

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.05.009

影响长江口深水航道骤淤的非常态天气过程 I: 台风的路径特征及数值验证

黄华聪¹, 贾 晓^{1,2}, 路川藤³

(1. 上海河口海岸科学研究中心, 上海 201201; 2. 上海交通大学水动力学教育部重点实验室, 上海 200240;
3. 南京水利科学研究院河流海岸研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 为归纳长江口深水航道台风期骤淤的发生规律及特征, 分析了发生骤淤时刻的气象条件与对应的波浪条件。研究发现, 牛皮礁站的波能与骤淤具有较好的相关性; 从台风路径上分析, 长江口东侧过境台风对航道的骤淤影响显著。结合历史台风路径, 选取 3 个典型路径的台风, 选择藤田-高桥圆形经验风场和 CFSR (climate forecast system reanalysis) 风场的混合风场复演了台风场, 然后采用 SWAN 模型模拟了不同路径台风期间的波况, 最后以牛皮礁站的浅水波能流为判别参数, 分析不同路径台风对长江口深水航道骤淤的影响。研究表明长江口东侧过境的台风是较易产生较大波能并进一步诱发骤淤的典型台风路径, 这一分析结果与 2010 年以来的骤淤实测台风路径结果吻合。

关键词: 长江口深水航道; 骤淤; 台风路径; 藤田-高桥经验风场; CFSR 风场; SWAN 模型; 波能

中图分类号: TV148; P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)05-0432-07

The extraordinary weather process inducing sudden siltation in deepwater navigation channel of Yangtze Estuary I: the typhoon path characteristics and numerical verification

HUANG Huacong¹, JIA Xiao^{1,2}, LU Chuanteng³

(1. Shanghai Estuarine and Coastal Science Research Center, Shanghai 201201, China;
2. MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, School of NAOCE, Shanghai Jiao Tong University,
Shanghai 200240, China;
3. River and Harbor Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: To summarize the occurrence regularity and characteristics of sudden siltation during typhoon period in the deepwater navigation channel of Yangtze Estuary, the meteorological conditions and corresponding wave conditions during sudden siltation are analyzed. The results show that the wave energy correlates well with the siltation in NPJ station. The analysis of typhoon paths suggests that the sudden siltation in the navigation channel is significantly influenced by the typhoon passing through the east part of Yangtze Estuary. In this study, three typical typhoon paths are selected with reference to the historic typhoon paths in Yangtze Estuary, and the typhoon field was replicated by combining the empirical circular (Fujita and Takahashi) wind field and CFSR (climate forecast system reanalysis) wind field. SWAN model is then used to simulate the wave conditions under different typhoon paths. Finally, the effects of different typhoon paths on the sudden siltation are analyzed by taking the shallow water wave energy in NPJ station as the discriminant parameter. The study indicates that the typhoon passing through the east area of the Yangtze Estuary is found to be a typical typhoon path, which can readily induce relatively large wave energy and subsequent sudden siltation. And such analysis result agrees well with that of measured typhoon path causing sudden siltation since 2010.

Key words: deep water channel of Yangtze Estuary; sudden siltation; typhoon path; Fujita-Takahashi wind field; CFSR wind field; SWAN wave model; wave energy

骤淤是港口航道工程十分关心的水沙事件,其因淤积量大且淤积时间短,给疏浚造成很大的压力,甚至会影响船舶的安全通航。长江口深水航道位于长江口拦门沙河段,其含沙量高,盐度适于絮凝淤积,且不时遭受非常态天气,诸如台风、寒潮的影响。在长江口深水航道二期工程以来,屡次观测到骤淤现象^[1-2]。

已有多位学者从不同方面阐述了长江口深水航道的淤积机制,比如研究最大浑浊带的絮凝因素^[3]、长江口整合的动力场^[4]及南导堤越堤水沙^[5]等对淤积的潜在影响,但就长江口的骤淤问题,研究较少。目前骤淤计算方法主要源于黄骅港粉砂质海岸航道的淤积计算^[6-7],对于长江口大型河口区域的航道淤积适用性不强。

笔者在现有的骤淤量统计基础上,从气象要素和波浪要素与骤淤量的表征相关性入手展开分析,通过构建风场模型和 SWAN 模型,模拟特定台风过程下长江口深水航道口门处的波能,研究发生骤淤时刻的气象条件与对应的波浪条件。

