

# 江苏沿海台风暴潮过程中的波浪增水分布研究

谭家辉<sup>1</sup>, 潘毅<sup>1</sup>, 于普兵<sup>2</sup>, 陈永平<sup>1</sup>

(1. 河海大学 港口、海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江水利科学研究院, 浙江 杭州 310020)

**摘 要:** 基于浅水方程和第三代波浪模型, 构建了江苏沿海的风暴潮和台风浪耦合模型, 并通过天文潮、风暴潮和台风浪的模拟对模型进行验证。通过比较6场典型台风过程中江苏沿海的波浪增水特征, 剖析了江苏沿海波浪增水的量级及空间分布特征。研究表明: 受岸滩地形控制, 不同台风暴潮期间江苏沿海最大波浪增水分布呈现类似特征, 总体上, 江苏中部和南部沿海及近海浅滩波浪最大增水较为显著, 可达0.2 m以上; 由于波生流会受岸线地形影响, 岸线凹陷处较易产生更大的波浪增水, 个别地区最大波浪增水高于0.4 m。

**关键词:** 江苏沿海; 风暴潮; 波浪增水; 台风

**中图分类号:** P731.23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0048-08

## 1 引言

风暴潮指强烈的大气扰动(如强风和气压骤变)所导致的海水异常升降的现象。风暴潮灾害位居海洋灾害之首, 对沿海地区人民的生命财产安全造成巨大威胁。风暴潮受到径流、台风、波浪和天文潮等多要素影响, 其中波浪是风暴潮的重要致灾因素。波浪通过辐射应力作用于潮流, 影响其水位及流场结构, 其量级虽不大但也不可以忽略, 因此, 考虑潮波相互作用的模型已经广泛运用于风暴潮数值模拟中<sup>[1]</sup>。江苏拥有长达954 km的海岸线, 其中包括了南黄海辐射沙脊群这一特殊地形。波浪对风暴潮的影响程度受控于岸线地形, 研究台风期间波浪对江苏沿海风暴潮的影响十分必要。

学者们在20世纪80年代就对风暴潮过程中的波浪增水做了研究<sup>[2]</sup>。针对杭州湾, 郑立松<sup>[3]</sup>比较了波流耦合计算所得水位与无波浪影响时的水位差异, 指出波浪通过辐射应力的大小和方向影响风暴

潮水位。针对渤海湾, 有研究表明该海域波浪增水最大可达到0.3 m<sup>[4]</sup>。长江口的波浪增水作用相较于我国东南沿海区域更大, 最大可达0.3 m<sup>[5]</sup>, 如1109号台风“梅花”对长江口近岸破波带的波浪增水总体在0.1~0.18 m<sup>[6]</sup>。通过对台风“莫拉克”的模拟分析, Yu等<sup>[7]</sup>指出, 波浪增水最大可贡献风暴潮增水的24%。Wang等<sup>[8]</sup>则运用数值模型对东中国海两场典型台风的波浪增水进行分析, 得到不同风暴潮过程中最大波浪增水区域接近, 最大波浪增水发生在风暴潮来临之前的结论, 并指出最大波浪增水受海床隆起和波浪传播方向的影响。

现有波浪增水的研究多针对单场台风进行, 缺少对波浪增水的通用性分析, 且缺少对江苏沿海区域波浪增水的规律认知。本文通过数值模拟方法, 模拟了6场影响江苏沿海的典型台风过程, 分析了江苏沿海台风暴潮期间波浪增水的量级和空间分布特征, 并对不同台风路径产生的波生流进行分析, 给出定量结论, 为江苏沿海的防洪减灾预警预报工作提供参考。

收稿日期: 2021-01-08; 修回日期: 2021-03-29。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979098); 江苏省海洋科技创新专项(HY2019-1)。

作者简介: 谭家辉(1997-), 男, 硕士, 主要从事海岸水动力研究。E-mail: 377319299@qq.com

通讯作者: 潘毅(1985-), 男, 教授, 博士, 主要从事海岸防灾研究。E-mail: panyi@hhu.edu.cn

## 2 模型与方法

风暴潮模型基于高级环流模型(ADvanced CIRCulation model, ADCIRC)<sup>[9]</sup>构建,波浪模型基于近岸波浪模型(Simulating WAVes Nearshore, SWAN)<sup>[10]</sup>构建,二者通过交换水位、流速和辐射应力进行耦合,并通过对天文潮和风暴潮过程的复演,对模型进行验证。

