

文章编号:1005-9865(2023)05-0081-11

“烟花”台风影响下长江口水域波浪分布特征研究

刘华帅, 杨 汜, 王红川

(南京水利科学研究院 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 台风往往会带来强风、大浪、风暴潮。强潮大浪给长江口深水航道整治工程的维护带来挑战。构建了覆盖中国海的台风浪—风暴潮耦合数学模型,模拟了台风“烟花”作用下长江口北槽水域波浪的发展过程,分析了长江口北槽水域波浪分布特点和台风强度。研究表明:叠加风场和潮汐模式共同驱动的台风浪—风暴潮耦合模型,可以准确模拟台风期间长江口水域波浪的生成和发展过程;“烟花”台风期间,外海大浪以东方向浪为主,长江口北槽南挡沙堤沿线有效波高最大值介于 1.61~5.22 m 之间,自东向西逐渐衰减;台风过程中,长江口北槽水域有效波高在台风二次登录时刻达到最大,口门处有 5.0 m 以上大浪;依据台风过程中长江口风速及外海波高、周期与参考规范值对比分析得出,“烟花”台风过程波浪强度约为 50 年一遇。

关键词: 长江口;“烟花”台风;台风浪—风暴潮耦合;波浪分布

中图分类号:P731.2;TV139.2 文献标志码:A DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2023.05.008

Wave distribution characteristics of Yangtze Estuary under the influence of typhoon In-Fa

LIU Huashuai, YANG Fan, WANG Hongchuan

(The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Typhoons often bring strong winds, big waves and storm surges, which pose challenges to the maintenance of the deep-water channel in the Yangtze Estuary. In order to explore the influence of Typhoon In-Fa on the north passage of the Yangtze Estuary, a mathematical model of wave-storm surge coupling covering the China Sea was constructed. The development process of waves in the north passage of the Yangtze Estuary under the typhoon In-Fa was simulated, and the wave distribution characteristics and intensity were analyzed. The research shows that the coupled model driven by the superimposed wind field and tidal model can accurately simulate the generation and development of waves in the Yangtze Estuary during typhoons. During typhoon processes, the big waves in the open sea were mainly eastward waves, and the maximum significant wave height along the south sand barrier of the north passage of the Yangtze Estuary was between 1.61 and 5.22 m, and gradually decayed from east to west. During the processes of In-Fa, the significant wave height in the north passage of the Yangtze Estuary reached its maximum at the time of the typhoon's second landing, and there were large waves of more than 5.0 m at the entrance. According to the comparative analysis of the wind speed at the Yangtze Estuary and the wave height and period in the open sea during the typhoon process, it is concluded that the wave intensity of the In-Fa was about once in 50 years.

Keywords: Yangtze Estuary; typhoon In-Fa; wave storm surge coupling; wave distribution

长江口地处太平洋西岸,平均每年有 2~3 个台风对长江口及其邻近水域产生影响,最多一年可达 5~6

收稿日期:2022-10-26

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2600700)

作者简介:刘华帅(1993—),男,山东菏泽人,主要从事波浪分布及波浪数值模拟研究。E-mail:luhuashuai@126.com

通信作者:杨 汜(1987—),男,江苏南京人,主要从事波浪数值计算方面研究。E-mail:fyang@nhri.cn

个^[1]。台风引起的大浪,常常造成风暴潮、河口海岸侵蚀和航道骤淤,造成重大经济损失^[2]。长江口地形复杂,“三级分汊、四口入海”的地形使得潮(天文潮和风暴潮)和波浪间的相互作用更加复杂,了解台风作用下波浪和风暴潮之间的相互作用对长江口水域波浪和风暴潮的预报有重要意义。

波浪在传播过程中,一方面会引起风暴潮位的变化,另一方面会产生波生流;同时,风暴潮也会引起波浪发生变形。因此,为了对风暴潮和波浪实际过程进行精准模拟,在模型中考虑波浪和风暴潮的耦合作用是十分必要的。Longuet-Higgins 和 Stewart^[3]提出的辐射应力概念很好地解释了波浪增减水和波生流现象,为波浪风暴潮耦合的建立提供了理论基础。

波浪和风暴潮相互作用的数值研究始于1988年^[4],之后众多学者对波浪和潮汐相互作用进行了研究。Tolman^[5]研究了北海天文潮和风暴潮对大陆架风浪的影响,结果表明在北海潮汐和风暴潮对有效波高和平均波周期等波浪参数的调制相对较小,约为5%~10%。尹宝树等^[6]提出了一个波浪和风暴潮潮汐运动相互作用的联合数值模式,对渤海典型天气进行了研究,研究表明,强寒潮过程,风暴潮对波浪的影响起支配作用,弱天气过程,潮汐对波浪影响起主要作用,与实测资料对比,联合模式得出的结果比单独模式更精确。刘永玲等^[7]建立了考虑海浪影响的风暴潮模式,从海表风应力、辐射应力和底应力三方面对海浪、风暴潮的影响进行了数值研究,研究表明海浪通过风应力对风暴潮潮位的影响最为显著,并且考虑海浪影响的风暴潮数值模拟结果比不考虑波浪影响的结果更精确,尤其在减水极值处,与实测值吻合更好。陈华伟等^[8]研究了考虑波浪和不考虑波浪对风暴潮后报结果的影响,结果表明考虑波浪后的模拟效果更精确。郑立松和余锡平^[9]、刘秋兴^[10]等考虑了波浪辐射应力对风暴增水的影响。高佳等^[11]建立了天文潮—风暴潮—海浪耦合模型,计算了超强台风影响下的最高潮位,验证了波浪对风暴潮增水的贡献。魏凯等^[12]构建了强台风作用下的近岸海域波浪—风暴潮耦合数值模型,该模型分析了台风“玛莉亚”作用下台湾海峡及其近岸海域波浪、风暴潮的分布特点。