1 长江口深水航道的骤淤概述

长江口 12.5 m 深水航道横贯长江口拦门沙,周边河势及长江口主要水文站点见图 1。航道自 2010 年 3 月贯通以来,在发挥巨大经济效益和社会效益的同时,回淤量时空分布高度集中的问题也非常突出,每年需投入大量的维护疏浚费用。长江口 12.5 m 深水航道回淤包括常态回淤和由台风、寒潮大风等恶劣自然因素引起的骤淤。台风、寒潮引起的航道骤淤由于作用时间短、淤积范围集中,对航道水深的维护造成极大困难。

骤淤本质是特定条件下产生的快速淤积过程。实际上巨型河口深水航道内的骤淤,因为其他物理过程(典型如潮流)的作用以及疏浚作业的持续性,无法得到严格准确的骤淤量。根据前后对比法得到的骤淤量,反映的是一段时间内淤积的增加,可以准确反映骤淤的发生与否。

据长江口深水航道管理局统计,2010—2014 年航道回淤总量年均约为 $8.6\times10^7\text{ m}^3$,其中常态回淤年均约为 $7.6\times10^7\text{ m}^3$,骤淤量年均 $1.0\times10^7\text{ m}^3$ 左右。

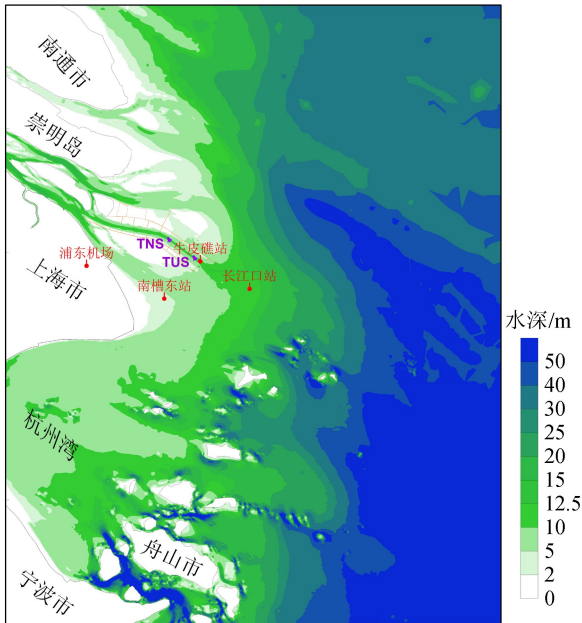


图 1 长江口河势及周边水文测站位置
Fig.1 River map of Yangtze Estuary and the location of surrounding hydrological stations

2 波能与骤淤的关系

河流及海岸中的泥沙起悬、落淤能够受到台风的影响,主要是以风浪为中间媒介,将风能传递到水体。研究表明,在波浪潮流作用下,泥沙极易扬起,风浪停息后,泥沙又极易沉积,造成港口航道骤淤^[8-9]。有部分学者尝试分析波浪动力与长江口深水航道淤积的相关性^[10]。近年来波能流(或称波功率,简称为波能)作为波浪综合作用指标参数,通常被用来直接统计其与淤积的表征相关性。刘猛等^[11]采用深水波能公式计算了长江口波能与淤积的相关性。本文以浅水波能为特征参数,分析骤淤与波能的相关性。

波能是波浪在传播方向上单位时间内通过单位波峰宽度上的能量。以深水规则波为例,其等于单宽波峰线长度的波浪作用在与波峰线平行的一个竖直面上各点的力与波浪的水质点通过此竖直面上各相应点的流速之积的总和在一个波周期内的平均值。

参考文献[12],单个浅水规则波的波能:

$$P = \frac{1}{32} \rho g^2 H^2 T \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \left\{ \tanh \left[\left(\frac{4\pi^2 h}{gT^2} \right)^{\frac{3}{4}} \right] \right\}^{\frac{2}{3}} \tag{1}$$

式中: ρ ——水体密度; g ——重力加速度; H ——波高; T ——周期; k ——波数; h ——水深。

式(1)表达的是时域中,单位时间内特定波高周期下的波能,而在实际测量中不可能测量时域上每一波浪的尺度参数。以长江口 3 个水文站为例(图 1),能够表达波况的参数仅有最大波高 $H_{\max}$ 、有效波高 H_s 、有效周期 T_s 、平均波高 H_m 及平均周期 T_m 等一系列频域参数。

为了合理评估牛皮礁站水域的波能,将频域上的波要素按照相应的时间比例拓展在时域上。即将特征

时间段(测站为1 h 间隔的散点数据)分成2 段,其中1/3 时间段的波能计算采用 H_s 和 T_s ,剩余时间的波能计算采用 H_m 和 T_m ,然后将各自得到的波能乘以相应的时间,得到给定频域波要素下特征时间段内的总波能。以长江口水文站为例,1 h 的总波能为

$$Q = 1\,200P_s + 2\,400P_m$$

(2)