### 2.1 模型建立

ADCIRC利用有限元法求解雷诺平均的纳维-斯托克斯(Reynolds - Averaged Navier-Stokes, RANS)方程,由美国北卡罗来纳大学教堂山分校等8所高校和研究机构共同开发。SWAN模型由代尔夫特理工大学开发,是基于波作用平衡方程开发的第三代波浪数值模型,能准确地模拟复杂的潮流、地形和风场环境下的波浪场,全面考虑波浪的折射、反射、底摩擦、破碎、白浪、增水及非线性作用等现象。两者耦合后,成为解决天文潮、风暴潮和台风浪问题最好的方法之一,广泛用于风暴潮和台风浪的模拟,如王培涛等<sup>[11]</sup>基于ADCIRC模型对影响福建沿海及台湾海峡海域的8次风暴潮过程进行了数值模拟,韩雪等<sup>[12]</sup>等利用ADCIRC模式对江苏沿海的单次风暴潮过程进行了模拟预报。

本文基于三角形非结构网格进行计算(见图1),共有16 822个单元,8 800个节点,从辐射沙脊地

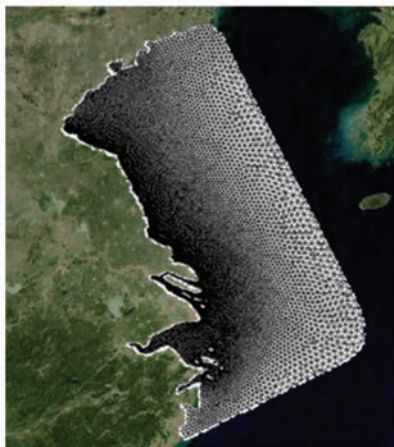


图1 计算网格

Fig.1 Computational grid

区到外海逐渐稀疏。外海的潮位边界取自托派克斯/波塞冬全球潮汐模型(TOPEX / POSEIDON global tidal model, TPXO)7.2数据库,使用10个分潮(M2、S2、N2、K2、K1、O1、P1、Q1、MF和MM)进行计算。风场驱动采用Holland风场模式,根据实测台风路径计算风场并驱动模型。

### 2.2 模型验证

为了验证模型的准确性,本文分别对模型区域内的天文潮大潮、历史台风风暴潮以及波浪成长过程进行验证。验证天文潮潮位资料取自江苏近海洋综合调查(“908”专项)中2006年8月和9月大小潮期间的实测水文资料。验证台风风暴潮潮位资料取自2012年8月台风“达维”(1210)期间的连云港和青岛海洋站。验证波高资料取自台风“达维”(1210)期间的响水水文站,测点位置见图2。

大潮期间(2006年8月24—25日)的潮位验证如图3所示。图中可以看到模拟结果与实测值吻合良好。台风“达维”(1210)期间的潮位验证如图4所示,图中可以看到模拟结果与实测值吻合良好。台风“达维”(1210)期间响水站波高过程的模拟值和实测值绘制于图5,可以看到台风浪过程的模拟结果较好,捕捉到了风浪增长过程。

