

文章编号: 1000-5641(2019)02-0195-14

## 台风对长江口表层悬沙浓度的影响

王浩斌, 杨世伦, 杨海飞

(华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241)

**摘要:** 悬沙浓度是衡量水质的重要指标, 其变化对底床冲淤、生物初级生产力及土地资源保护有重要影响. 以长江河口海岸区域为例, 利用六个典型测站的表层悬沙浓度数据(包括徐六泾、青龙港、高桥、横沙、佘山和芦潮港), 以及长时间尺度的连续风速风向、波高、波周期等资料, 分析 2010—2014 年间台风事件对长江口表层悬沙浓度的影响特征. 结果表明, 在六次台风袭扰下, 平均有效波高是台风前 2.2 倍, 平均风速是台风前 1.7 倍. 平均表层悬沙浓度短期可达到  $0.69 \text{ kg/m}^3$ , 是台风前( $0.32 \text{ kg/m}^3$ )的 2 倍, 个别台风(圆规)影响后悬沙浓度可增大 4 倍. 另外, 台风对于长江口不同河段的影响程度不同. 河口下段的佘山站与芦潮港站短时间内受到台风影响最为显著, 悬沙浓度分别增加 167.1 %、143.7 %; 而河口中段敏感性不高, 受风速影响相对较小. 据长时间尺度数据统计, 悬沙浓度在风级 1—4 级内增长幅度较为平缓, 5级以上风级越大相应的悬沙浓度变化幅度越明显. 高能量的台风引起的风速和波高变化是促使表层悬沙浓度急剧变化的主要因素, 在台风期间因台风影响导致的悬沙浓度变化远大于因潮汐和径流量作用的悬沙浓度变化. 该研究有利于台风天气下的海岸带防护, 并对多学科交叉研究有重要的意义.

**关键词:** 悬沙浓度; 台风; 空间差异; 长江口

**中图分类号:** P343.5    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.2019.02.021

## A study of the surficial suspended sediment concentration in response to typhoons in the Yangtze Estuary

WANG Hao-bin, YANG Shi-lun, YANG Hai-fei

(State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China)

**Abstract:** Suspended sediment concentration (SSC) is an important index to measure water quality, and its variations have major influences on seabed erosion/accretion, biological primary productivity, and restoration/loss of land resources. To study the influence of typhoons on the SSC in the Yangtze Estuary, we used surficial SSC data collected at six gauging stations-namely Xuliujing, Qinglonggang, Gaoqiao, Hengsha, Sheshan, and

收稿日期: 2018-01-17

基金项目: 国家自然科学基金(41576092); 科技部重点专项(2016YFA0600901, 2016YFE0133700); 国家自然科学基金委-山东省联合基金(U1606401)

第一作者: 王浩斌, 男, 硕士研究生, 研究方向为河口海岸泥沙运动. E-mail: wanghbsh@foxmail.com.

通信作者: 杨世伦, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为河口海岸沉积动力学和地貌学.

E-mail: slyang@sklec.ecnu.edu.cn.

Luchaogang-over the period from 2010 to 2014, as well as continuous data on wind speeds and wave heights over long time scales. The results indicated that wave heights and wind speeds during typhoons were on average 2.2 times and 1.7 times higher, respectively, than those before a typhoon occurred. The mean surficial SSC at the gauging stations also doubled, increasing from  $0.32 \text{ kg/m}^3$  before typhoons to  $0.69 \text{ kg/m}^3$  during typhoons. The SSC measured during typhoons was found to be 4 times larger than values observed during calm weather. The typhoons' influences on SSC, moreover, varied across different sections of the Yangtze Estuary. Influences measured at the Sheshan and Luchaogang stations in the outer estuary were the most significant, and the SSC at the two stations increased by 167.1% and 143.7%, respectively. However, the sensitivity of SSC to the typhoons was relatively minor in the inner estuary, where winds' influences were accordingly minimal. Based on long time scale data, the increase of SSC was moderate for wind scales 1-4, and the increase of SSC became evident above a wind scale of 5. Changes in wind speeds and wave heights, resulting from typhoons, were the most dominant factors attributing to the variation in surficial SSC. During typhoon season, the change of surficial SSC caused by typhoons is much greater than the change of surficial SSC due to tidal and runoff effects. This study is beneficial to the protection of coastal engineering during typhoons and has important implications for the study of interdisciplinary fields.

**Keywords:** suspended sediment concentration; typhoon; spatial differences; Yangtze Estuary

## 0 引 言

河口地貌形态及演变是由水动力作为主动力塑造的,而泥沙运动是动力作用、物质输运与地貌演变之间的纽带<sup>[1]</sup>.在复杂的河口陆海动力相互作用下,悬沙浓度的分布变化是泥沙运动的重要体现.而悬沙颗粒较细,实际的比表面积大<sup>[2]</sup>,可吸附各种营养盐和有害污染物<sup>[3]</sup>,影响浮游植物的光合作用<sup>[4]</sup>.换言之,水体表层悬沙浓度的大小对光合作用有直接影响,故表层悬沙浓度变化具有重要的生态意义,是研究河口海岸生态环境的重要课题之一.由于径流、潮流、风浪和地形等影响,悬沙以悬浮或沉降形式存在于河口三角洲港口、航道的各个区位,悬沙浓度的分布存在明显的时空差异,这些变化直接影响港口航道疏浚及近岸工程建设<sup>[5-6]</sup>.

风暴是海岸带最频繁的自然灾害之一,被认为是影响泥沙运动,塑造海底海岸地貌的动力因素.在西北太平洋国家中,中国是遭受风暴袭扰最频繁和最严重的国家之一,整个中国沿海几乎都受到影响<sup>[7-8]</sup>.由于近年来沿海地区经济建设的迅猛发展,风暴潮造成的物质经济损失尤为严重,在热带气旋频次增加和海平面上升背景下,这类损失有进一步增长的趋势<sup>[9-10]</sup>.此外,由于风暴过程中的强风和气压骤变等引起的强烈大气扰动,海平面易生成强有力的风浪,导致海平面水位异常升高,水体垂向扰动剧烈.若遇上天文大潮水位与风暴潮增水相互叠加,海水内侵陆地,酿成大灾,后果更为严重<sup>[9]</sup>.本文的风暴出现在西太平洋地区,称为台风.台风期间可能带来大量的降雨,特别是降雨总量呈增加的我国东南沿海地区,短时间的径流量将出现大量增加,随河流带入的泥沙直接造成悬沙浓度的分布不均<sup>[11]</sup>.

随着三峡工程、长江深水航道工程等大型水利工程的建设和运营,河口来水来沙及泥沙运动规律出现了一些改变.近年来国内外学者针对长江口正常天气下悬沙浓度的周期变化

已做了大量的深入研究.何超<sup>[12]</sup>基于2003年和2005年长江口及其邻近海域洪季水沙资料,指出外海滨洪季的悬沙浓度仍是西高东低、南高北低的悬沙分布态势,对比1982年长江口实测的悬沙分布特征,发现悬沙浓度相比1982年明显降低.刘志国<sup>[13]</sup>借助TM和AVHRR影像对长江口表层悬沙浓度进行反演,根据不同时段遥感数据结果,指出了长江口悬沙的分布受季节、潮流和径流量的影响. Shen等<sup>[14]</sup>利用MERIS卫片数据和适用更广的半经验传输模型,反演了无云雾遮挡天气下的长江口及杭州湾悬沙浓度. Li等<sup>[15]</sup>通过测量长江口邻近海域10个站点每日悬沙浓度,认为徐六泾悬沙浓度降低幅度与大通站来沙量减少程度(55%)基本一致,且长江口的悬沙浓度存在持续走低的趋势.以往研究多基于正常天气下的观测资料,对于极端天气(台风)表层悬沙浓度短期变化的研究较少<sup>[16-19]</sup>.鉴于台风期间水沙观测困难,许多现场研究主要是针对单次台风观测,多次台风事件的第一手资料难以获得.本文以长江口为例,通过分析近几年固定水文测站数据,研究表层悬沙浓度在多次台风天气下的变化规律.