式中: P_s 、 P_m ——依据有效波参数、平均波参数计算的波能。

牛皮礁站(图 1)位于长江口深水航道口门内约 2 km 处,能够较好地代表输入北槽的波能。以发生台风频次较高的 2012 年为例,牛皮礁站实测数据计算的波能与发生骤淤的时间区间的对应关系见图 2。由图 2 可以看出,骤淤时间区间内,牛皮礁站的实测波能均较大。如果以牛皮礁站 $H_s>1.0$ m 为一次台风过程的统计时段,对该时段内的波能进行积分,就可以得到单次台风过程单位面积水体的总波能。

由历年的骤淤量和波能相关关系(图 3)可以看出,骤淤和波能存在很好的相关性。该现象在以前诸多研究中得到过一定程度的分析,主要认为是波能的增加引起海床孔隙水压变化导致泥沙起悬增多等诸多因素导致。

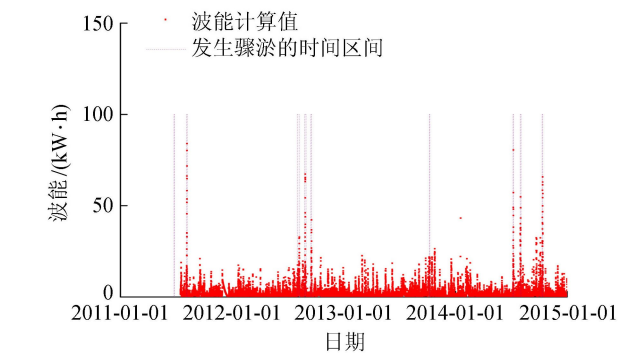


图 2 牛皮礁站波能与骤淤时间区间的对应关系

Fig.2 Correspondenc between wave energy and time intervals of sudden siltation in Niupijiao Station

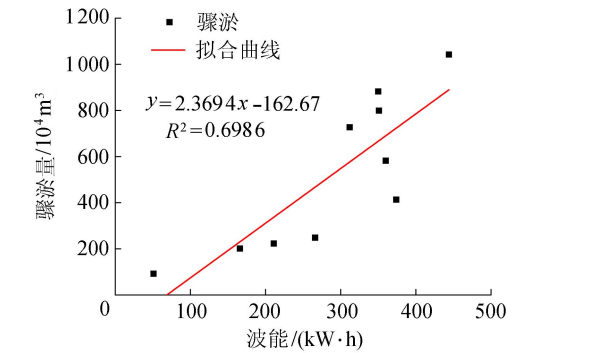


图 3 牛皮礁站波能与骤淤量的相关关系

Fig.3 Correlation analysis between wave energy and sudden siltation in Niupijiao Station

3 典型路径台风及风场验证

为了分析何种类型的台风能够使输入北槽的波能明显增加,选取 3 种典型路径的台风,采用圆形梯度风场耦合 CFSR 背景风场的混合风场数据,验证了长江口周边的风场。

3.1 3 种典型路径台风

根据台风的登陆位置和影响范围,在 2010 年以后发生的台风内,选取影响长江口水域的 3 种典型路径的台风过程(表 1),其路径(参考浙江台风网)见图 4。

3.2 圆形风场模式概述

进行气旋风场模拟时,首先需选择合适的台风气压场模式。本文中采用国家海洋环境预报中心的台风暴潮模式^[13],当距台风中心距离 $r<2R_0$ (R_0 为台风最大风速半径)时采用藤田模式,当 $r\geq 2R_0$ 时采用高桥模式计算气压场,移行风速采用 Veno Takeo 公式。实践证明,在合理选择最大风速半径的前提下,这种方法基本能够模拟海面上的气旋风场。

3.3 CFSR 风场概述

CFSR(NCEP climate forecast system reanalysis)是由 NCEP (national centers for environmental

表 1 影响长江口水域的 3 种典型台风及其统计参数

Table 1 Three typical typhoons affecting Yangtze Estuary and their statistical parameters

类型	名称	气压/hPa	十级风圈半径/km	牛皮礁最大风速/(m·s ⁻¹)	最大风速时相应的风向/(°)
东侧过境	布拉万	955	150	19.2	350
南侧登陆	海葵	950	180	16.6	101
南侧登陆	麦德姆	990		15.6	173
西侧过境					