### 2.3 模拟方案

使用上述非耦合模式(风暴潮模型)与耦合模

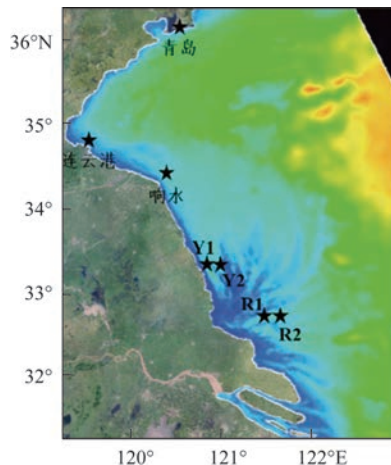


图2 天文潮和风暴潮验证点位置

Fig.2 Stations for the model verification of astronomical tide and storm surge

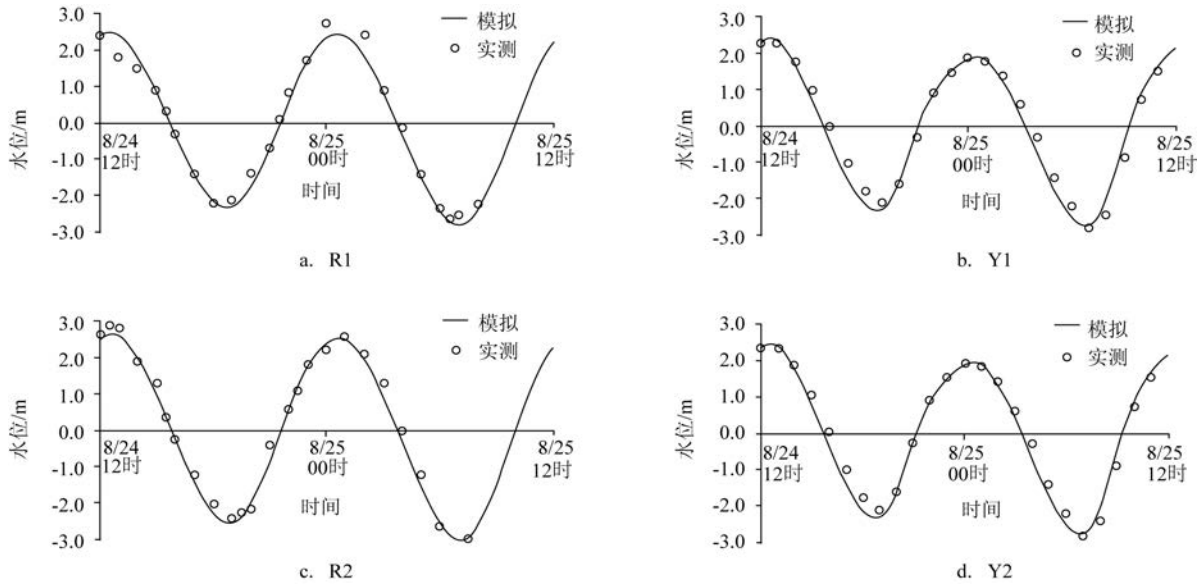


图3 天文潮大潮(2006年8月24—25日)验证(北京时,下同)

Fig.3 Verification of the spring tides of astronomical tide (8.24-8.25, 2006, CST, similarly hereinafter)

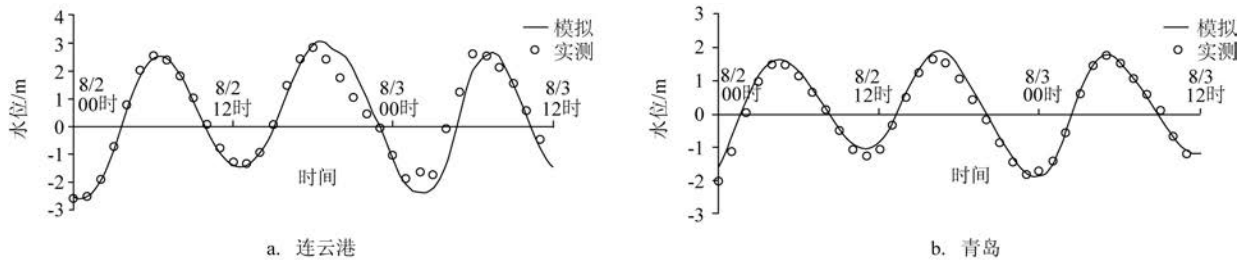


图4 台风“达维”(1210)期间的潮位验证

Fig.4 Tidal level verification during typhoon "Damrey" (1210)

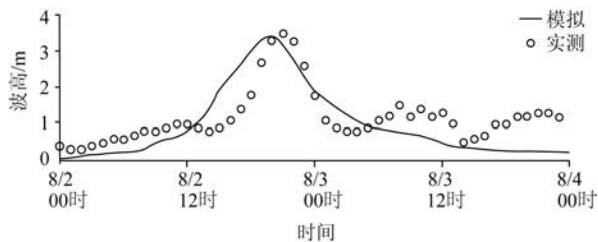


图5 台风“达维”(1210)期间响水站波高验证

Fig.5 Verification of wave height at Xiangshui Station during typhoon "damrey" (1210)

式(风暴潮和台风浪耦合模型)分别模拟了0807号台风“海鸥”、1210号台风“达维”、1416号台风“凤凰”、1509号台风“灿鸿”、1810号台风“安比”和1909号台风“利奇马”6个近年来影响江苏沿海的台风过