上述研究从不同方面对风暴潮与波浪之间的相互影响进行了分析,证明了考虑风暴潮和波浪耦合模型在波浪和风暴潮数值模拟中的重要性。2021年第6号台风“烟花”发生时正值农历天文大潮,在长江口水域形成了大浪、高潮,并伴随着风暴潮增水,是近年来对长江口区域有较大影响的典型台风。北槽是长江口的主要入海通道,也是长江口深水航道治理工程的主要整治段,台风大浪期间航道淤积与波高密切相关,波高大、航道淤积严重,长江口深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程实施后,发挥了重要的挡沙作用。为了解“烟花”台风经过时对长江口北槽水域波浪的影响,建立了基于台风浪—风暴潮耦合的波浪数值模型,并运用实测资料对模型合理性进行了验证;计算了“烟花”台风经过长江口北槽水域时的波浪过程;分析了“烟花”台风期间长江口北槽水域的波浪场时空变化以及对应台风强度。

1 模型的建立

1.1 台风风场和气压场

采用台风模型风场与背景风场相结合的方式生成模型的计算风场。

台风模型风场选用 Young 和 Sobey^[13]台风模型风场。基于该模型,距离台风中心 r 处的旋转梯度风速 V_g 可以如下表示:

$$V_g(r) = V_{\max} \left(\frac{r}{R_{\text{mw}}} \right)^7 \exp \left[7 \left(1 - \frac{r}{R_{\text{mw}}} \right) \right], r < R_{\text{mw}} \quad (1)$$

$$V_g(r) = V_{\max} \exp(0.025R_{\text{mw}} + 0.05), r \geq R_{\text{mw}} \quad (2)$$

距离台风中心 r 处的气压由下式给出:

$$p(r) = p_c + (p_n - p_c) \exp \left(-\frac{R_{\text{mw}}}{r} \right) \quad (3)$$

其中,最大风速半径 R_{mw} 及最大风速 V_{\max} 分别由式(4)和式(5)给出:

$$R_{\text{mw}} = 28.52 \tanh [0.0873(\phi - 28)] + 12.22 \exp \left(\frac{p_c - 1013.2}{33.86} \right) + 0.2V_a + 37.2 \quad (4)$$

$$V_{\max} = 6.68(1013.2 - p_c)^{0.634} \quad (5)$$

式中: ϕ 为台风中心纬度; p_c 为台风中心气压; p_n 为台风的外围气压,文中取为1013.2 hPa; V_α 为台风移动速度,可从台风路径资料中获得。

背景风场采用ERA5后报数据集^[14],该数据集为欧洲中期天气预报中心(ECMWF)第五代大气再分析数据集。该数据集提供 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 等间距经纬度分辨率下的大气多层后报结果,再分析采用4D-Var方法同化地面站、卫星及其他区域模型预报结果,使本数据集得以实现时空分辨率上细节的准确后报。

由此,可以将台风模型风场与ERA5背景风场结合如下^[15]:

$$\begin{cases} W_{\text{add}} = W_1 & r < R_1 \\ W_{\text{add}} = (1 - \alpha)W_1 + \alpha W_{\text{era5}} & R_1 \leq r \leq R_2 \\ W_{\text{add}} = W_{\text{era5}} & r > R_2 \end{cases} \quad (6)$$

式中: W_{add} 表示合成风场; W_1 表示模型风场; W_{era5} 表示ERA5背景风场; R_1 、 R_2 分别表示台风风场半径和背景风场半径; $\alpha = (r - R_1)/(R_2 - R_1)$ 。

1.2 台风浪数学模型

采用目前常用的第三代海浪模式SWAN^[16]对研究区域的海浪进行模拟,SWAN海浪模式使用波作用平衡方程,笛卡尔坐标系下的方程形式为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial(C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial(C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial(C_\theta N)}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (7)$$

其中, x 、 y 为地理坐标, t 为时间, N 为波谱密度, σ 为相对波浪频率, θ 为波传播方向, C_x 、 C_y 为波浪沿 x 、 y 方向传播的速度, C_σ 、 C_θ 为波浪在 σ 、 θ 坐标下的传播速度, S 为源汇项,由如下几个过程组成:

$$S = S_{\text{in}} + S_{\text{nl}} + S_{\text{ds}} + S_{\text{bot}} + S_{\text{surf}} \quad (8)$$

式中: S_{in} 为风能输入项; S_{nl} 为非线性波-波相互作用的能量传输; S_{ds} 为波浪白帽耗散造成的能量损失; S_{bot} 为波浪底部摩阻所造成的能量损失; S_{surf} 为波浪破碎所导致的能量损失。

1.3 水动力风暴潮数学模型

基于二维浅水方程建立风暴潮模型,笛卡尔坐标系下的基本方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v})}{\partial y} = hS \quad (9)$$

$$\frac{\partial(h\bar{u})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{u}^2)}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial y} = f\bar{v}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial x} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{lx}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y}\right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{xy}) + hu_s S \quad (10)$$

$$\frac{\partial(h\bar{v})}{\partial t} + \frac{\partial(h\bar{v}\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(h\bar{v}^2)}{\partial y} = f\bar{u}h - gh\frac{\partial\eta}{\partial y} - \frac{h}{\rho_0}\frac{\partial p_a}{\partial y} - \frac{gh^2}{2\rho_0}\frac{\partial\rho}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho_0} - \frac{\tau_{ly}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y}\right) +$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(hT_{yy}) + hv_s S \quad (11)$$