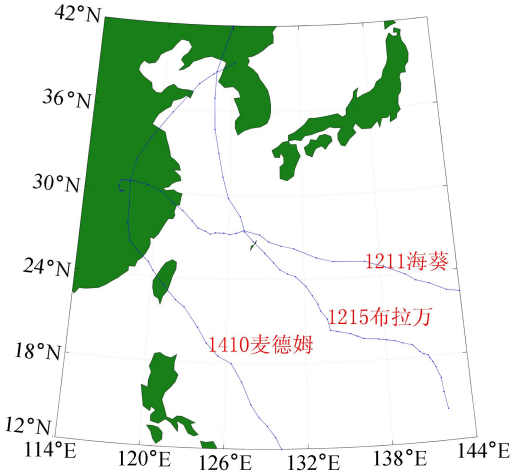


图 4 3 种典型台风的路径

Fig.4 Paths of three typical typhoons

prediction) 设立的全球高精度气象后分析系统,其可以给出风浪计算所关心的高地理精度($0.3^{\circ}\times0.3^{\circ}$)的海面气象预估场。自 2011 年以来,CFSR 已经升级至 CFSV2 (climate forecast system version 2),其可以认为是 CFSR 的拓展版本,可以给出精度达 $0.2^{\circ}\times0.2^{\circ}$ 的气象数据^[14-15]。

CFSR 气象数据实际经过诸多气象卫星数据的同化处理,大范围的数据可信,并且其精度基本可以满足圆形风场外围的风场同化^[16],在相关研究中已经有较广泛应用(历史文献通常引用了其历史资料,称之为 NCEP 背景风场)。

3.4 风场验证

将圆形风场和 CFSR 背景风场进行耦合,可以得到适用的混合风场。以牛皮礁站和浦东机场(数据源自 weather underground)为例,3 个台风的合成风场与实测风场的数据对比见图 5 和图 6。其中牛皮礁站点风速经过高度折算,自实测的 25 m 高程风速折算至标准 10 m 高程,高度折减系数 0.88^[17]。由图 5 和图 6 看出,2 个站点的风速、风向过程模拟较好,可以以此为输入条件计算长江口水域的波浪场。