## 1 研究区概况

研究区位于北纬29~32°,东经120~123°内(见图1b),基本覆盖长江河口,所处的东海是台风常年频繁登陆的主要区域之一<sup>[10,20]</sup>.长江河口是典型的中强潮分汊河口,自徐六泾以下被崇明岛、长兴岛、横沙岛及九段沙分为“三级分汊,四口入海”.潮汐在口内为不规则半日潮,多年平均潮差为2.7 m,口外为正规半日潮.2003年来多年平均入海径流量为 $8.4 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,年平均入海沙量为 $1.4 \times 10^8 \text{ t}$ <sup>[21]</sup>.口外开敞的潮流明显表现为旋转流,口内受分叉地形制约以往复流为主,区域总体潮流的涨落方向为西北-东南方向<sup>[22]</sup>.悬沙通量在洪季较大,而枯季较小.波浪主要是风浪,处在季风性气候中方向随季节变化显著,夏季以偏东南向为主,冬季以偏北向为主,春秋两季风向不稳定,所形成波向没有明显规律<sup>[1]</sup>.长江口波高一般以夏冬季节为高,春秋两季相对较低,口内多年平均波高为0.9 m,口外平均波高为1.2 m<sup>[23]</sup>.台风过境,风大浪高,口外最大波高可达6.2 m,高桥也出现过3.2 m的波高<sup>[24]</sup>.

## 2 采样方法及资料来源

表层悬沙浓度数据的6个采样点分布在长江入海口区域(见图1b),徐六泾、青龙港位于河口中段上游,高桥、横沙位于河口中段下游,佘山、芦潮港位于河口下段<sup>[25]</sup>,采样位置水深在5~10 m不等.每日两次8:00及14:00或每日高潮位和低潮位取表层水样(0~0.2 m表层水深)600 mL.采样过程严格按照海洋监测规范(GB17378.4)和海洋调查规范(GB13909)取样要求<sup>[26]</sup>,自2010年1月至2014年12月(包括极端台风天气下的采样),共计21 858水样瓶.将采集的600 mL水样用滤纸过滤,过滤前先称滤纸质量,被保留下来的悬沙和滤纸置于烘箱烘干(45°温度下烘满48 h)并再次称重,两次称重之差即可计算出悬沙浓度.

长江口风速、波高数据来自欧洲中长期天气预报中心(<http://www.ecmwf.int/>).数据包括2010—2014年间每日间隔3 h的风速风向(海平面以上10 m)、有效波高及平均波周期等,选择精度间距 $0.125 \times 0.125$ 经纬度网格资料.径流量数据来自长江水文网.佘山站潮汐数据来自上海海事局.

台风数据为每1 h记录一次,台风的最大风速、台风中心气压值、路径位置资料、风圈半径、风速级别等数据来自Unisys公司(<http://weather.unisys.com/hurricane/>)和浙江省水利厅水利信息管理中心(<http://typhoon.zjwater.gov.cn/default.aspx>).其中台风滞留时间指的是台风中心风场从进入某一特定位置的 $t_1$ 时刻到离开该位置的 $t_2$ 时刻所经历的时间,取

决于风圈半径大小及台风在区域内中心风场的移动速度,而不是对整个长江口或东海产生影响的时间. 计算公式为

$$T_{\text{滞留}} = t_2 - t_1 = D/U. \quad (1)$$

其中,  $T_{\text{滞留}}$  为台风滞留该区域的时间,  $D$  为台风 10 级风圈直径,  $U$  为台风在研究区域内的移动速度<sup>[27]</sup>.

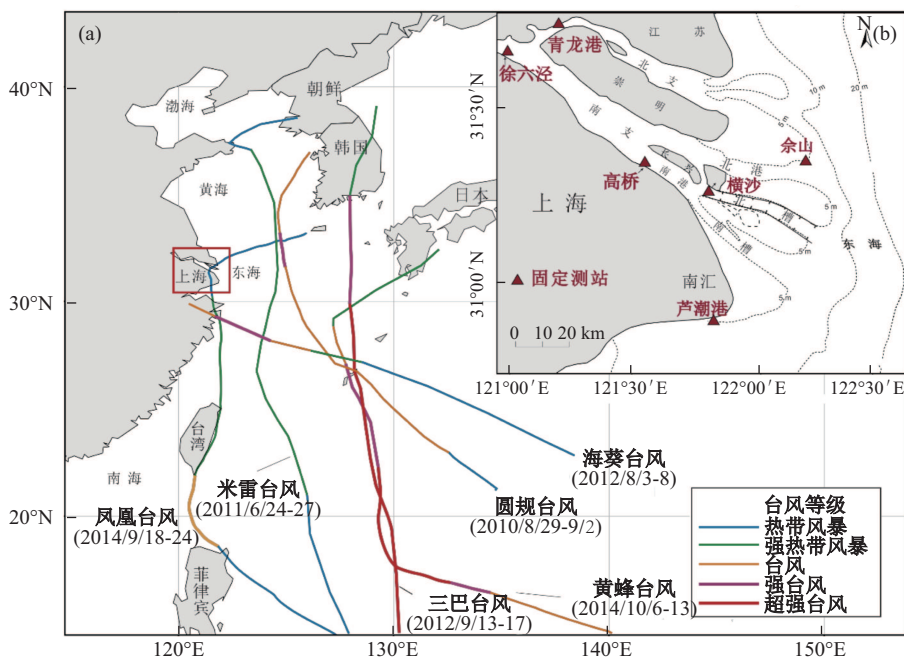


图1 研究区域

Fig. 1 Study area

### 3 结 果

#### 3.1 台风特征

表 1 列举了 2010—2014 年影响长江口的 6 次典型台风特征, 包括台风登陆长江口的时间、10 级风圈半径、滞留时间等. 根据国家标准《热带气旋等级》的台风等级标准<sup>[28]</sup>, 除 2014 年“凤凰”台风在经过长江口区域的等级(1 级热带风暴)较低外, 其余台风皆达到台风级别以上. 其中, 2012 年“三巴”台风在靠近区域的最大中心风速达到超强台风级别, 对我国东海海域的破坏程度巨大. 从表 1 中台风性质可知, 中心风场越大的台风, 其所影响的风场范围一般越大. 而滞留时间还取决于移动速度. 如最大风速为 23 m/s 的“凤凰”台风, 10 级风圈为 50 km, 相比最大风速为 48 m/s 的“海葵”台风(风圈可达 200 km), 在两者移动速度相近时台风“海葵”所滞留的时间更长. 台风“米雷”的风圈半径小(60 km), 移动速度快, 在长江口附近停留仅 3 h. “黄蜂”台风则相反, 由于移动速度缓慢, 风圈 150 km, 其滞留时间为 6 个台风中最久(14 h). 从各台风路径观察(见图 1A), 2014 年“凤凰”台风从杭州湾北岸的上海南部登陆, 直接北上穿越上海市影响长江口, 风速相对不大, 但破坏力很强. 其余台风距离余山最短在 200~500 km, 影响东海水动力环境, 进而影响长江口水沙运动, 对我国内陆城市影响不大.

表 1 各台风物理特征

Tab. 1 Summary of the physical characteristics of the typhoons studied							
台风名称	登陆长江口附近时间	最大风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	10级风圈半径/km	移动速度/( $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ )	滞留时间/h	台风级别	离余山距离/km
圆规	2010/9/1	40	100	30	7	3	250
米雷	2011/6/26	28	60	35	3	2	200
海葵	2012/8/8	48	200	15	13	4	250
三巴	2012/9/16	52	120	35	7	5	500
凤凰	2014/9/23	23	50	15	7	1	30
黄蜂	2014/10/12	33	150	22	14	3	500

3.2 台风期间风和波浪变化特征

6 次台风影响期间, 风向变化骤然, 与台风前差异鲜明. 以余山站为例(见图 2), 台风“圆规”、“米雷”、“海葵”及“凤凰”在登陆后风速剧增, 风向皆转  $90^{\circ}$  以上, 甚至出现从北风转  $180^{\circ}$  变为南风的现象. 台风“三巴”和“黄蜂”期间风向都为偏南风, 而风速从月均风速的  $6\sim 8\text{ m/s}$  增大到最大风速的  $15.3\text{ m/s}$ . 台风东西风向所占频率很小, 以南北向的风向突变为主, 且台风影响减弱后风向逐渐恢复.

