, 悬浮颗粒物中

Pb 元素含量变化与其他元素的类似,在高平潮时不存在平静海况下出现的高值区.这也说明在平静海况高平潮时出现的 Pb 元素含量增加现象是局地污染导致的,不存在普遍性.

台风过境之后,悬浮颗粒物中重金属分布特征与正常海况下的类似,但重金属总体含量显著增加,重金属含量相对较高的水体范围比正常海况下明显扩大,尤其是在水体中下部(图 4).这种变化应该是

台风过程中强水动力作用下表层沉积物再悬浮与伴随的强降雨导致的入海物质和扩散范围增加的综合结果. Q4 站附近表层沉积物中重金属含量相对较低,远远低于晋江河口 Q2 站的<sup>[23]</sup>,故在该站表层沉积物再悬浮对水体悬浮颗粒物中重金属含量增加的程度要远小于在 Q2 站的.水体上层悬浮颗粒物中重金属含量的增加可能主要归功于伴随台风强降雨水增加入海径流及其在湾内更大范围的扩散.

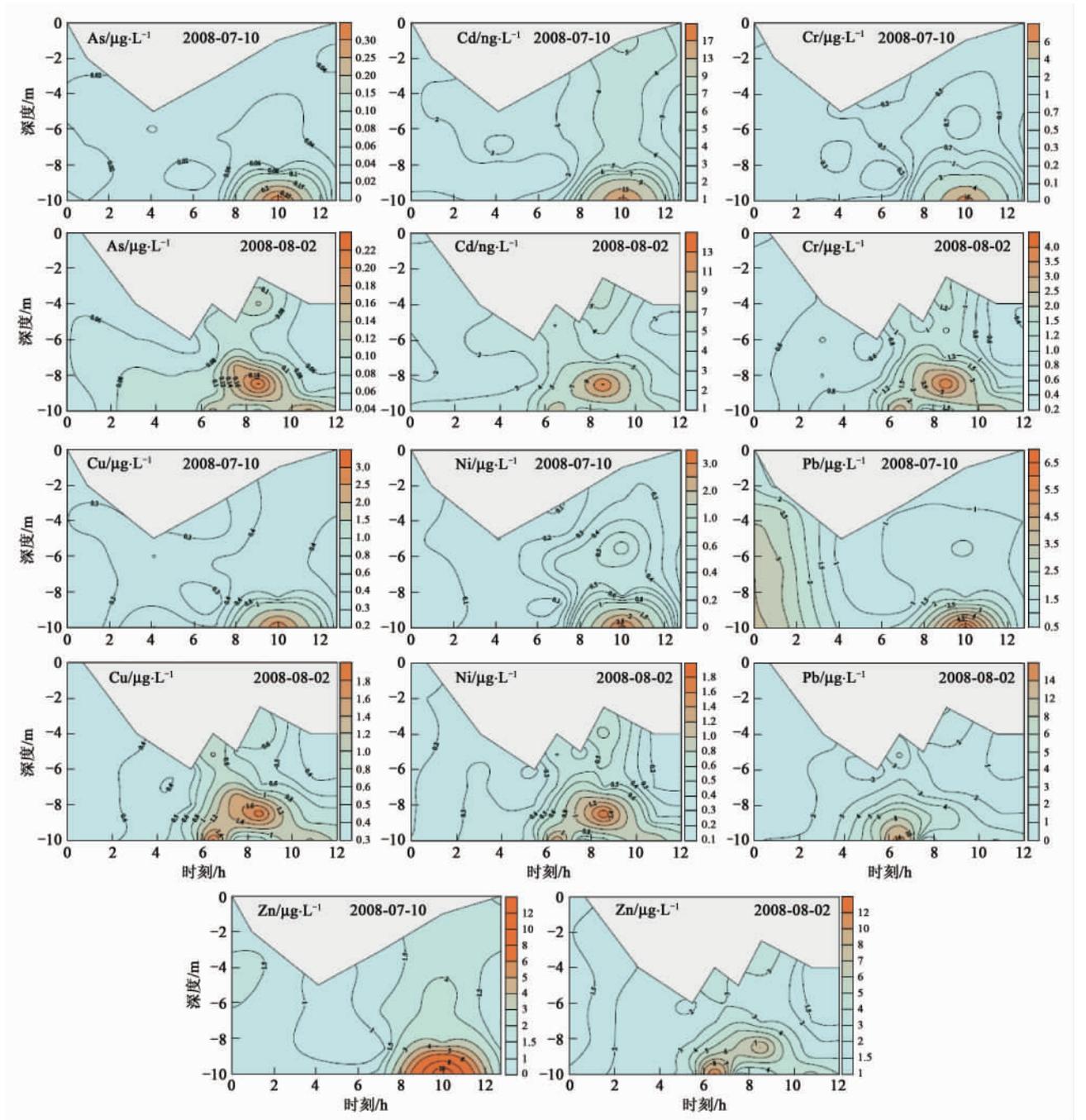


图 4 Q4 站台风前后悬浮颗粒物中重金属的分布

Fig. 4 Distribution of heavy metals in the suspended particles before and after typhoon at Station Q4