式中: t 为时间; x 、 y 、 z 为笛卡尔坐标系下坐标轴; η 为水面高程; d 为静水位下水深; $h = \eta + d$ 为总水深; u 、 v 为 x 、 y 坐标轴下的流速分量; $f = 2\Omega \sin\phi$ 表示科氏力; g 为重力加速度; ρ 为水的密度; S_{xx} 、 S_{yx} 、 S_{xy} 、 S_{yy} 为波浪辐射应力张量的分量; p_a 为大气压力; ρ_0 为与水的相对密度; S 表示点源汇引起的流量变化; (u_s, v_s) 表示点源汇处相对于当前水体的流速矢量; $\bar{\tau}_b = (\tau_{lx}, \tau_{ly})$ 表示底部摩阻; $\bar{\tau}_s = (\tau_{sx}, \tau_{sy})$ 表示水面的风拖曳力。模型边界采用中国海域潮汐预报软件Chinatide^[17]预报潮位过程驱动。

1.4 台风浪-风暴潮耦合数学模型

海洋中的波动和流动是相互影响的,潮位和流场会影响波浪的传播及破碎位置;波浪传播所产生的辐射应力会影响潮位和流场。因此考虑波浪和风暴潮的耦合过程是很有必要的。

台风作用时,风场同时对潮流、波浪造成影响,台风风场的分布决定式(8)中 S 的风能输入项 S_{in} 、波浪白帽耗散 S_{as} ;同时决定式(10)、(11)中水面的风拖曳力 $\bar{\tau}_s$ 。台风的气压场分布决定式(10)、(11)中大气压力 p_a 。

波浪对潮流的影响,体现在二维浅水方程中波浪破碎、能量损耗引起的辐射应力项 s_{xx}, s_{xy}, s_{yy} ,其具体表示形式如下:

$$s_{xx} = \frac{1}{2} g \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos^2 \left(\frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] E(f, \theta) df d\theta + \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] E(f, \theta) df d\theta \right\} \quad (12)$$

$$s_{xy} = \frac{1}{2} g \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \cos \left(\frac{3}{2} \pi - \theta \right) \sin \left(\frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] E(f, \theta) df d\theta \right\} \quad (13)$$

$$s_{yy} = \frac{1}{2} g \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sin^2 \left(\frac{3}{2} \pi - \theta \right) \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] E(f, \theta) df d\theta + \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \left[1 + \frac{2kd}{\sinh(2kd)} \right] E(f, \theta) df d\theta \right\} \quad (14)$$

式中: k 表示波数; $E(f, \theta)$ 表示波能。

潮流对波浪的影响,主要体现在水面高程 η 变化时总水深 h 对波速、波-波非线性相互作用项 S_{nl} 、底部摩阻项 S_{bot} 、波浪破碎项 S_{surf} 造成影响。

上述耦合过程可以充分考虑波浪对风暴潮的影响以及风暴潮与潮汐之间的非线性关系,这里建立的数值模型主要考虑台风风场和天文潮汐驱动。

2 模型验证

模型使用了双重嵌套的计算网格系统。大范围模型包括整个中国海区域,经度范围为 105°E — 135°E ,纬度范围为 1°N — 45°N ,最大网格尺度为 1° (约120 km),最小网格尺度为 0.05° (约6 km),如图1(a)所示;长江口小范围模型包含长江口及部分近海区域,最大网格尺度为3.5 km,最小网格尺度为50 m,在长江口北槽航道内整治建筑物、围堤附近加密,如图1(b)所示(采用北京54坐标系,下同)。

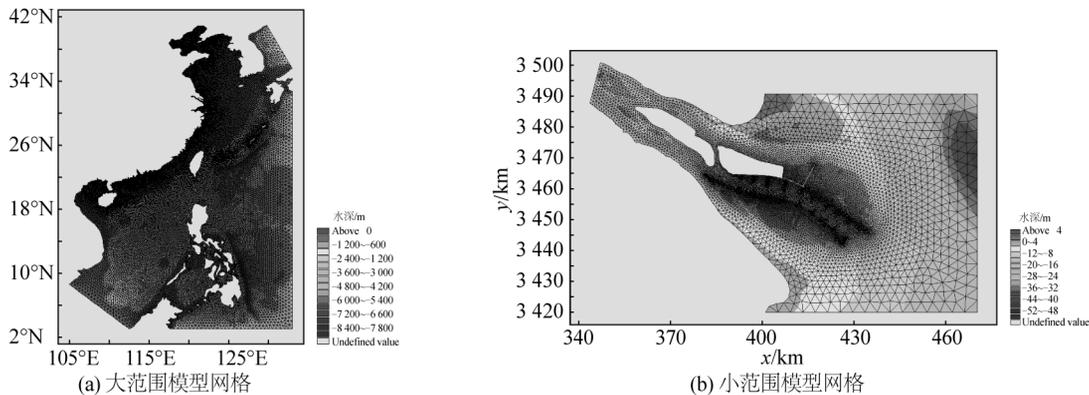


图1 计算区域及网格示意

Fig. 1 Numerical model range and mesh diagram

采用“烟花”台风实测数据来验证所建模型的合理性。2021年第6号台风“烟花”(编号2106)于2021年7月18日02:00在西北太平洋洋面上生成,19日加强为强热带风暴,20日加强为台风,21日加强为强台风,一路向西北方向发展,穿过舟山群岛,于25日12:30前后在浙江舟山普陀沿海登陆,登陆时中心附近最大风力13级(38 m/s),中心附近最低气压965 hPa,之后受地形影响,强度明显减弱。穿过杭州湾后,7月26日09:30前后在浙江省平湖市独山港镇沿海再次登陆,28日02:00时减弱为热带低压,29日09:20进入山东,30日移入渤海时转化为温带气旋,31日登陆辽宁省后消散。