程。对比分析两种模式的计算结果,可以得知潮流相互作用影响,并以此分析波浪增水的时空分布以及波浪增水、波生流与台风路径之间的联系。

### 3 风暴潮过程中的波浪增水与波生流

#### 3.1 波浪增水时空分布特征

为了研究波浪增水对江苏沿海不同位置的影响,本文在江苏沿岸、沙脊以及潮沟上选取代表测点,测点位置如图6所示。沿岸选取LS01、LS02、LS03、LS05和LS06,沙脊选取Rb01、Rd05、Re04、Rg01和Ri01,潮沟选取Ca01、Cf04、Cg01、Ci01和Cm01作为典型测点。



台风期间江苏沿海波浪增水总体较小。为了更直观地反映波浪增水的空间分布特征,将模拟的6场台风过程中的单场台风最大波浪增水及台风路径分别绘制于图7。如图所示,各场台风的波浪增

水的分布和量级并不完全一致,但最大波浪增水总体分布呈规律性,波浪增水主要集中在南黄海辐射沙脊群,最大增水可达到0.3 m及以上。少数场次台风在连云港沿海也有较明显的增水,可达到0.15 m。其余沿海地区波浪增水不明显。

统计这6场台风,将其造成的最大波浪增水绘制于图8。波浪增水主要出现在南黄海辐射沙脊,最大区域在0.3 m以上。沿岸其他区域也有部分海域最大波浪增水在0.3 m以上,但较为分散。

将6场台风过程中典型测点处的最大波浪增水绘制于图9,具体数值如表1所示。

综上所述,在模拟的各场台风过程中,各测点处波浪增水特征各异,这是由波浪传播方向、波浪破碎和波高梯度变化引起的。从空间位置来看,近岸潮沟的波浪增水变化最为显著,最大可达到0.4 m,离岸较远的潮沟增水变化十分微弱,沿岸及沙脊处增水变化不明显,这是由于波浪在浅水中更容易破碎,从而形成显著的波浪增水。