Q6 站位于泉州湾外湾南侧与外海连通处,无径流直接影响.正常海况下,水体悬浮颗粒物中重金属含量较小,变化范围相对其他站位要小.悬浮颗粒物中重金属的分布相对较复杂,可以看到相对较弱的潮汐性,一般在低平潮附近水体含量相对较高(图5).Pb(可能是局地影响)与Cd元素除低平潮时较高外,在高平潮时含量也很高.台风过境之后,悬浮颗粒物中重金属分布特征与正常海况下的差别较大,重金属总体含量显著增加,含量相对较高的水体

范围明显扩大,高含量中心出现在低平潮时刻左右,另外在高平潮的水体上层也有一个高含量中心出现,但是范围较小(图5).这种变化应该是台风过程中强水动力作用下表层沉积物再悬浮与伴随的强降雨导致的入海物质和扩散范围增加的综合结果.Q6站附近表层沉积物中重金属含量相对较低,远远低于泉州内湾的<sup>[23]</sup>,故在该站表层沉积物再悬浮对水体悬浮颗粒物中重金属含量增加的程度较局限.伴随台风强降水增加的入海径流及其在湾内更大范围

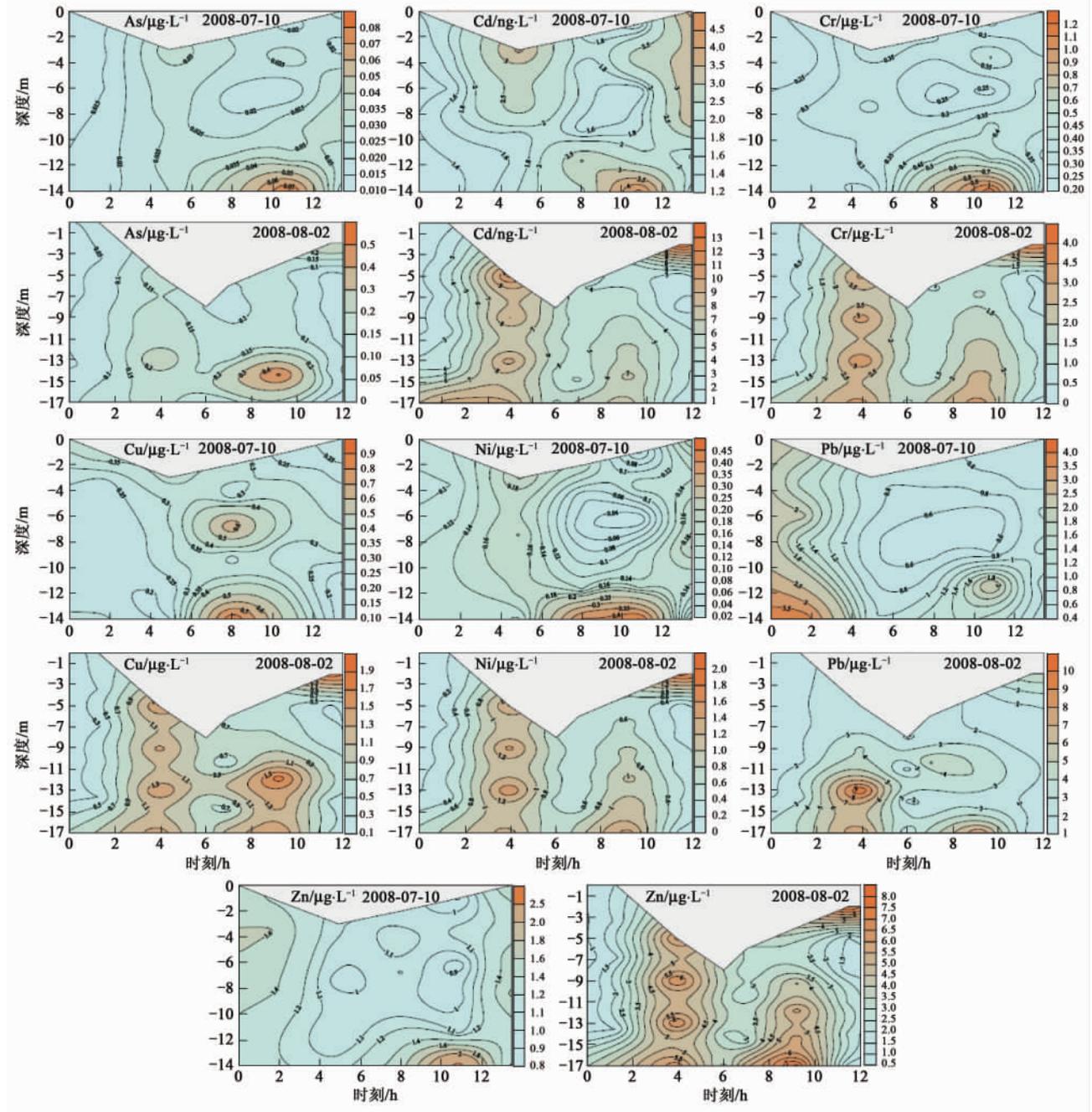


图5 Q6站台风前后悬浮颗粒物中重金属的分布

Fig.5 Distribution of heavy metals in the suspended particles before and after typhoon at Station Q6

的扩散对该站重金属含量、分布的影响相对较大。

### 3 结论

(1) 台风“凤凰(Fung-wong)”过境后,泉州湾Q4站表层沉积物中除Ni元素显著增加外,其他元素含量明显降低;各站悬浮颗粒物中重金属含量增加,分布特征与平静海况下的有显著差异。

(2) 台风期间的强动力过程导致的重金属“二次污染”,以及伴随的强降雨增加了入海物质量是影响泉州湾重金属含量和分布的直接原因。

(3) 台风过程对泉州湾重金属污染的影响显著,在制定科学的重金属污染治理方案中应加以综合考虑。

致谢: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 and Coastal Management*, 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]. *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] Saulnier I, Mucci A. Trace metal remobilization following the resuspension of estuarine sediments: Saguenay Fjord, Canada [J]. *Applied Geochemistry*, 2000, **15**: 203-222.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] David A P, Gregory W S. Hydrodynamic and sedimentary responses to two contrasting winter storms on the inner shelf of the northern Gulf of Mexico [J]. *Marine Geology*, 2004, **210**:43-62.
- [11] Chang G C, Dickey T D, Williams A J. Sediment resuspension over a continental shelf during hurricanes Edouard and Hortense [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, **106**: 9517-9531.
- [12] Goñi M A, Gordon E S, Monacci N M, *et al.* The effect of Hurricane Lili on the distribution of organic matter in the inner Louisiana shelf (Gulf of Mexico, USA) [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, **26**:2260-2280.