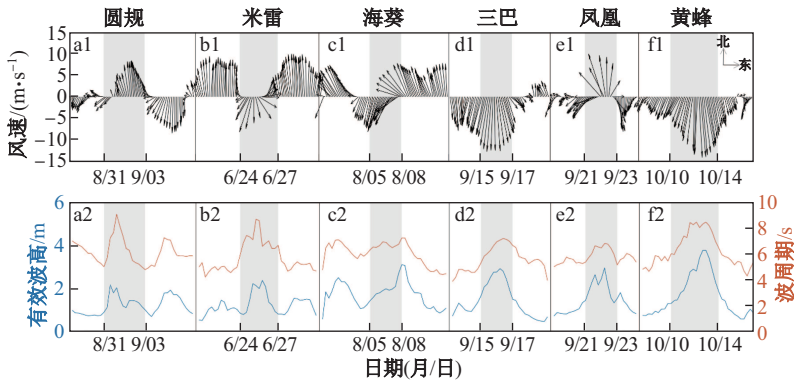


图2 台风过境时余山站点的风速风向、有效波高及波周期的变化

Fig. 2 Variations in wind speed and direction, effective wave height, and mean wave period during typhoons

台风浪能量大, 余山测点的有效波高从台风前平均的  $0.8\sim 0.9\text{ m}$ (见图 2), 分别增大到台风期间的  $1.44\text{ m}$ (圆规)、 $1.47\text{ m}$ (米雷)、 $2.02\text{ m}$ (海葵)、 $2.32\text{ m}$ (三巴)、 $2.01\text{ m}$ (凤凰)、 $2.49\text{ m}$ (黄蜂). 其中台风“黄蜂”影响波高变化最大, 是台风前的 3 倍. 当有效波高递增到峰值, 平均波周期亦随风速趋于最大值. 例如, 台风“圆规”导致最大波周期从台风前的  $4.7\text{ s}$  增大至  $9.1\text{ s}$ , 最大波周期较余山多年平均波周期的  $5.2\text{ s}$  同样增大了近一倍. 有效波高增幅最大的台风“黄蜂”, 波周期增幅并不一定最大, 仅从台风前的  $5.4\text{ s}$  增大到台风中的  $7.4\text{ s}$ . 中心风速最大( $52\text{ m/s}$ )的“三巴”台风有效波高变化最大, 而平均波周期增幅一般. 6 次台风期间, 余山的平均波周期分别增大了  $5.9\%$ (圆规)、 $45.1\%$ (米雷)、 $13.9\%$ (海葵)、 $43.3\%$ (三巴)、 $19.9\%$ (凤凰)、 $38.5\%$ (黄蜂). 此外台风过境的前中后阶段, 有效波高及波周期皆呈单峰形态, 先表现为增高, 后随台风减弱逐渐降低.

图 3 为余山和芦潮港测站在 6 次台风期间有效波高和风速的回归关系, 反映了波高随风速增大而增大的良好线性相关. 芦潮港的相关系数  $R$  高达 0.92 ( $p < 0.01$ ), 显著性好于余山站的相关系数 ( $R = 0.86$ ,  $p < 0.01$ ), 从两站点的相关性表明观测点的波浪主要受该地区的风速控制, 换言之, 台风期间的波高变化情况可以从风速变化间接反映. 图 3 还表明两测站的波高成倍增大, 且余山站波高增幅比芦潮港更明显. 如风速在 6 m/s, 余山站平均波高为 0.9 m, 芦潮港平均波高为 0.8 m; 当风速增大到 12 m/s, 余山站平均波高为 2.6 m, 芦潮港平均波高为 1.9 m.

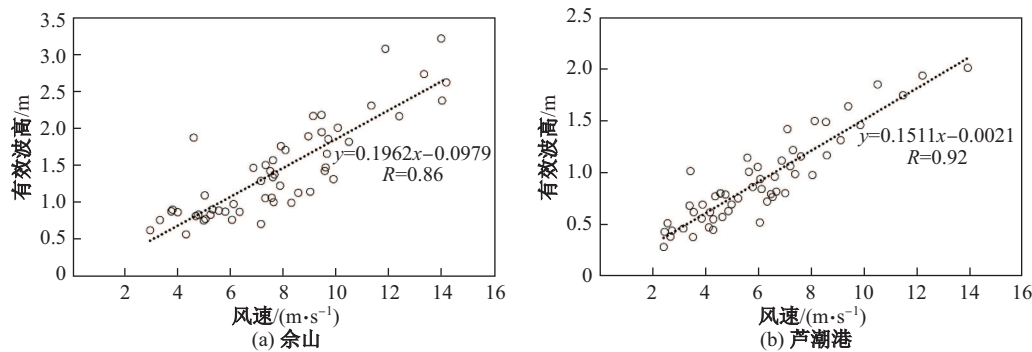


图 3 台风期间风速和有效波高相关性

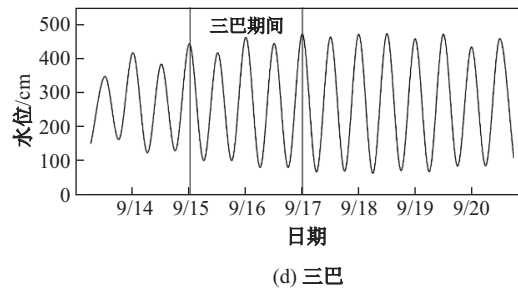
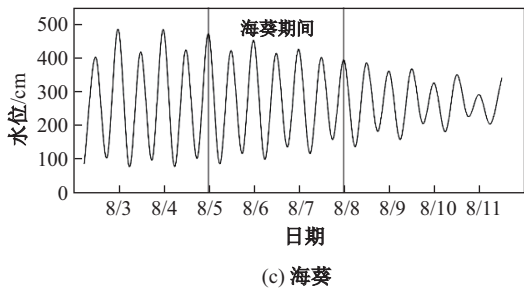
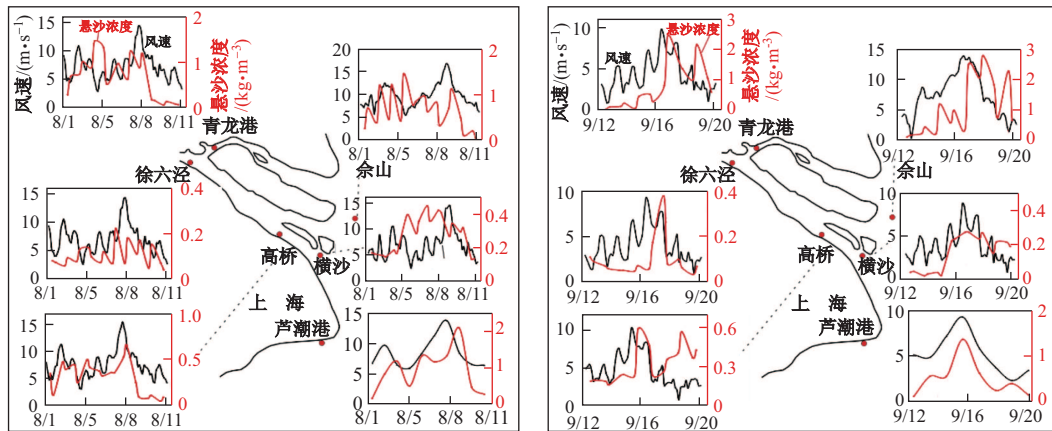
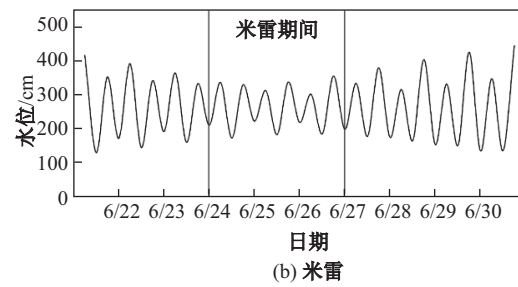
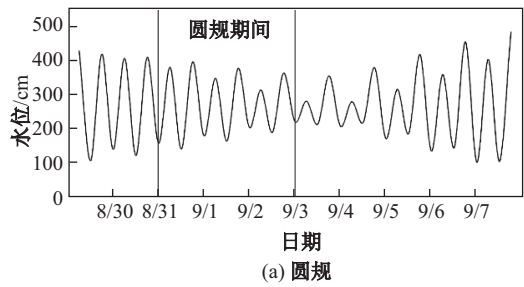
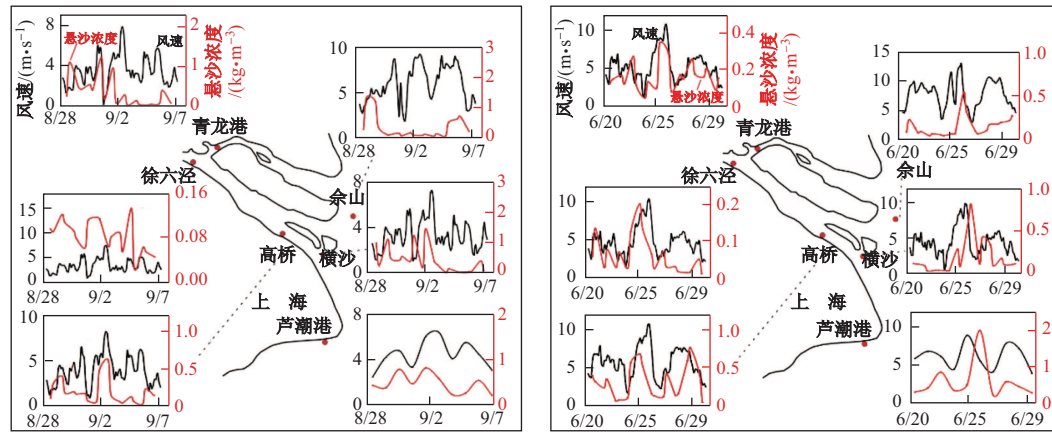
Fig. 3 Correlations between wind speed and the effective wave height during typhoons