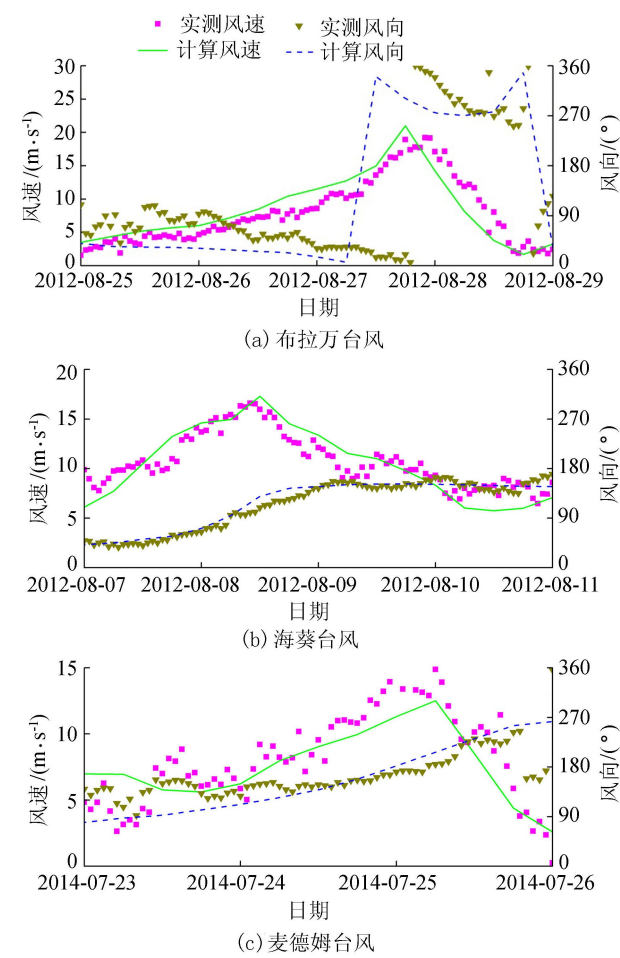


图 5 牛皮礁站风场验证

Fig. 5 Validations of wind fields in NPIJ Sites

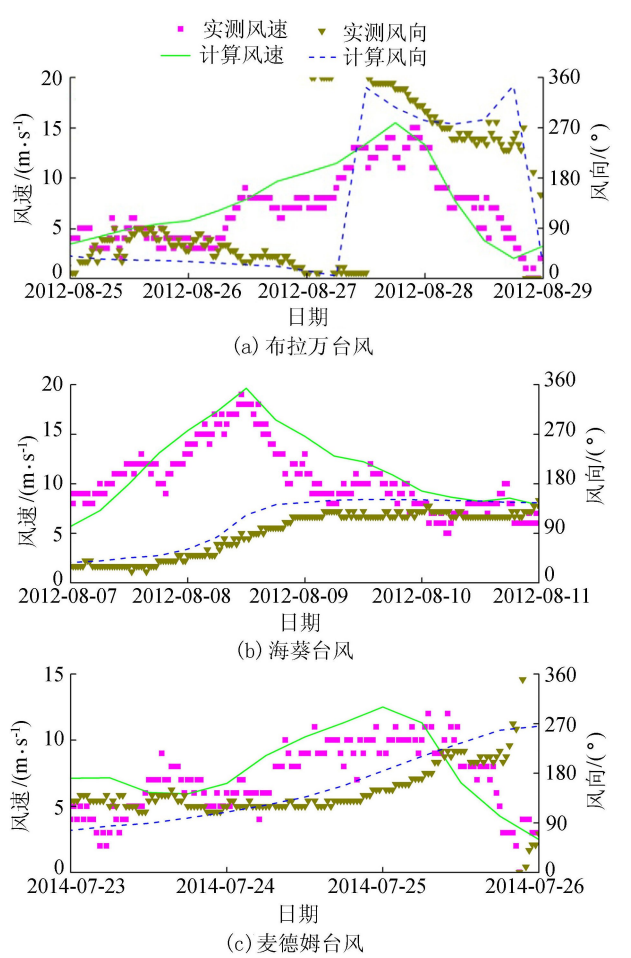


图 6 浦东机场站风场验证

Fig. 6 Validations of wind fields in PVG Sites

4 海浪数值模拟及波能统计

采用 SWAN 模型计算长江口深水航道口门处的分向波能,并分析影响显著的台风路径。

4.1 模型简介

SWAN 模型是时下最新的第 3 代海浪数学模型^[18-20],其在 WAM 模型基础上改进了算法并且加入了额外的浅水控制项。SWAN 模型对不同水深的适应性较好,且较为全面地考虑了包括能量输入、损耗和非线性相互作用等在内的一系列源汇项;模型以不规则谱型的方向谱表示真实海浪的随机性特征,模拟结果更接近真实海浪。SWAN 模型采用动谱平衡方程描述风浪生成及其在近岸区的演化过程。

SWAN 模型在对波浪成长的谱型没有任何先验限制的条件下,求解了动谱能量平衡方程,且在深水域使

用了相同的源项,包括风能输入、海浪成长、白帽耗散及四波相互作用;而在浅水域中,源项补充了包括底摩擦损耗、三波相互作用和水深引起的破碎等。

SWAN 模型采用全隐式差分格式,且可以调节系数的取值决定谱空间的差分格式是偏于迎风格式或中心格式,即决定在谱空间和方向空间的数据离散格式和收敛性强弱,在浅水海域的模拟中更稳定且节省时间。