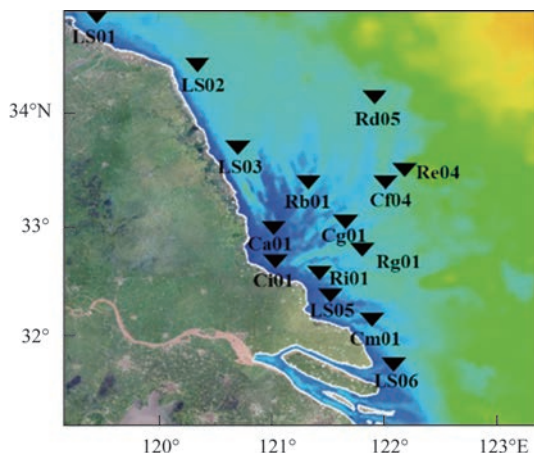


图6 波浪增水测点位置

Fig.6 Observation points of wave-induced setup

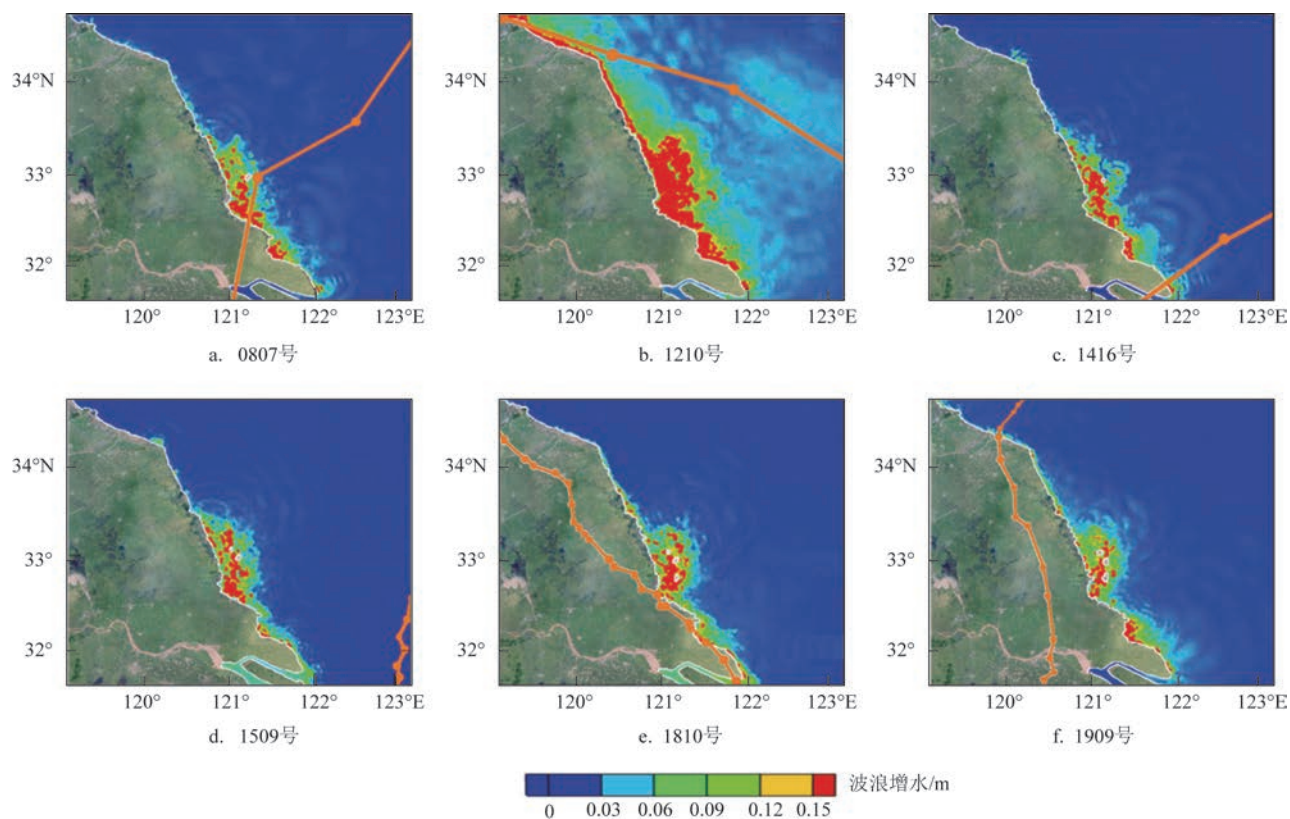


图7 最大波浪增水分布图

Fig.7 Distribution of maximum wave-induced setup

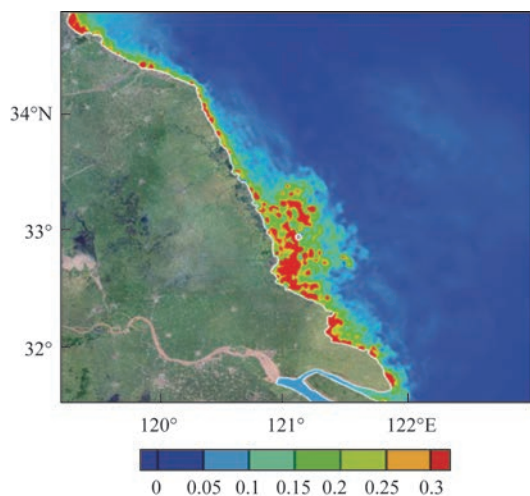


图8 全台风过程中最大波浪增水分布(单位:m)

Fig.8 Distribution of maximum wave-induced setup during all typhoon processes(unit:m)

表1 各测点波浪增水

Table 1 Wave-induced setup of all observation points

测点	最大波浪增水/m	平均波浪增水/m
LS01	0.066	0.004
LS02	0.046	0.003
LS03	0.079	0.008
LS05	0.197	0.012
LS06	0.096	0.006
Rb01	0.101	0.007
Rd05	0.022	0.003
Re04	0.042	0.003
Rg01	0.043	0.006
Ri01	0.066	0.006
Ca01	0.385	0.037
Cf04	0.037	0.003
Cg01	0.064	0.006
Ci01	0.480	0.042
Cm01	0.059	0.006