### 3.3 台风期间表层悬沙浓度变化特征

台风影响周期通常为 4~8 d<sup>[29]</sup>. 图 4 为 6 次典型台风事件对长江口 6 个典型站点表层悬沙浓度的影响. 由表 1 台风性质, 将 6 次典型台风按不同程度的台风等级(风速决定)、滞留时间(风圈半径和移动速度决定)、台风路径(离余山距离)进行分类. 其中, 台风“圆规”、“米雷”、“海葵”、“凤凰”路径相距余山最短皆在 250 km 以内(见表 1). 以登陆距离最近的“凤凰”台风为例(见图 4e), 悬沙浓度在 22—23 日普遍变化明显. 相对开敞的余山最大风速达 12.8 m/s, 悬沙浓度最大值从台风前 0.38 kg/m<sup>3</sup>增大至 1.80 kg/m<sup>3</sup>, 台风期间的悬沙浓度维持在 1 kg/m<sup>3</sup>以上, 平均增大了 2.3 倍. 芦潮港的悬沙浓度受影响程度更明显, 当风速快速增大至 10.7 m/s 过程中, 悬沙浓度从 0.30 kg/m<sup>3</sup>变化到 0.78 kg/m<sup>3</sup>, 是正常天气下的近 3 倍. 河口中段上游潮流作用小, 主要受上游来水来沙影响, 潮汐作用下的日均悬沙浓度相对变化小. 但在“凤凰”影响后, 徐六泾悬沙浓度从台风前 0.08 kg/m<sup>3</sup>, 增大 26.4% 到 0.10 kg/m<sup>3</sup>, 最大变化量可达 0.12 kg/m<sup>3</sup>. 北支的青龙港站从平均 0.17 kg/m<sup>3</sup>, 增大到平均 0.45 kg/m<sup>3</sup>, 最大变化量可达 0.59 kg/m<sup>3</sup>. 河口中段下游的高桥和横沙, 分别从 0.12 kg/m<sup>3</sup>和 0.05 kg/m<sup>3</sup>变化到 0.18 kg/m<sup>3</sup>和 0.06 kg/m<sup>3</sup>, 变化率分别达到 45.63 % 和 10.02 %. 尽管“凤凰”为 4 个相近台风中风速最小(台风等级 1 级), 且滞留时间小于 7 h, 但风浪直接作用长江口, 导致悬沙浓度平均增幅达 104.8 %.

4 个距离研究区域较近的台风中风力最大的为 4 级台风“海葵”(见图 4c), 6 个站点的风速最大值均超过 15 m/s, 在长江口的滞留时间较其他更长. 然而台风前 3 日正处于大潮. 期间余山站的悬沙浓度变化仅为 17.5%, 河口中段下游的高桥和横沙分别增幅 30.5% 和 41.8%, 平均总增幅为六次台风中最低的 54.1 %. 最大风速仅次于台风“海葵”的“圆规”(见图 4a)处于小潮期间, 期间余山站的悬沙浓度达 1.12 kg/m<sup>3</sup>, 对比台风前(0.22 kg/m<sup>3</sup>)反而增大了 401.2%, 平均总增幅 122.9 %. 此外, 距离仅次于“凤凰”的台风“米雷”, 滞留时间短而最大风速高于“凤凰”, 受其影响的悬沙浓度平均总增幅高于“凤凰”, 达 119.4 %.





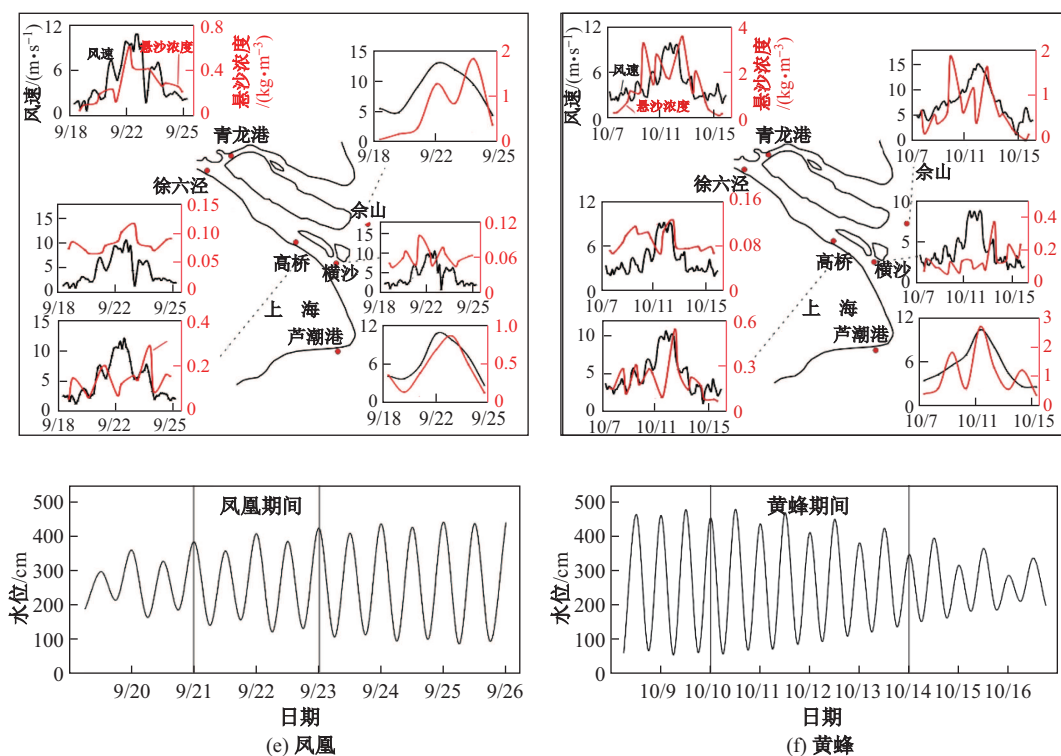


图4 台风影响期间各站点表层悬沙浓度和潮位变化

Fig. 4 Variations of surficial suspended sediment concentrations and tidal range at gauging stations during typhoons