4.2 海浪模型验证

以长江口 2 个典型水文站的波浪过程为例,3 个典型台风路径下,牛皮礁站和长江口站的波高和周期验证情况见图 7 和图 8。

由图 7 和图 8 可见,SWAN 模型计算的台风浪过程与实测基本吻合,其计算结果能够较好地代表长江口水域在台风期间的波况。

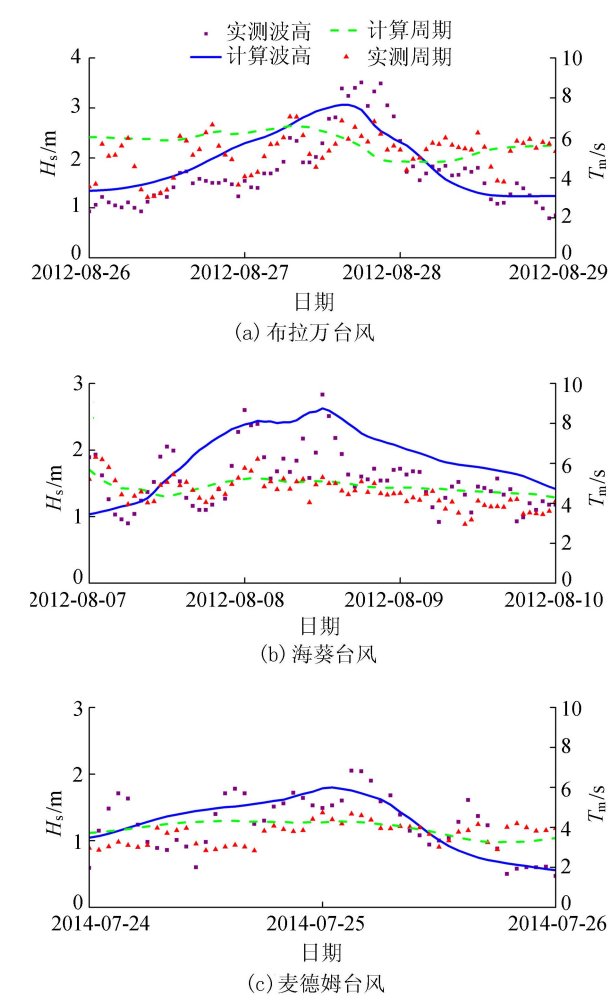


图 7 牛皮礁站波况过程验证

Fig. 7 Validations of wave conditions in NPIJ Sites

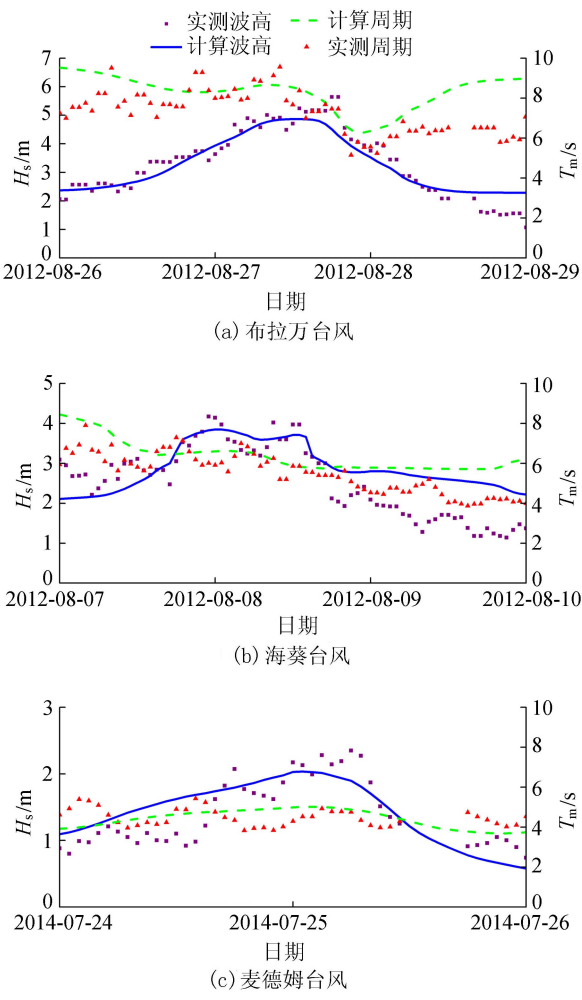


图 8 长江口站波况过程验证

Fig. 8 Validations of wave conditions in CJK Sites

4.3 波能时序分布

根据数值计算,3 个台风情况下,长江口站波能与牛皮礁站波能沿时间序列的分布见图 9。

由图 9 可以看出,尽管“海葵”台风与“布拉万”台风在长江口气象站的风速相近,均为 18 m/s 左右,但其在长江口形成的波能较小。上述现象的原因是南侧登陆台风在嵊泗东部海域波高较大,但受东南侧嵊泗列岛的遮蔽,其产生的 SE 向浪在向长江口水域传播过程中波能衰减明显。

根据上述研究,强度相近的台风,路径在东侧过境的台风更容易在长江口产生较大的波能并进一步诱导骤淤的产生。根据长江口航道管理局统计的数据,自 2010 年以来,引发骤淤的台风多数为东侧过境台风,部分由东侧过境台风与其他路径台风叠加影响,此与本文的研究结论相吻合,见图 10。