### 3.2 波浪增水与台风路径关系

影响江苏沿海的台风路径种类繁多,但总的来说可以分为3类:类型一在浙江或上海地区登陆后向东北方向前进,进入黄海,如0807号、1416号和

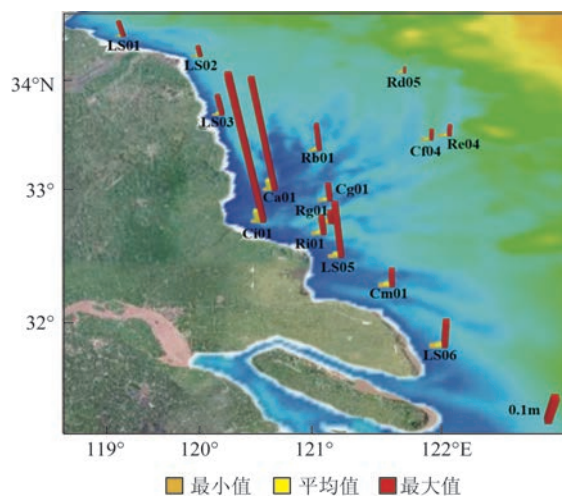


图9 各测点最大波浪增水特征

Fig.9 Maximum wave-induced setup at observation points

1509号台风;类型二在浙江或上海地区登陆后向正北或西北方向前进,如1810号和1909号台风;类型三从东海沿西北方向直接在江苏省北部沿海登陆,如1210号台风,此种台风相对较少,但其波浪增水影响较为显著。

这3种台风路径给江苏沿海带来的波浪增水影响也有着各自鲜明的特点(见图7)。类型一在江苏南部沿海附近有较为明显的条带状波浪增水带,在南黄海辐射沙脊群有大片0.2 m波浪增水区域;南北方向波浪增水区域较长,对江苏中部沿海有部分影响,存在0.1 m不到的波浪增水区域。类型二在江苏南部沿海则呈现团状波浪增水区域,在南黄海辐射沙脊群有小片0.2 m波浪增水区域;南北方向波浪增水区域较小,对江苏中部沿海影响很小。类型三对江苏整体沿岸都有较强影响,南黄海辐射沙脊群几乎全部存在0.15 m的最大波浪增水,对于风暴增水有着非常大的贡献;整个江苏沿岸同样出现0.15 m以上的最大波浪增水区域,特别是在江苏北部沿岸会造成比其他两类台风更大的增水影响,这种类型台风发生的波浪增水量级和范围都较大,在风暴潮预警预报中需要引起重视。

综合来看,受地形影响,江苏南部沿海和辐射沙脊群的波浪增水较为显著,在所有影响江苏沿海的台风风暴潮作用下都可能出现0.2 m及以上的波浪增水,江苏中部沿海在正北及西北向台风作用下会

出现明显的波浪增水影响,而江苏北部沿海在类型三台风发生时会出现明显的波浪增水。

### 3.3 波生流与台风路径关系

将耦合模型与非耦合模型计算出的流速矢量相减,得到波生流。通过观察不同台风路径下的波生流分布,得到台风路径对波生流的影响。分别取 0807 号、1909 号和 1210 号 3 场台风作为上述 3 类台风代表,将最大波生流时刻的波生流场绘制成图 10。图中云图表示波浪增水大小,矢量图标出流速方向,波速大小与图例成比例。类型一波生流区域主要在江苏南部沿海及南黄海辐射沙脊群,最大波生流时刻流速皆指南黄海辐射沙脊群近岸侧,造成 0.3 m 以上的波浪增水;类型二波生流分布在江苏中南部沿海一侧,区域狭长,其中在江苏中部地区流速指南黄海辐射沙脊群时,对该地区造成

0.05 m 以上的波浪增水;类型三波生流主要分布在江苏北部沿海,波生流指向北部沿海一侧时对该地区造成最大 0.15 m 以上的波浪增水。

综合来看,台风登陆点附近通常会产生较大的向岸波生流,在最大波生流时刻,波生流聚集的区域会造成较大的波浪增水,波生流也会受到岸线地形的影响,岸线凹陷处更易产生较大的波浪增水。

## 4 结论

基于江苏沿海风暴潮-台风浪数值模型,对近年来影响江苏沿海的 6 场风暴潮过程进行模拟,对比单一风暴潮模型和耦合模型模拟结果,剖析了江苏沿海的波浪增水及波生流分布特征。主要结论如下:

(1)不同台风风暴潮期间江苏沿海最大波浪增水

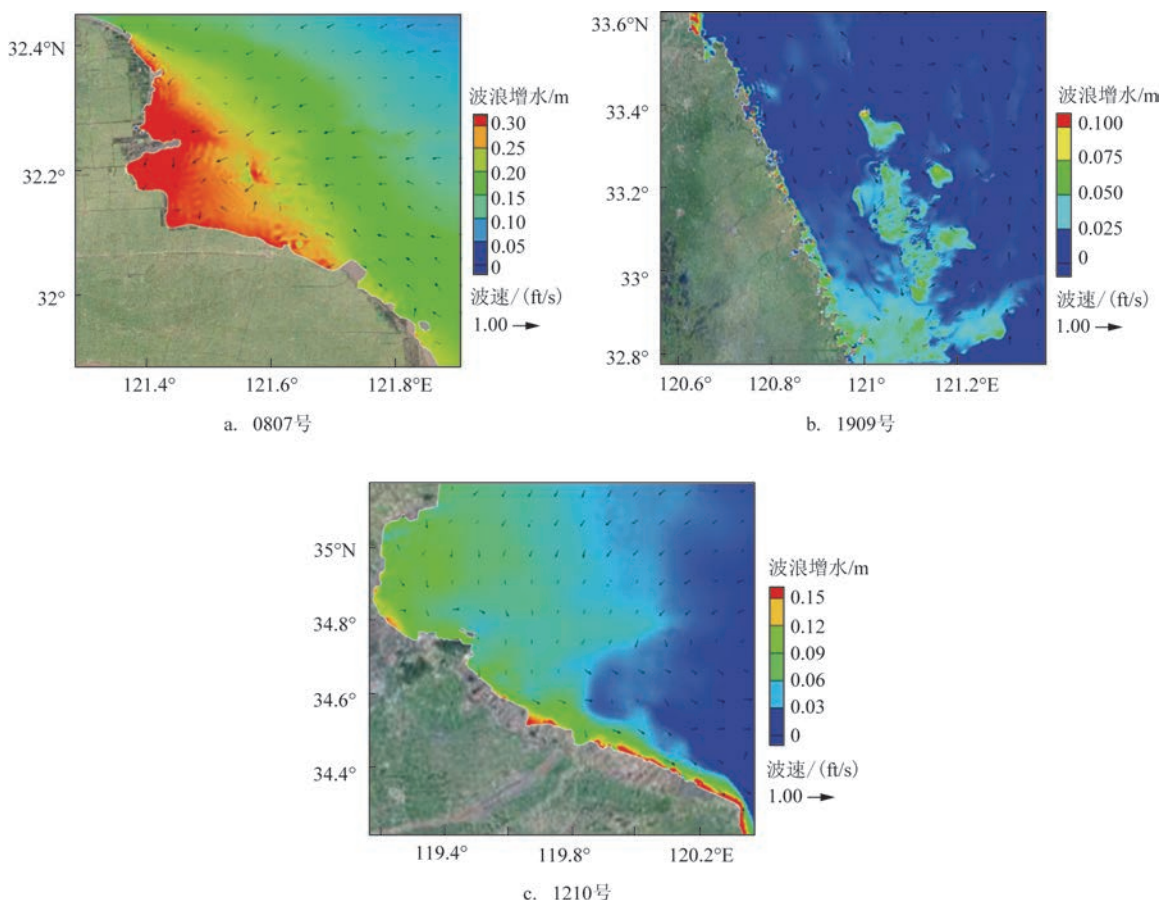


图 10 3 类台风最大波生流分布图

Fig.10 Maximum wave-generated current of three types of typhoons



发生的总体分布规律接近,台风期间波浪增水主要分布于辐射沙脊和连云港沿海,辐射沙脊地区最大波浪增水可达0.4 m,由浅水至深水递减;江苏中部和北部岸段波浪增水通常不大于0.2 m。

(2)波浪增水受地形影响显著。江苏中部和南部沿海的辐射沙脊和浅滩区域台风期间波浪增水明显,在风暴潮防灾减灾工作中需要予以考虑。

(3)波浪增水与台风路径密切相关。多数影响江苏沿海的台风暴潮期间的波浪增水主要分布在江苏中部和南部沿海,但当台风在江苏北部登陆时(如台风“达维”),会在整个江苏沿海引起明显的波浪增水。