台风“三巴”(见图 4d)和“黄蜂”(见图 4f)的中心路径并无直接登陆长江口, 距离余山最近皆约 500 km(见图 1A), 而东海风浪带来的巨大能量经涌浪间接传递近海. 两次台风期间芦潮港悬沙浓度最大值分别从  $0.58 \text{ kg/m}^3$  增大到  $1.39 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.82 \text{ kg/m}^3$  增大到  $2.70 \text{ kg/m}^3$ ; 中段上游的徐六泾悬沙浓度分别从  $0.07 \text{ kg/m}^3$  变化到  $0.15 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.09 \text{ kg/m}^3$  增大到  $0.10 \text{ kg/m}^3$ . 尽管“黄蜂”的滞留时间长, 但台风“三巴”的最大风速(台风等级 5 级)远大于“黄蜂”(台风等级 3 级), “三巴”使得平均悬沙浓度增幅达 128.4%, “黄蜂”仅为 77.7%.

总体上, 6 次台风后(见图 4)风速平均达到  $8 \text{ m/s}$ , 是台风前的 1.7 倍. 6 次台风事件(见表 2)导致 6 个站点的平均表层悬沙浓度分别达到  $0.59 \text{ kg/m}^3$ (圆规)、 $0.44 \text{ kg/m}^3$ (米雷)、 $0.72 \text{ kg/m}^3$ (海葵)、 $0.86 \text{ kg/m}^3$ (三巴)、 $0.47 \text{ kg/m}^3$ (凤凰)、 $1.04 \text{ kg/m}^3$ (黄蜂), 平均增大 101.2%, 个别测站(余山站)悬沙浓度增大了 4 倍. 从不同台风的影响程度发现, 悬沙浓度变化与受到的台风风速和影响路径关系较大, 受滞留时间影响不明显.

## 4 讨 论

### 4.1 台风对表层悬沙浓度的影响

#### 4.1.1 风浪对表层悬沙浓度的影响

在影响长江口悬沙浓度时空分布的因素中, 潮差与径流量通常为主导因素<sup>[30]</sup>, 风速对于表层悬沙浓度的长期影响贡献不到 30%<sup>[31]</sup>. 利用 SPSS 分析 2010—2014 年洪季(8—10 月)正常天气表层悬沙浓度与风速的相关性, 得到芦潮港、高桥、徐六泾站点的相关系数  $R$  分别为 0.33, 0.15, 0.14(见图 5). 除芦潮港相关性较高外, 其余风速对悬沙浓度的相关性不显著. 进一步分析台风期间两者的回归关系, 结果芦潮港相关系数达到  $0.52(p < 0.01)$ , 相比洪季正常天气的相关



性增大近一倍. 高桥从正常天气下的不相关变为低度相关( $R = 0.29$ ,  $p < 0.05$ ), 而中段上游的徐六泾在台风中( $R = 0.13$ )与正常天气( $R = 0.14$ )受到风速影响差别不显著. 这表明悬沙浓度与风速之间都呈正相关关系, 反映台风是导致底床泥沙再悬浮并使悬沙浓度增大的原因之一. 而波浪对悬沙浓度影响的实质是风对悬沙浓度的影响<sup>[32]</sup>. 例如, “凤凰”台风影响余山站期间风速迅即增大, 有效波高和波周期便随之增大到正常天气下的 2~3 倍(见图 3), 大浪搅动水体导致底床沉积物再悬浮能力提高, 增大表面悬沙浓度. 此外, 台风引起剧烈风向变化(见图 3), 拖曳力使岸边形成上升流将近岸泥沙带到水体表层, 亦可增大表层悬沙浓度<sup>[33]</sup>. 结合图 4 和图 5 的悬沙浓度短期变化, 台风等高能量的随机性要素是长江口中外侧悬沙浓度急剧变化必须考虑的重要因素. 相比之下, 河口下段芦潮港站的悬沙浓度与风速之间的相关性明显大于口内中段的两个测站, 说明开敞水域受台风的影响大于较隐蔽的区域, 这与测站所处地形河段有关. 总体上两者之间的相关关系不是很好, 有以下原因: ①波浪增大相对于风速增大有一定滞后效应; ②表层悬沙浓度增大相对于底床泥沙再悬浮有一定时间上的滞后; ③各站点悬沙浓度的取样仅为一天两次, 一天中的潮周期内悬沙浓度随着潮相有明显变化, 这种变化会掩盖风浪对悬沙浓度的影响.

表 2 悬沙浓度对各台风事件的响应

Tab. 2 The suspended sediment concentration in response to typhoon events

站点		各台风事件						6次台风平均
		圆规	米雷	海葵	三巴	凤凰	黄蜂	
徐六泾	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.08	0.05	0.10	0.07	0.08	0.09	0.08
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.10	0.11	0.13	0.15	0.10	0.10	0.11
	变化率/%	28.1	114.4	37.4	104.0	26.4	11.0	53.6
青龙港	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.32	0.15	0.58	0.51	0.17	1.13	0.48
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.70	0.20	0.97	1.45	0.45	2.60	1.06
	变化率/%	121.8	31.2	68.1	185.7	161.0	131.1	116.5
高桥	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.18	0.31	0.30	0.30	0.12	0.18	0.23
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.32	0.39	0.39	0.40	0.18	0.27	0.32
	变化率/%	74.2	23.3	30.5	29.8	45.6	50.4	42.3
横沙	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.40	0.11	0.26	0.12	0.05	0.13	0.18
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.58	0.24	0.36	0.27	0.06	0.16	0.31
	变化率/%	46.7	117.6	41.8	117.9	10.0	20.8	59.1
余山	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.22	0.13	0.62	0.77	0.38	0.54	0.44
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.12	0.26	0.73	1.91	1.23	1.11	1.06
	变化率/%	401.2	105.0	17.5	146.5	227.6	104.9	167.1
芦潮港	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.43	0.46	0.75	0.36	0.30	0.81	0.52
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.71	1.28	1.73	1.02	0.78	2.02	1.26
	变化率/%	65.7	174.6	129.4	186.1	158.1	148.3	143.7
单次台风平均	台风前/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.27	0.20	0.43	0.36	0.18	0.48	—
	台风中/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	0.59	0.44	0.72	0.86	0.47	1.04	—
	变化率/%	123.0	119.4	54.2	128.4	104.8	77.7	—

注: “台风前”代表台风前 2 至 3 日悬沙农渡, “台风中”代表台风影响期间 2 日悬沙农渡

#### 4.1.2 风级对表层悬沙浓度的影响

当风速高达一定程度时, 风浪引起的水动力变化产生强烈的混合作用, 垂直的上升流水团携带物质进入表层, 其中包括底床的细颗粒沉积物等物质<sup>[34]</sup>. 为进一步讨论不同风级对表层悬沙浓度的影响, 根据表 3 风速风级的对应关系, 将 6 个典型站点日均风速分类为 1 至 7 级, 7 级以上风速为 17.1 m/s 在长江口较为罕见, 暂时不列入. 以风级作为自变量, 悬沙浓度作为因变量, 选取多项式和对数回归分析<sup>[35]</sup>, 得到河口中段至下段站点(依次为徐六泾、青龙港、高桥、横沙、余山、芦潮港)相关系数  $R$  值分别为 0.953、0.942、0.855、0.617、0.984、0.956(见图 6).