2.1 台风风场模型验证

风场的准确性对于模型的计算起着至关重要的作用,为了验证所构造风场的合理性,收集了嵎山浮标

站、牛皮礁浮标站实测风速资料来验证,验证点位置如图 2 所示。图 3 给出了嵊山浮标站、牛皮礁浮标站实测风速、风向与模型计算结果的对比。从图 3 可以看出,计算值和实测值吻合较好,说明构建的风场模型合理,能重现台风发生过程中的主要气象特征。

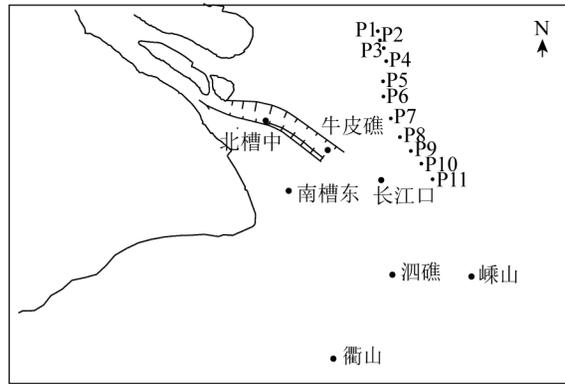


图 2 浮标位置

Fig. 2 The position of bouy

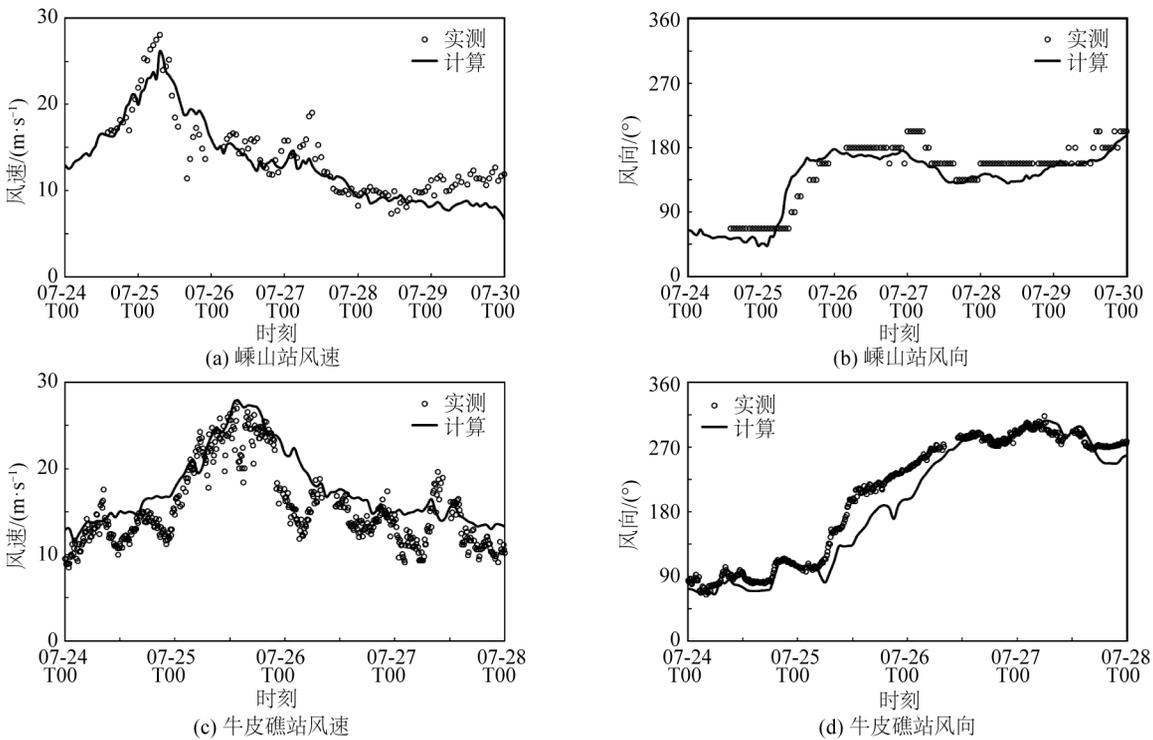


图 3 风速、风向验证

Fig. 3 Comparison of observation and simulation in wind speed and direction

2.2 台风浪和风暴潮耦合模型验证

大范围潮流模型选择泗礁、衢山站 2021 年 7 月 21—30 日实测潮位过程进行验证,小范围潮流模型选择北槽中、南槽东实测潮位资料进行验证,验证点位置图如图 2 所示。实测潮位与计算结果对比如图 4 所示。从图 4 可以看出,计算潮位过程与实测过程基本吻合,高潮位基本一致,说明大、小范围潮流模型潮位验证满足波浪计算的要求。

为验证耦合模型计算结果的合理性,对长江口小范围模型,采用牛皮礁及长江口浮标站实测有效波高过程进行验证,验证点如图 2 所示;对中国海大范围模型,采用福建省海洋部门 1~4 号海上浮标及海峡 1、2 号浮标实测有效波高过程进行验证,验证点坐标如表 1 所示。

图 5 给出了中国海大范围模型和长江口小范围模型有效波高验证结果。表 2、表 3 分别给出了中国海大

范围模型与长江口小范围模型计算结果与实测误差统计。从图表中可以看出:1)大范围模型浮标处计算结果与实测有效波高基本吻合,波浪变化过程与实测结果一致。“烟花”台风期间有效波高均值误差在0.6%~9.2%之间,极值误差在2.5%~5.7%之间。各浮标实测最大有效波高为7.20 m,出现在距离台风路径最近的海峡1号浮标,模型计算有效波高最大值为7.02 m,相对误差为2.5%。2)小范围模型在长江口、牛皮礁浮标处计算结果与实测有效波高变化过程基本一致。牛皮礁位于受导堤、丁坝掩护的航道内,波高受潮位、水流影响,呈周期性变化,模型计算结果亦反映出这种变化规律。牛皮礁实测最大有效波高为4.43 m,计算结果为4.53 m,相对误差为2.3%。长江口站实测有效波高最大值为6.25 m,模型计算结果为6.20 m,相对误差为0.8%。