- [13] Kang W J, Trefry J H. Retrospective analysis of the impacts of major hurricanes on sediment in the lower Everglades and Florida Bay [J]. *Environmental Geology*, 2003, **44**:771-780.
- [14] Smith B P G, Naden P S, Leeks G J L, *et al.* The influence of storm events on fine sediment transport, erosion and deposition within a reach of the River Swale, Yorkshire, UK [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, **314-316**:451-474.
- [15] Gnecco I, Berretta C, Lanza L G, *et al.* Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy [J]. *Atmospheric Research*, 2005, **77**(1-4):60-73.
- [16] Kohler E A, Poole V L, Reicher Z J, *et al.* Nutrient, metal, and pesticide removal during storm and nonstorm events by a constructed wetland on an urban golf course [J]. *Ecological Engineering*, 2004, **23**(4-5):285-298.
- [17] Ashley N A, Valsaraj K T, Thibodeaux L J. Elevated in-home sediment contaminant concentrations—The consequence of a particle settling-winnowing process from Hurricane Katrina floodwaters [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(5):833-840.
- [18] Silverberg N, Shumilin E, Aguirre-Bahena F, *et al.* The impact of hurricanes on sedimenting particulate matter in the semi-arid Bahía de La Paz, Gulf of California [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, **28**(8):1089-1090.
- [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] 苏纪兰,袁业立. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社, 2005. 78-83.
- [21] 黄财宾,李云海,陈坚,等. 泉州湾悬浮颗粒物中重金属的分布特征及其影响因素[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1167-1175.
- [22] 中国天气网. 今年登陆我国的最强台风“凤凰”五大特征 [EB/OL]. <http://www.weather.com.cn/static/html/article/20080801/10573.shtml>, 2008-08-01.
- [23] 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.