横沙站用多项式分析出现随风级增大悬沙浓度降低现象, 因此选用对数拟合更好. 相关性除了横沙站点仅为 0.617 外, 其他站点都在 0.855 以上, 佘山与芦潮港则高达 0.956 以上 ( $p < 0.01$ ), 说明河口下段响应程度较中段显著, 这与短周期风速与悬沙浓度的相关性结果相似. 值得注意的是, 由于横沙测站点位于南港北槽的长江深水航道区段, 该区段的汉道分流、两侧双导堤导流以及河床加深形态的复杂性加大了底床泥沙再悬浮至表层的难度, 且南北侧的岛礁形成的天然防波堤对大风起一定的阻挠, 在风级从 2 级变化到 5 级的过程中悬沙浓度基本维持在  $0.31 \text{ kg/m}^3$ , 统计结果较其他站点相关性低. 另外, 由于徐六泾的泥沙起动流速在  $0.79 \text{ m/s}$  左右, 大于  $0.5 \sim 0.6 \text{ m/s}$  的南北槽起动流速<sup>[36]</sup>, 随风级的增大, 风浪逐渐到达河口中段上游, 一定程度作用到底部细颗粒泥沙, 导致徐六泾的悬沙浓度缓慢增大, 拟合关系较短周期相关性高.

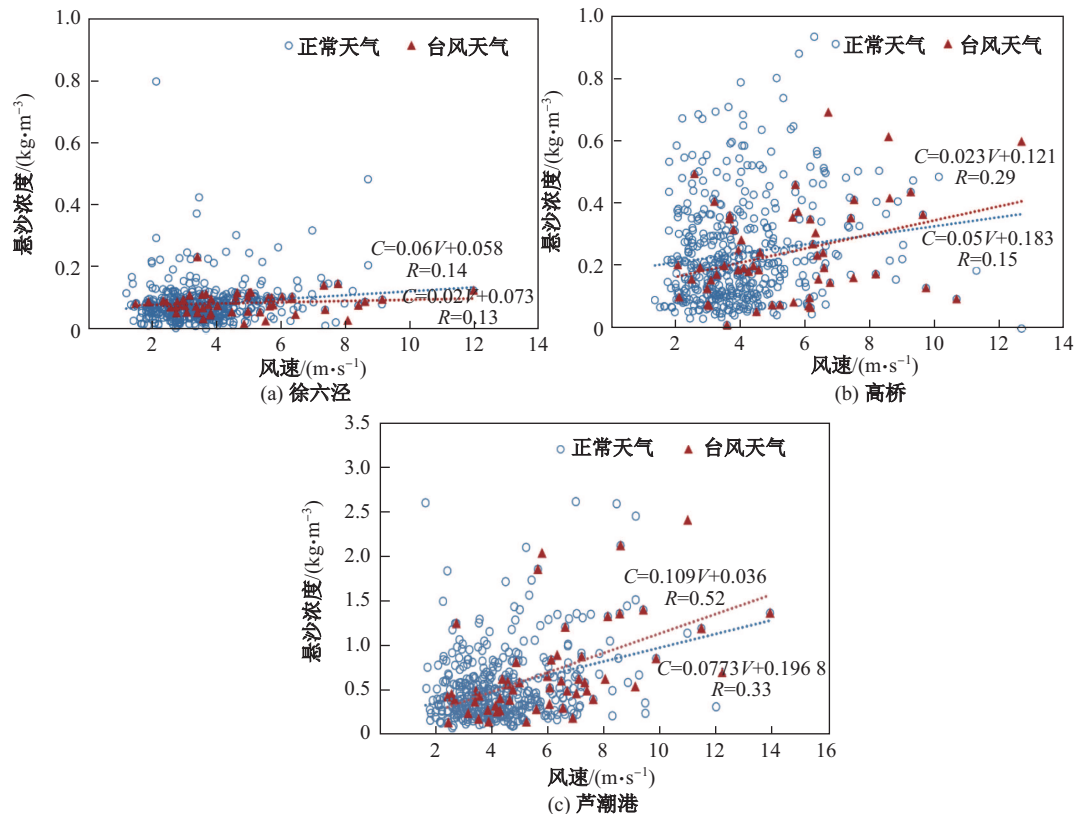


图5 风速( $V$ )与悬沙浓度( $C$ )的关系

Fig. 5 Correlations between wind speeds ( $V$ ) and suspended sediment concentrations ( $C$ )

表 3 风级风速对应表

Tab. 3 Relationship between wind scale and wind speeds

风级	0	1	2	3	4	5	6	7
风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0-0.2	0.2-1.5	1.5-3.3	3.3-5.4	5.4-7.9	7.9-10.7	10.7-13.8	13.8-17.1

随着风级每升高一级, 悬沙浓度提高幅度不同, 部分站点呈指数增长. 如相关性较好的佘山站(见图 6), 风级从 1 级变为 3 级时, 平均悬沙浓度增大 1.2 倍; 而风级从 3 级增大到 5 级时, 平均悬沙浓度从  $0.38 \text{ kg/m}^3$  增大 1.6 倍到  $0.59 \text{ kg/m}^3$ . 即使是中段上游的青龙港风级增大 2.9 倍, 表层悬沙浓度平均也能增幅 1.9 倍. 有研究表明, 在 Barataria 流域, 当风速为  $4 \text{ m/s}$  时该研究

区域 50% 的表层沉积物发生再悬浮, 而当风速增大 2.5 倍达到 10 m/s 时, 再悬浮的表层沉积物占了 80% 以上<sup>[37]</sup>. 这表明风级越大, 可能加剧风浪冲刷岸滩泥沙使其落淤, 浅滩沉积物被粗化的同时出现大量泥沙进入航道水域, 而再悬浮加速了底床沉积物和悬沙的交换频率, 导致中下层泥沙活跃到水体表层, 这对表层悬沙浓度变化的贡献起到关键作用.

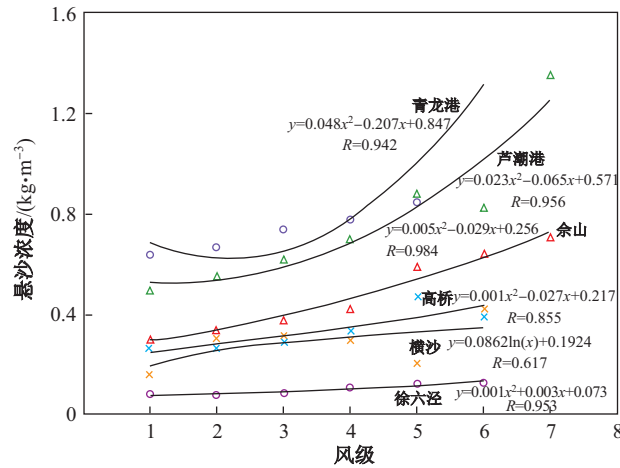


图 6 不同风级影响下的表层悬沙浓度

Fig. 6 Correlations between SSC and wind scale at different stations

#### 4.2 地形对台风天气下表层悬沙浓度的影响

各测点所处长江口不同河段, 河流与海洋交汇的动力条件不同, 结合年均悬沙浓度与台风影响悬沙浓度差异, 发现各站点的变化对其响应程度不一. 例如 6 次台风事件后, 徐六泾的平均悬沙浓度为  $0.11 \text{ kg/m}^3$ , 较多年年均悬沙浓度 ( $0.084 \text{ kg/m}^3$ ) 增大 35.1%, 相比台风前增大 53.5%. 河口下段的余山, 悬沙浓度在台风中为  $1.06 \text{ kg/m}^3$ , 和年均悬沙浓度的  $0.43 \text{ kg/m}^3$  相比, 增幅高达 146.4%. 6 次典型台风前后悬沙浓度平均变化率 (见表 2) 分别为 53.6% (徐六泾)、116.5% (青龙港)、42.3% (高桥)、59.1% (横沙)、167.1% (余山)、143.7% (芦潮港). 其中, 余山受台风影响变化最大, 其次为芦潮港和青龙港, 横沙、高桥、徐六泾增幅都在 50% 左右. 此外, 徐六泾、青龙港、高桥、横沙、余山和芦潮港的取样点平均水深分别为 10 m、4 m、10 m、8 m、6 m 和 5 m. 其中, 变化率最大的余山、芦潮港及青龙港三个测点水深均不超过 6 m, 这一现象可能与不同地形和水深对悬沙浓度的干扰有关. 在风力作用相近的条件下, 根据公式  $L = gT^2/2\pi$  ( $g$  为重力加速度,  $L$  为波长,  $T$  为波周期), 当水深  $d$  满足  $d < 0.5L$ , 波浪才足以扰动到底床沉积物, 进而垂向掀沙, 改变表层悬沙浓度的大小<sup>[38]</sup>. 且台风的巨大能量传递给近岸水体, 导致底床剪切应力显著增大, 水深愈浅底床沉积物与水体交换愈频繁, 悬沙浓度愈高<sup>[39]</sup>. 可以认为悬沙浓度在近岸相对最高<sup>[40]</sup>, 向外海随水深不断增加而逐渐减小, 浅水中悬沙浓度变化的幅度受风力影响比深水中更明显<sup>[41]</sup>. 其次, 由图 5 中河口下段芦潮港风速与悬沙浓度的相关性大于中段下游的高桥, 高桥大于中段上游的徐六泾可知, 不同开敞性河段对台风响应结果不同. 分析认为, 芦潮港和余山站水深浅、潮差大, 位于最大浑浊带且具有良好的开敞性, 台风掀动波浪导致的垂向再悬浮作用更直接, 是促使河口下段的表层悬沙浓度在台风影响下的变化率及相关性都比较高的重要原因. 而徐六泾和高桥相对位于中段靠上, 潮差小、水深大, 仅在大风天气下因涌浪传递难以深入口内, 悬沙浓度的变化不明显.