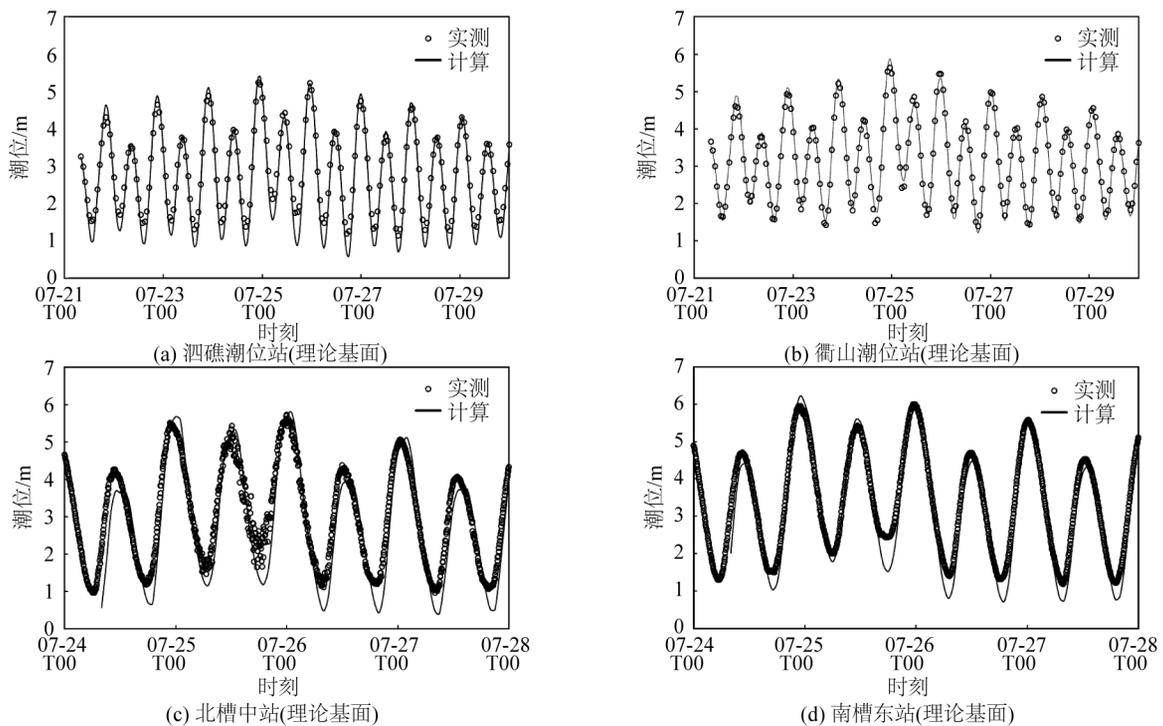


图4 潮位验证

Fig. 4 Verification of tide level

表1 浮标点坐标位置

Tab. 1 The coordinate position of bouy

浮标名称	东经度/(°)	北纬度/(°)
海峡1号	122.50	26.17
海峡2号	119.00	22.60
1号浮标	118.20	23.63
2号浮标	119.31	24.49
3号浮标	120.30	25.49
4号浮标	120.71	26.29