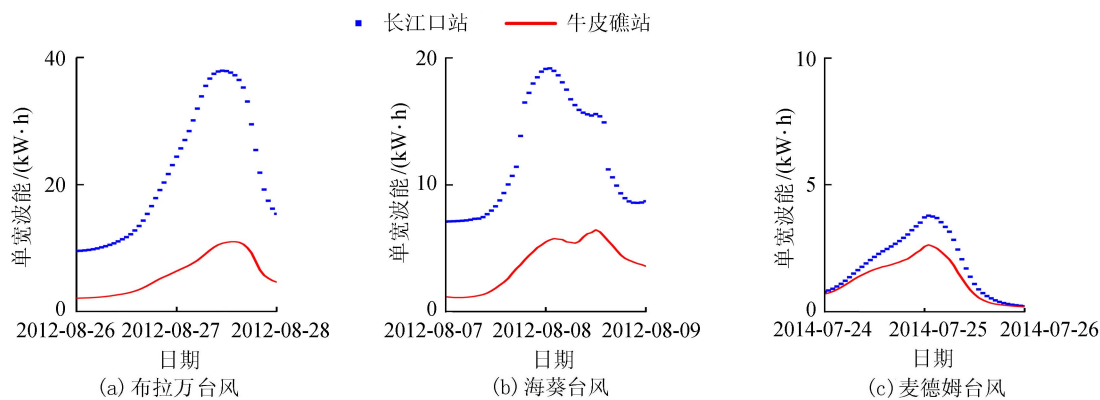


图 9 牛皮礁站和长江口站波能变化特征

Fig.9 Characteristics of wave energy changes during three typical typhoons(NPJ and CJK Sites)

5 结 语

- a. 北槽口内牛皮礁站的波能与骤淤存在相关性。
 - b. 基于经验风场和 CFSR 风场的耦合数据,构建了 3 种典型路径的台风风场,并采用 SWAN 模型模拟了长江口的波浪场,研究结果表明该方法能够较好地复演长江口水域台风期间的波况。
 - c. 研究表明长江口东侧海域过境台风更有可能造成北槽波能集中,为影响骤淤的典型天气过程,数值计算结果与实测结果相吻合。
- 需要指出,本文针对的是汛期台风期间的骤淤与气象过程的相关性分析。而在历史上,寒潮大风期间,长江口深水航道也发生过偶然性骤淤现象,2010—2015 年间共发生 2 次。寒潮大风引起的骤淤和台风期间的骤淤从空间分布至诱发机制上均可能存在差异,本文没有统计在内,今后将深入研究。

参考文献:

[1] 赵德招,刘杰,吴华林. 近十年来台风诱发长江口航道骤淤的初步分析[J]. 泥沙研究,2012,37(2):54-60. (ZHAO Dezhaoh, LIU Jie, WU Hualin. Preliminary analysis of typhoon-induced sudden sedimentation in navigation channel in Yangtze Estuary over last decade[J]. Journal of Sediment Research, 2012,37(2):54-60. (in Chinese))

[2] 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, 20(3): 69-75. (YANG Shilun, DING Pingxing, ZHAO Qingying. Morphodynamic response of a large river mouth to typhoons[J]. The Ocean Engineering,2002, 20(3): 69-75. (in Chinese))

[3] 张志忠,阮文杰,蒋国俊. 长江口动水絮凝沉降与拦门沙淤积的关系[J]. 海洋与湖沼,1995,26(6): 632-638. (ZHANG Zhizhong, RUAN Wenjie, JIANG Guojun. The relationship between flocculating settlement in flowing water and deposition in the Changjiang River Estuary Mouth Bar Area[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica,1995,26(6): 632-638. (in Chinese))

[4] 孔令双,戚定满,曹祖德,等. 长江口航道淤积三层模式的建立与应用[J]. 泥沙研究,2010,36(3): 1-8. (KONG Lingshuang, QI Dingman, CAO Zude, et al. Three-layer model for sedimentation in the deep navigation channel of the Yangtze Estuary[J]. Journal of Sediment Research,2010,36(3): 1-8. (in Chinese))

[5] 刘猛,吴华林,李为华,等. 长江口北槽南导堤越堤输沙运动的时空变化特征研究[J]. 海洋学报(中文版), 2013,35(2): 161-167. (LIU Meng, WU Hualin, LI Weihua, et al. The temporal and spatial variations of sediment flux overtopping the South Leading Jetty in the North Passage of the Changjiang Estuary[J]. Acta Oceanologica Sinica,2013,35(2): 161-167. (in Chinese))

[6] 侯志强,杨华. 黄骅港外航道骤淤分析[J]. 水道港口,2004(4): 213-215. (HOU Zhiqiang, YANG Hua. Analysis of sudden siltation of outer channel of Huanghua Harbor[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2004(4): 213-215. (in Chinese))

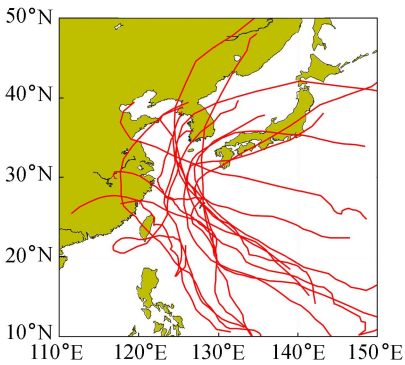


图 10 引起长江口明显骤淤的台风路径(2010 年后)