#### 4.3 其他动力对台风期间悬沙浓度的影响

悬沙浓度受多种动力因素控制. 台风期间仍受潮周期、大小潮周期及上游来水等影响, 为

直观地得到台风事件对表层悬沙浓度的影响, 将台风期间的其他动力情况呈现如表 4 所示. 长江口径流量相对大通水文站滞后 7~8 d<sup>[30]</sup>, 因此选取的大通站径流量提前 7~8 d 代表长江口当日数据. 结果发现, 台风“圆规”、“海葵”在台风前和台风中径流量基本不变, “米雷”、“三巴”在台风中径流量明显增长, “黄蜂”、“凤凰”在台风的径流量反而下降. 此外, 除了台风“三巴”、“凤凰”, 其余台风期间的潮差都比台风前低 60 至 140 cm, 尤其台风“圆规”、“米雷”的影响发生在小潮时期, 悬沙浓度总的变化反而比台风前的高潮位分别增 122% 和 120%(见表 3). 台风天气的悬沙浓度变化由台风中的悬沙浓度减台风前得到, 假设台风前的两个相近日期的径流量变化很小, 通过台风前和台风中的两段潮差得到该相同潮位下的两段正常天气的悬沙浓度(台风发生的前一个潮周期内), 对比两个时期下的悬沙浓度变化发现, 站点徐六泾、余山和芦潮港受台风影响的悬沙浓度变化都远远大于因潮汐带来的变化.

表 4 其他要素对台风期间悬沙浓度的影响

Tab. 4 Other factors affecting the suspended sediment concentration during typhoons

站点	要素	时期	台风名称					
			圆规	米雷	海葵	三巴	凤凰	黄蜂
大通	径流量(m <sup>3</sup> /s)	台风前	43 166	28 533	57 000	36 800	41 625	41767
		台风中	43 000	35 100	57 467	37 550	40 100	36 050
余山	潮差(cm)	台风前	256	198	337	279	126	399
		台风中	116	138	210	399	291	305
徐六泾	风速(m/s)	台风前	2.70	4.10	6.31	3.19	3.17	3.50
		台风中	4.14	7.20	9.60	5.87	7.37	7.42
	悬沙浓度变化(kg/m <sup>3</sup> )	正常天气	-0.03	0.04	-0.01	0.02	0.00	0.00
		台风天气	0.02	0.06	0.03	0.08	0.02	0.01
余山	风速(m/s)	台风前	5.01	7.55	8.24	5.94	6.50	7.05
		台风中	6.52	8.65	13.24	10.95	12.00	12.88
	有效波高(m)	台风前	0.80	0.96	1.49	1.03	0.77	0.98
		台风中	1.44	1.47	2.14	2.32	2.02	2.50
	悬沙浓度变化(kg/m <sup>3</sup> )	正常天气	-0.18	-0.08	-0.29	-0.08	0.11	0.01
		台风天气	0.90	0.13	0.09	1.14	0.85	0.57
芦潮港	风速(m/s)	台风前	3.90	6.00	7.30	5.83	4.59	5.16
		台风中	5.33	7.44	12.67	7.67	10.23	9.30
	有效波高(m)	台风前	0.53	0.65	0.97	0.71	0.58	0.75
		台风中	0.87	0.85	1.67	1.34	1.37	1.63
	悬沙浓度变化(kg/m <sup>3</sup> )	正常天气	0.08	-0.15	-0.03	-0.05	0.10	0.04
		台风天气	0.28	0.82	0.98	0.66	0.48	1.39

注: “台风前”代表台风前 2 至 3 日, “台风中”代表台风影响期间 2 日

比较不同站点的动力变化情况, 可以明显看到在台风中潮差小于台风前的情况下(台风“圆规”、“米雷”、“海葵”、“黄蜂”), 正常天气余山的悬沙浓度出现负值的次数更多, 可以理解为余山测站的悬沙浓度受外海潮汐影响的敏感性更强. 然而, 在 6 次台风的强烈扰动下, 悬沙浓度仍明显增大. 若以台风天气的悬沙浓度变化除去正常天气因潮汐作用的悬沙浓度变化, 得到余山站 6 次更为真实的悬沙浓度受台风影响的变化, 分别为 1.08 kg/m<sup>3</sup>、0.25 kg/m<sup>3</sup>、0.38 kg/m<sup>3</sup>、1.22 kg/m<sup>3</sup>、0.74 kg/m<sup>3</sup>、0.56 kg/m<sup>3</sup>. 位于河口中段上的徐六泾受潮汐影响有限, 如在台风“米雷”期间, 潮位较台风前为低, 且台风后径流量增大, 悬沙浓度变化表现为增大. 同样, 在“凤凰”期间, 潮位明显增大, 而径流量下降, 悬沙浓度变化却不明显.

## 5 结 语

结合风速波高资料和悬沙浓度数据, 结果表明在悬沙浓度的短期变化中, 台风的高能量引

起的风速和波高变化是促使表层悬沙浓度急剧变化的主要因素,但悬沙浓度的变化仍受所处河段地形和潮汐的影响。从6次台风总体平均来看,台风后有效波高增长比为2.2倍,风速平均达到8 m/s,增长比为1.7倍。台风导致表层悬沙浓度分别达到0.59 kg/m<sup>3</sup>(圆规)、0.44 kg/m<sup>3</sup>(米雷)、0.72 kg/m<sup>3</sup>(海葵)、0.86 kg/m<sup>3</sup>(三巴)、0.47 kg/m<sup>3</sup>(凤凰)、1.04 kg/m<sup>3</sup>(黄蜂),总体平均增加101.2%。河口不同河段,受台风干扰程度不同。其中河口下段的余山站与芦潮港受影响最为显著,悬沙浓度分别增加167.1%、143.7%;而中段敏感性不高,受风速影响相对较小。从长时间尺度统计,随着风级每升高一级(1—4级),悬沙浓度一定程度的相应提高,在5级以上风级越大相应的悬沙浓度变化越明显。河口海岸悬沙浓度对于台风的响应是一个复杂的变化过程,除台风性质和地形环境外,还与河流的来水来沙、沉积物颗粒粒径及人工建筑等因素有关,对于表层悬沙浓度受台风的影响是值得更深度研究的。