综上,构建的台风浪—风暴潮耦合模型可以很好地重现“烟花”台风期间风速、波高、潮位的变化情况,可作为长江口北槽水域波浪分析的基础。

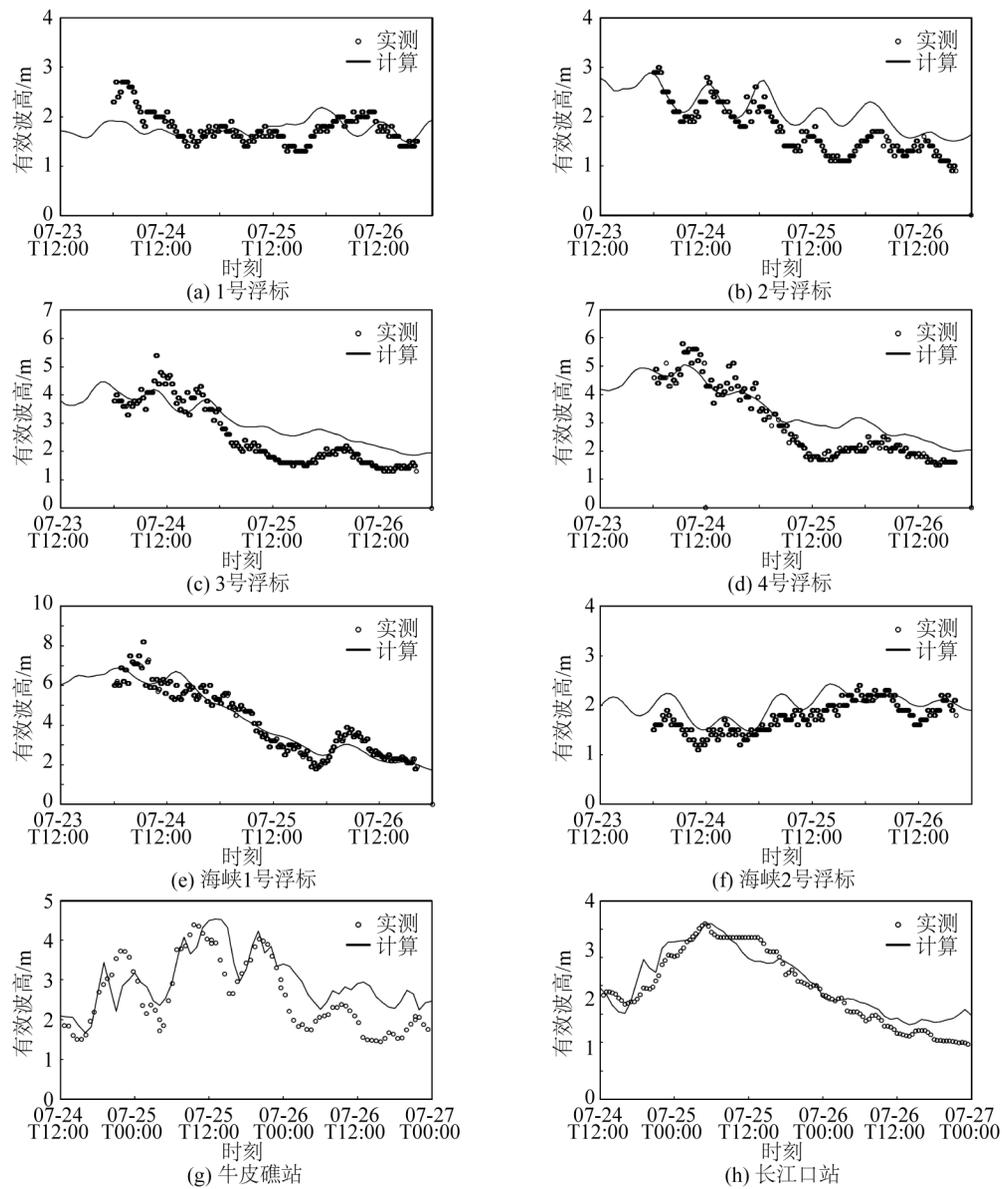


图 5 有效波高验证

Fig. 5 Verification of significant wave height

表 2 中国海大范围模型有效波高计算结果误差统计

Tab. 2 Error statistics of significant wave height of China Sea

测站名称	平均值				最大值			
	实测值/m	计算值/m	绝对误差/m	相对误差/%	实测值/m	计算值/m	绝对误差/m	相对误差/%
1号浮标	1.75	1.76	0.01	0.6	2.70	2.59	0.11	4.1
2号浮标	1.73	1.89	0.16	9.2	3.00	3.08	0.08	2.7
3号浮标	2.54	2.65	0.11	4.3	4.70	4.54	0.16	3.4
4号浮标	2.97	3.16	0.19	6.4	5.60	5.35	0.25	4.5
海峡1号	4.11	4.19	0.08	1.9	7.20	7.02	0.18	2.5
海峡2号	1.76	1.89	0.13	7.4	2.30	2.43	0.13	5.7

表3 长江口小范围模型有效波高计算结果误差统计(2021-07-24/2021-07-28)

Tab. 3 Error statistics of significant wave height in the Yangtze Estuary (2021-07-24/2021-07-28)

测站名称	平均值				最大值			
	实测值/m	计算值/m	绝对误差/m	相对误差/%	实测值/m	计算值/m	绝对误差/m	相对误差/%
牛皮礁	2.16	2.23	0.07	3.2	4.43	4.53	0.10	2.3
长江口	3.13	3.26	0.13	4.2	6.25	6.20	0.05	0.8

3 长江口北槽水域波浪分布特征分析

3.1 台风期间波浪时空变化规律

“烟花”台风期间外海大浪以东方向为主,波浪传播至长江口航道导堤口门处受地形、航道和导堤走向影响,波浪转为东南方向,图6展示了25日11—14时“烟花”台风期间长江口北槽水域有效波高分布。

提取了15个点(BL1~BL15)来分析长江口北槽水域的波浪变化情况。分析表明:受局部地形影响, BL1~BL3号点在本次台风期间波浪发生破碎,有效波高介于1.61~3.56 m; BL7~BL9处有效波高介于4.35~4.57 m;口门BL10~BL15处有效波高最大可达5.22 m。南挡沙堤沿线有效波高最大值介于1.61~5.22 m之间,自东向西逐渐衰减。

从图6中可以看出,在台风过程中,各点处发生大浪时刻并不一致。靠近口门处控制点(BL10~BL15)有效波高在25日11—12时,即台风二次登陆时刻达到最大;受台风中心西移及外海涌浪向长江口上游传播影响,其他点的有效波高在25日13时达到最大,此时有效波高4.0 m等值线延伸至北槽中部附近;口门外波浪因台风中心西移,风速减小,口门外波高发生衰减,14时该区域有效波高均开始下降。

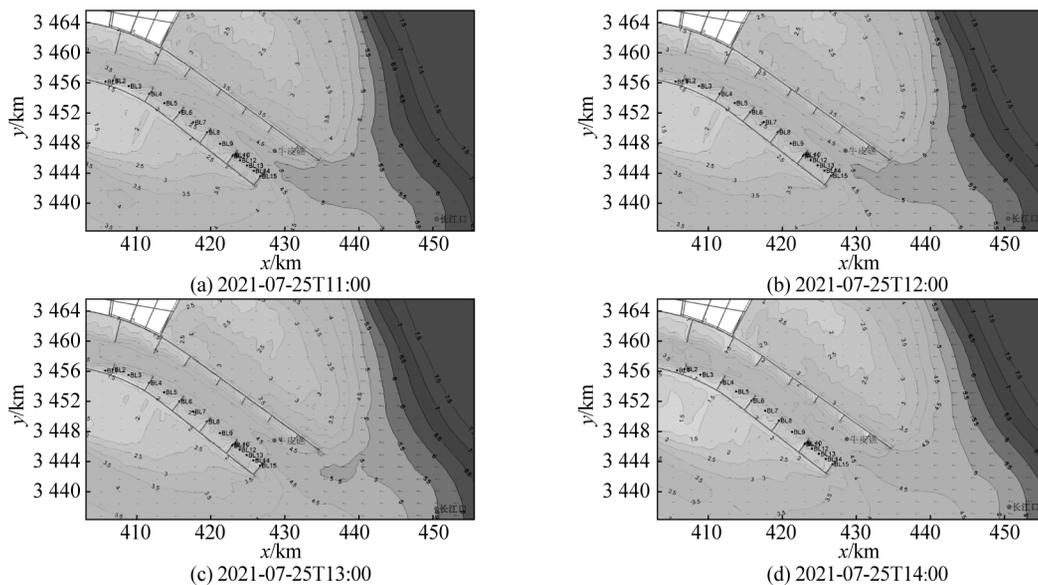


图6 长江口北槽水域不同时刻有效波高分布

Fig. 6 Distribution of significant wave height at different times of north channel of the Yangtze Estuary