Fig.10 Paths of typhoons inducing sudden siltation in Yangzi Estuary (after 2010)

- [7] 罗肇森. 大风期黄骅港外航道的骤淤估算及防淤减淤措施探讨[J]. 水运工程, 2004(10): 69-73. (LUO Zhaosen. Estimation of sudden sedimentation in outer channel of Huanghua Port during rough climate and measures for reduction of sedimentation[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(10): 69-73. (in Chinese))
- [8] 曹祖德. 日本熊本港的淤积分析[J]. 港口工程, 1990(3): 28-36. (CAO Zude. Deposition analysis of Kumamoto Harbor in Japan[J]. Harbour Engineering, 1990(3): 28-36. (in Chinese))
- [9] 罗肇森. 波、流共同作用下的近底泥沙输移及航道骤淤预报[J]. 泥沙研究, 2004, 30(6): 1-9. (LUO Zhaosen. Sediment transport under the coexisting action of waves and currents and the prediction of sudden sedimentation in navigation channel[J]. Journal of Sediment Research, 2004, 30(6): 1-9. (in Chinese))
- [10] 徐福敏, 张长宽. 台风浪对长江口深水航道骤淤的影响研究[J]. 水动力学研究与进展, 2004, 19(2): 137-143. (XU Fumin, ZHANG Changkuan. Study of the effect of storm waves on the rapid deposition of the Yangtze River Estuary channel[J]. Journal of Hydrodynamics, 2004, 19(2): 137-143. (in Chinese))
- [11] 刘猛, 李为华. 长江口北槽深水航道回淤量变化宏观动力原因分析[J]. 水运工程, 2013(3): 129-139. (LIU Meng, LI Weihua. Analysis of dynamic reasons for change of back silting amount in deepwater channel project at north passage of the Yangtze estuary[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(3): 129-139. (in Chinese))
- [12] 白志刚, 魏茂兴. 基于时域模型的一种新的波浪能计算方法[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2014, 47(6): 491-497. (BAI Zhigang, WEI Maoxing. A new method for calculating wave power based on time domain model[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2014, 47(6): 491-497. (in Chinese))
- [13] 王喜年, 尹庆江, 张保明. 中国海台风风暴潮预报模式的研究与应用[J]. 水科学进展, 1991, 2(1): 1-10. (WANG Xinian, YIN Qingjiang, ZHANG Baoming. Research and application of a forecasting model of typhoon surges in China Seas[J]. Advances in Water Science, 1991, 2(1): 1-10. (in Chinese))
- [14] ZHANG L, KUMAR A, WANG W. Influence of changes in observations on precipitation: a case study for the climate forecast system reanalysis (CFSR)[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2012, 117(D8): 393-407.
- [15] HODGES K I, LEE R W, BENGTSSON L. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalyses ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25[J]. Journal of Climate, 2011, 24(18): 4888-4906.
- [16] 邱大洪. 工程水文学[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [17] 贾晓, 潘军宁, BARDUR Niclasen. SWAN 模型风能输入项的改进与验证[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(5): 585-591. (JIA Xiao, PAN Junning, BARDUR Niclasen. Improvement and validation of wind energy input in SWAN model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(5): 585-591. (in Chinese))
- [18] 李永博, 吴克俭, 毕凡, 等. 基于 SWAN 模式的成山头海域波浪能资源评估[J]. 海洋湖沼通报, 2013(3): 1-9. (LI Yongbo, WU Kejian, BI Fan, et al. Wave energy resources assessment in the Chenshan Cape Sea during the last 20 years by using SWAN model[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2013(3): 1-9. (in Chinese))
- [19] 宗芳伊, 魏来, 吴克俭. 基于 SWAN 模式的 2 种网格对嵎泗海域海浪模拟的比较研究[J]. 海洋湖沼通报, 2014(4): 10-18. (ZONG Fangyi, WEI Lai, WU Kejian. Research on wave simulation comparisons of Shensi Waters based on two kinds of grids using SWAN wave model[J]. Transaction of Oceanology and Limnology, 2014(4): 10-18. (in Chinese))
- [20] 胡克林, 丁平兴, 朱首贤, 等. 长江口附近海域台风浪的数值模拟: 以鹿沙台风和森拉克台风为例[J]. 海洋学报, 2004, 26(5): 23-33. (HU Kelin, DING Pingxing, ZHU Shouxian, et al. Numerical simulation of typhoon around the waters of the Changjiang Estuary: a case study of Typhoon Rusa and Typhoon Sinlaku[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2004, 26(5): 23-33. (in Chinese))