(4)台风登陆点附近通常会产生较大的向岸波生流,波生流也会受到岸线地形的影响,使得岸线凹陷处更易产生较大的波浪增水。

#### 参考文献:

- [1] Dietrich J C, Zijlema M, Westerink J J, et al. Modeling hurricane waves and storm surge using integrally-coupled, scalable computations[J]. Coastal Engineering, 2011, 58(1): 45-65.
- [2] Wolf J, Hubbert K P, Flather R A. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[R]. Birkenhead: Proudman Oceanographic Laboratory, 1988: 109.
- [3] 郑立松. 风暴潮-天文潮-波浪耦合模型及其在杭州湾的应用[D]. 北京: 清华大学, 2010.  
Zheng L S. Development and application of a numerical model coupling storm surge, tide and wind wave[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.
- [4] 金正华, 王涛, 尹宝树. 浪、潮、风暴潮联合作用下的底应力效应[J]. 海洋与湖沼, 1998, 29(6): 604-610.  
Jin Z H, Wang T, Yin B S. The effect of bottom friction in the process of wave-tide-surge interaction[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1998, 29(6): 604-610.
- [5] 贾岩, 尹宝树, 杨德周. 东中国海波浪相互作用对水位和波高影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(8): 82-86.  
Jia Y, Yin B S, Yang D Z. A numerical study of the influence of wave-current interaction on water elevation and significant wave height in the East China Sea[J]. Marine Sciences, 2009, 33(8): 82-86.
- [6] Xu S D, Yin K, Huang W R, et al. Numerical simulation of typhoon-induced storm surge on the coast of Jiangsu province, China, based on coupled hydrodynamic and wave models[J]. Journal of Southeast University (English Edition), 2014, 30(4): 489-494.
- [7] Yu X L, Pan W R, Zheng X J, et al. Effects of wave-current interaction on storm surge in the Taiwan Strait: insights from Typhoon Morakot[J]. Continental Shelf Research, 2017, 146: 47-57.
- [8] Wang K, Hou Y J, Li S Q, et al. A comparative study of storm surge and wave setup in the East China Sea between two severe weather events[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 235: 106583.
- [9] Westerink J J, Luettich Jr R A, Blain C A, et al. ADCIRC: an advanced three-dimensional circulation model for shelves, coasts, and estuaries[R]. Report 2. User's Manual for ADCIRC-2DDI, Vicksburg: U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1994.
- [10] Booij N, Ris R C, Holthuijsen L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [11] 王培涛, 于福江, 刘秋兴, 等. 福建沿海精细化台风风暴潮集合数值预报技术研究及应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(5): 7-15.  
Wang P T, Yu F J, Liu Q X, et al. Study of refined ensemble numerical typhoon surge forecast technology for Fujian coast[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(5): 7-15.
- [12] 韩雪, 盛建明, 罗锋, 等. 1210号台风“达维”风暴潮分析与数值模拟[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(27): 9448-9451.  
Han X, Sheng J M, Luo F, et al. Analysis and numerical simulation of the storm surge caused by typhoon No. 1210 "Damrey"[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2014, 42(27): 9448-9451.

## Study on the distribution of wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province during typhoon processes

TAN Jiahui<sup>1</sup>, PAN Yi<sup>1</sup>, YU Pubing<sup>2</sup>, CHEN Yongping<sup>1</sup>

(1. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Jiangsu 210098 China; 2. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020 China)

**Abstract:** Based on the shallow water equation and the third-generation wave model, a coupled model is set up to simulate storm surge and typhoon waves along the coast of Jiangsu Province. The model is verified by comparing the simulated and measured astronomical tidal, storm surge and typhoon waves. By comparing the characteristics of wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province during six typical typhoon processes, the magnitude and spatial distribution of wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province are analyzed. The results show that the distribution patterns of the maximum wave-induced setup along the coast of Jiangsu Province during different storm surge processes are similar under the control of nearshore bathymetry. In general, the maximum wave-induced setup is significant in the coastal and offshore shoals of central and southern Jiangsu Province with the maximum setup over 0.2 m. Larger wave-induced setup with the maximum value over 0.4 m is more likely to occur in the area with concaved shorelines due to the influence of shoreline topography on wave-generated current.

**Key words:** the coast of Jiangsu Province; storm surge; wave-induced setup; typhoon