3.2 台风“烟花”强度分析

由图4(c)可知,从模型中提取的牛皮礁站在本次台风过程中的最大风速为28.2 m/s,参考上海市《滩涂促淤圈围造地工程设计规范》^[18]中关于浦东各方向特征风速(见表4),本次台风过程中最大风速略大于E向50年一遇风速。

图2给出了工程区外海-20 m沿线11个点(P1~P11)位置示意,图7~8给出了P1~P11在台风过程中有效波高、平均波周期的变化过程。11个提取点中有效波高最大值介于7.17 m(P1)~8.45 m(P5),有效波高最大值的平均值为8.10 m;沿线各点平均周期最大值介于9.1 s(P2)~9.5 s(P11),平均波周期最大值的平均值为

9.1 s。《港口与航道水文规范》^[19]中给出了长江口外-20 m等深点 50 年一遇 E 方向建议重现期波高(见表 5), 换算至有效波高约 7.55 m, 平均周期为 8.9 s, 可见“烟花”台风在-20 m 等深线处波浪要素(波高、波周期)极值略高于规范推荐值。

综上, 可以认为, “烟花”台风过程在该水域造成的波浪强度为 50 年一遇左右。

表 4 浦东(吴淞口至中港)各方向特征风速

Tab. 4 Characteristic wind speed in all directions of Pudong(Wusongkou to Zhonggang)

重现期/a	各方向特征风速/(m·s ⁻¹)							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
100	33.5	34.6	30.3	28.5	29.1	27.6	32.9	33.9
50	30.6	31.5	28.0	26.4	26.6	25.5	30.1	31.1
10	23.6	24.2	22.5	21.4	20.8	19.2	23.3	24.2
5	20.4	20.9	19.9	19.1	18.2	16.5	20.1	21.0

表 5 长江口(-20 m)重现期波要素^[19]

Tab. 5 Wave elements of return period of the Yangtze Estuary(-20 m)

重现期/a	波浪方向	$H_{1/10}/m$	T/s
50	NNE	8.9	8.1
	E	9.0	8.9

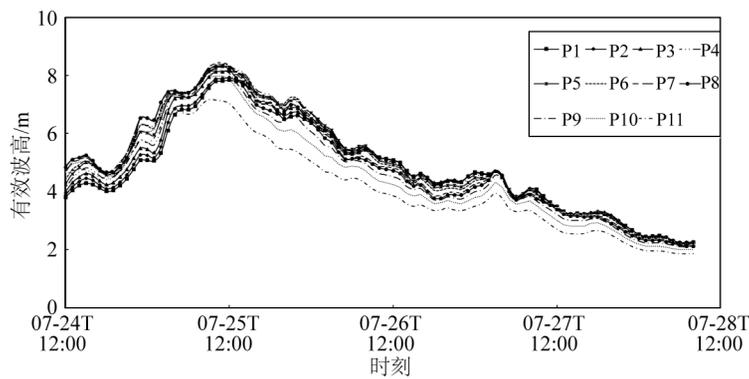


图 7 有效波高变化过程

Fig. 7 Variation process of significant wave heigh

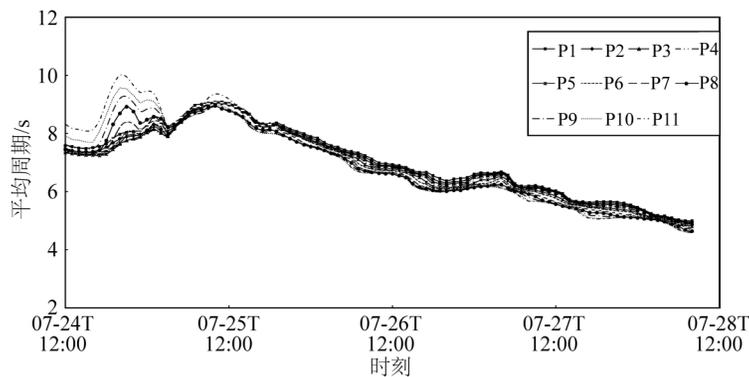


图 8 平均周期变化过程

Fig. 8 Variation process of mean period

4 结 语

利用ERA5背景风场和台风风场合成驱动风场,采用非结构网格构建了双重嵌套模型,建立了台风浪—风暴潮耦合数学模型,并以台风“烟花”实测资料对模型进行了验证,得到以下结论:

1)通过与实测风速、潮位和波浪资料进行对比验证,证明了所建模型可以较好地模拟台风作用下波流相互作用的波浪变化。

2)“烟花”台风过程主要受偏东方向风控制,外海大浪以东方向浪为主,波浪传播至长江口航道导堤口门处受地形、航道和导堤走向影响,波浪转为东南东向。受局部地形影响,长江口北槽BL1~BL3号点在“烟花”台风期间波浪以破碎波为主,BL7~BL9处存在大浪破碎情况,南挡沙堤沿线有效波高最大值介于1.61~5.22 m之间,自东向西逐渐衰减。