### [参 考 文 献]

- [1] 陈吉余. 长江河口动力过程和地貌演变[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1988.
- [2] 詹义正, 陈立. 泥沙比表面积的测定[J]. 武汉大学学报(工学版), 1996(5): 6-9.
- [3] WEBSTER T, LEMCKERT C J. Sediment resuspension within a microtidal estuary/embayment and the implication to channel management [J]. *Journal of Coastal Research*, 2002, SI36(4): 753-759.
- [4] 刘金贵, 李海, 刘桂梅, 等. 近海泥沙输运与生态系统的耦合模拟研究进展[J]. *海洋环境科学*, 2012(5): 770-774.
- [5] 陈沈良, 谷国传. 杭州湾口悬沙浓度变化与模拟[J]. *泥沙研究*, 2000(5): 45-50.
- [6] YANG S L, ZHANG J, ZHU J. Response of suspended sediment concentration to tidal dynamics at a site inside the mouth of an inlet: Jiaozhou Bay (China)[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2004, 8(2): 170-182.
- [7] 王喜年. 风暴潮预报知识讲座[J]. *海洋预报*, 2001, 20(3): 63-69.
- [8] FIELD C B, BARROS V R, DOKKEN D J, et al. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]// IPCC. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [9] 冯士筌. 风暴潮的研究进展[J]. *世界科技研究与发展*, 1998, 20(4): 44-47.
- [10] 杨桂山. 中国沿海风暴潮灾害的历史变化及未来趋向[J]. *自然灾害学报*, 2000, 9(3): 23-30.
- [11] YING M, CHEN B, WU G. Climate trends in tropical cyclone-induced wind and precipitation over mainland China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(1): 1702.
- [12] 何超. 近二十年长江口邻近海域悬沙分布比较研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [13] 刘志国. 长江口水体表层泥沙浓度的遥感反演与分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2007.
- [14] FANG S, VERHOEF W, ZHOU Y X, et al. Satellite estimates of wide-range suspended sediment concentrations in Changjiang (Yangtze) estuary using MERIS data[J]. *Estuaries & Coasts*, 2010, 33(6): 1420-1429.
- [15] LI P, YANG S L, XU K H, et al. Spatial, temporal, and human-induced variations in suspended sediment concentration in the surface waters of the Yangtze Estuary and adjacent coastal areas[J]. *Estuaries & Coasts*, 2012, 35(5): 1316-1327.
- [16] YANG S L, LI P, GAO A, et al. Cyclical variability of suspended sediment concentration over a low-energy tidal flat in Jiaozhou Bay, China: Effect of shoaling on wave impact[J]. *Geo-Marine Letters*, 2007, 27(5): 345-353.
- [17] HALE R P, NITTROUER C A, LIU J T, et al. Effects of a major typhoon on sediment accumulation in Fangliao Submarine Canyon, SW Taiwan[J]. *Marine Geology*, 2012, 326: 116-130.
- [18] HUANG M Y F, MONTGOMERY D R. Altered regional sediment transport regime after a large typhoon, southern Taiwan[J]. *Geology*, 2013, 41(12): 1223-1226.
- [19] MILES T, GLENN S M, SCHOFIELD O. Temporal and spatial variability in fall storm induced sediment resuspension on the Mid-Atlantic Bight[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 63(4): S36-S49.
- [20] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [21] YANG S L, MILLIMAN J D, XU K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 138: 469-486.
- [22] 沈焕庭, 贺松林. 长江河口最大浑浊带研究[M]// 沈焕庭, 潘定安. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社, 2001: 90-97.
- [23] 隋洪波. 长江口区波浪分布及其双峰谱型波浪的统计特征[D]. 山东青岛: 中国海洋大学, 2003.
- [24] 恽才兴. 长江河口近期演变基本规律[M]. 北京: 海洋出版社, 2004.
- [25] 陈沈良, 胡方西, 胡辉, 等. 长江口区河海划界自然条件及方案探讨[J]. *海洋学研究*, 2009, 27(s1): 1-9.

- [26] 国家质量技术监督局. 海洋监测规范第 4 部分, 海水分析: GB 17378.7-1998[S]. 北京: 中国标准出版社出版, 1999.
- [27] LIN I I. Typhoon-induced phytoplankton blooms and primary productivity increase in the western North Pacific subtropical ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2012, 117(C03039): 1-15.
- [28] 中国气象局政策法规司. 气象标准汇编: 2005-2006[M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [29] 王帅, 张干, 傅聃. 西北太平洋台风眼形态特征分析[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2010, 40(s1): 31-40.
- [30] 李鹏. 长江供沙锐减背景下河口及其邻近海域悬沙浓度变化和三角洲敏感区淤积响应[D]. 上海: 华东师范大学, 2012.
- [31] 姚俊. 长江口典型河段表层悬沙浓度影响因子定量分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2017.
- [32] 杨世伦, 丁平兴, 赵庆英. 开敞大河口滩槽冲淤对台风的响应及其动力泥沙机制探讨——以长江口南汇边滩-南槽-九段沙系统为例[J]. *海洋工程*, 2002(3): 69-75.
- [33] 邵昂, 赵华云, 杨世伦, 等. 径流、潮流和风浪共同作用下近岸悬沙浓度变化的周期性探讨——以杭州湾和长江口交汇处的南汇嘴为例[J]. *海洋科学进展*, 2008, 26(1): 44-50.
- [34] DAVERGNE T. Offshore and nearshore chlorophyll increases induced by typhoon winds and subsequent terrestrial rainwater runoff[J]. *Marine Ecology-Progress Series*, 2007, 333(1): 61-74.
- [35] CIGIZOGLU H K. Estimation and forecasting of daily suspended sediment data by multi-layer perceptrons[J]. *Advances in Water Resources*, 2004, 27(2): 185-195.
- [36] 左书华. 长江河口典型河段水动力、泥沙特征及影响因素分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [37] BOOTH J G, MILLER R L, MCKEE B A, et al. Wind-induced bottom sediment resuspension in a microtidal coastal environment[J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(7): 785-806.
- [38] HALLERMEIER R J. A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate[J]. *Coastal Engineering*, 1980, 4(80): 253-277.
- [39] 苗丽敏, 杨世伦, 朱琴, 等. 风暴过程中潮滩悬沙浓度和悬沙输运的变化及其动力机制——以长江三角洲南汇潮滩为例[J]. *海洋学报*, 2016, 38(5): 158-167.
- [40] 孙连成. 渤海湾西南部近海水域风天含沙量分布特征[J]. *泥沙研究*, 1991(1): 52-56.
- [41] LI Y, LI X. Remote sensing observations and numerical studies of a super typhoon-induced suspended sediment concentration variation in the East China Sea[J]. *Ocean Modelling*, 2016, 104: 187-202.

(责任编辑: 李万会)

(上接第 194 页)

- [18] LI J, ZHANG H, HOU P, et al. Mapping the bathymetry of shallow coastal water using single-frame fine-resolution optical remote sensing imagery [J]. *海洋学报 (英文版)*, 2016, 35(1): 60-66.
- [19] POUPARDIN A, IDIER D, MICHELE M D, et al. Water Depth Inversion From a Single SPOT-5 Dataset [J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2016, 54(4): 2329-2342.
- [20] 傅斌, 黄韦良, 周长宝, 等. 星载 SAR 浅海水下地形和水深测量模拟仿真——水下地形高度、坡度和方向与可测水深分析 [J]. *海洋学报*, 2001, 23(1): 35-42.
- [21] KUO Y Y, LYU L G, KAO I L. Directional spectrum analysis and statistics obtained from ERS-1 SAR wave images [J]. *Ocean Engineering*, 1999, 26(11): 1125-1144.
- [22] KIRBY J T, WEI G, CHEN Q, et al. Funwave 1.0: Fully nonlinear boussinesq wave model-documentation and user's manual [R]. DE: University of Delaware, 1998.
- [23] SHI F Y, KIRBY J T, TEHRANIRAD B, et al. FUNWAVE-TVD, documentation and users' manual (CACR-11-03) [R]. DE: University of Delaware, 2011.
- [24] BERKHOFF J C W, BOOY N, RADDER A C. Verification of numerical wave propagation models for simple harmonic linear water waves [J]. *Coastal Engineering*, 1982, 6(3): 255-279.
- [25] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [26] 陈玮彤, 张东, 施顺杰, 等. 江苏中部淤泥质海岸岸线变化遥感监测研究 [J]. *海洋学报*, 2017, 39(5): 138-148.

(责任编辑: 李万会)