3)在“烟花”台风过程中,长江口北槽各点处发生大浪时刻并不一致。靠近口门处(BL10~BL15)有效波高在25日11—12时,即台风二次登陆时刻达到最大,口门处有5.0 m以上大浪;受台风中心西移及外海涌浪向长江口上游传播影响,其他点的有效波高在13时达到最大,此时有效波高4.0 m等值线延伸至北槽中部附近;口门外波浪因台风中心西移,风速减小,口门外波高发生衰减,14时该区域波高均开始下降。

4)依据台风过程中长江口风速及外海-20 m水深处波高、周期与参考规范建议值的对比,认为“烟花”台风过程波浪强度约为50年一遇。

参考文献:

- [1] 丁平兴,葛建忠. 长江口横沙浅滩及邻近海域灾害性天气分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2013(4): 72-78. DING P X, GE J Z. Analysis of disastrous weather in the Hengsha Shoal and adjacent waters of the Yangtze Estuary [J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2013(4): 72-78. (in Chinese))
- [2] 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(2): 54-60. (ZHAO D Z, LIU J, WU H L. Preliminary analysis of typhoon-induced sudden sedimentation in navigation channel in Yangtze Estuary over last decade[J]. Journal of Sediment Research, 2012(2): 54-60. (in Chinese))
- [3] LONGUET-HIGGINS M S, STEWART R W. Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications[J]. Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts, 1964, 11(4): 529-562.
- [4] WOLF J, HUBBERT K P, FLATHER R A. A feasibility study for the development of a joint surge and wave model[R]. Birkenhead, Merseyside, UK: Proudman Oceanographic Laboratory, 1988(1): 1-109.
- [5] TOLMAN H L. Effects of tides and storm surges on North sea wind waves[J]. Journal of Physical Oceanography, 1991, 21(6): 766-781.
- [6] 尹宝树,王涛,侯一筠,等. 渤海波浪和潮汐风暴潮相互作用对波浪影响的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(1): 109-116. (YIN B S, WANG T, HOU Y J, et al. Numerical study of the influence of waves and tide surge interaction on waves in Bohai Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(1): 109-116. (in Chinese))
- [7] 刘永玲,王秀芹,王淑娟. 波浪对风暴潮影响的数值研究[J]. 海洋湖沼通报, 2007(增刊1): 1-7. (LIU Y L, WANG X Q, WANG S J. A numerical study of the influence of waves on storm surges[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2007(Suppl1): 1-7. (in Chinese))
- [8] 陈华伟,葛建忠,丁平兴. 波浪对台风风暴潮过程的影响分析[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2010(4): 16-25. (CHEN H W, GE J Z, DING P X. Analysis of storm surge's process under the influence of waves[J]. Journal of East China Normal University (Natural Science), 2010(4): 16-25. (in Chinese))
- [9] 郑立松,余锡平. 波浪辐射应力对风暴增水的影响研究[J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(4): 74-78. (ZHENG L S, YU X P. Study on the effect of wave radiation stress on storm surge[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 74-78. (in Chinese))
- [10] 刘秋兴,于福江,王培涛,等. 辐射应力对台风风暴潮预报的影响和数值研究[J]. 海洋学报, 2011, 33(5): 47-53. (LIU Q X, YU F J, WANG P T, et al. Numerical study on storm surge forecasting considering wave-induced radiation stress[J].

- Haiyang Xuebao, 2011, 33(5): 47-53. (in Chinese))
- [11] 高佳, 潘嵩, 王慧, 等. 基于 ADCIRC+SWAN 耦合模型的风暴潮数值模拟研究: 以深圳西部海域为例[J]. 海洋通报, 2019, 38(6): 662-674. (GAO J, PAN S, WANG H, et al. Storm surge simulation based on ADCIRC+SWAN coupling model: a case study of the western Shenzhen water[J]. Marine Science Bulletin, 2019, 38(6): 662-674. (in Chinese))
- [12] 魏凯, 沈忠辉, 吴联活, 等. 强台风作用下近岸海域波浪—风暴潮耦合数值模拟[J]. 工程力学, 2019, 36(11): 139-146. (WEI K, SHEN Z H, WU L H, et al. Coupled numerical simulation on wave and storm surge in coastal areas under strong typhoons[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(11): 139-146. (in Chinese))
- [13] YOUNG I R, SOBEY R J. A predictive model of tropical cyclone wind-waves [C]// Proceedings of the 7th Australasian Conference on Hydraulics and Fluid Mechanics 1980: Preprints of Papers. Barton, ACT: Institution of Engineers, Australia, 1980:480-483
- [14] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730):1999-2049.
- [15] 张志旭, 齐义泉, 施平, 等. 最优化插值同化方法在预报南海台风浪中的应用[J]. 热带海洋学报, 2003, 22(4): 34-41. (ZHANG Z X, QI Y Q, SHI P, et al. Application of an optimal interpolation wave assimilation method in South China Sea[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2003, 22(4): 34-41. (in Chinese))
- [16] 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.
- [17] 李孟国, 郑敬云. 中国海域潮汐预报软件 Chinatide 的应用[J]. 水道港口, 2007, 28(1): 65-68. (LI M G, ZHENG J Y. Introduction to Chinatide software for tide prediction in China Seas[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007, 28(1): 65-68. (in Chinese))
- [18] 上海市城乡建设和交通委员会. 滩涂促淤圈围造地工程设计规范: DG/TJ08—2111—2012[S]. 上海: 上海市城乡建设和交通委员会, 2012. (Shanghai Construction and Traffic Committee. Design code for promoting sedimentation and land reclamation project: DG/TJ08—2111—2012 [S]. Shanghai: Shanghai Construction and Traffic Committee, 2012. (in Chinese))
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 港口与航道水文规范: JTS 145—2015(2022版)[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code of hydrology for harbour and waterway: JTS 145—2015(2022 Edition)[S]. Beijing: People's Communications Publishing House Co., Ltd., 2022. (in Chinese))