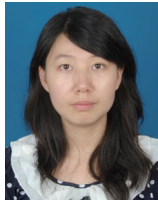


· 综 合 ·



江苏沿海近岸台风浪数值模拟*

侯虹波¹, 陈永平^{1,2}, 张长宽¹

(1. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

摘要: 以台风“梅花”为例, 采用QSCAT/NCEP再分析风场资料和捷氏台风经验模型构造混合型台风风场, 以此作为驱动条件, 利用MIKE21波浪谱模型对江苏沿海近岸台风浪进行数值模拟, 并针对潮位变化对模拟结果的影响进行对比分析。结果表明, 该模拟方法可以较好地复演台风浪发展的整个过程, 而考虑潮位变化的影响有助于台风浪模拟精度的提高。

关键词: 江苏沿海; 近岸台风浪; 捷氏台风模型; 波浪谱模型; 潮位变化

中图分类号: TV 139.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)04-0013-07

Numerical simulation of typhoon waves along Jianguo coast

HOU Hong-bo¹, CHEN Yong-ping^{1,2}, ZHANG Chang-kuan¹

(1. College of Harbour, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: This paper simulates the waves induced by the typhoon ‘Muifa’. With the driven wind conditions generated by incorporating the Jelenskin typhoon model and QSCAT/NCEP banded wind, a typhoon wave model along Jianguo coast is developed based on the MIKE21 spectral wave model, and a comparative analysis of simulation results with and without the effect of tidal water level is conducted. The results show that, the simulation model used in this paper can reasonably reproduce the features of entire process in the development of typhoon waves, and the accuracy of typhoon waves can be improved by considering the change of tidal water level.

Key words: Jianguo coast; nearshore typhoon waves; Jelenskin typhoon model; spectral wave model; change of tidal water level

我国位于太平洋西岸, 海岸开阔且漫长, 容易受季节性台风的影响。当台风形成后, 台风中心的最大风速可达50~60 m/s, 在强风作用下, 在广阔的海面上可以形成十几米, 甚至几十米的巨浪。在巨浪向近岸传播的过程中, 一方面由于掀沙作用造成水下地形冲蚀, 另一方面由于波浪变形造成波能局部集中, 有可能对已有的或正在建设的海岸工程带来灾难性的后果。据文献[1]统计, 每年我国由于近岸台风浪造成海难事故70余

起, 对海岸防护工程破坏造成的经济损失超过7亿元。因此开展台风浪特别是近岸台风浪的预报研究对于优化海岸工程的设计, 有效抵御台风的影响有着重要的现实意义^[2-3]。

在以往近岸台风浪计算过程中, 往往通过风与浪之间的经验关系来进行推算, 由于各个区域特点有所不同, 因此预报的结果带有较强的经验性。随着模拟技术的提高, 通过数学模型的手段来实现近岸台风浪的预报或后报已成为可能。本

收稿日期: 2012-09-06

*基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973计划)课题(2010CB429001); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201201045)

作者简介: 侯虹波(1988—), 女, 硕士研究生, 主要从事河口海岸及近海工程水动力环境方面研究。

文以影响江苏沿海的典型台风“梅花”为例，通过引入混合型的风场条件，利用MIKE21 SW模块对近岸台风浪进行了数值模拟，并探讨了由于潮汐引起的水位变化对台风浪模拟精度的影响。

1 台风浪模型

对波浪场的数值模拟大多基于3种类型的数学模型：缓坡方程、Boussinesq型方程和波浪谱模型。缓坡方程^[4-5]模型又称联合折射绕射模型，适用于求解波浪在地形、流、建筑物等影响下的穿播变形计算，其在近岸几公里到几十公里区域波浪要素推算时得到了广泛的应用；Boussinesq型方程模型^[6]能较好地考虑波浪非线性相互作用，但仅适用于几公里以内的小区域，如港区、海工建筑物等附近的波浪场计算。基于能量平衡方程^[7]的波浪谱模型主要用于全球和区域中尺度范围的波浪场计算^[8-9]，目前在国际上比较流行的有WAM和Wavewatch III，而最近提出的SWAN模型考虑了浅水变形、折射、绕射、波浪破碎等过程，因此可以较好地模拟波浪在近岸的传播过程。考虑到台风尺度相对较大而且移动迅速，计算域的最大尺度可达几百公里，甚至上千公里，因而波浪谱模型更适用台风浪的数值模拟，而为了提高近岸波浪的模拟精度，可以通过模型嵌套的方式予以实现。

随着波浪数学模型的日趋成熟及计算机的日新月异，商业化数值模拟软件凭借其友好的界面及强大的前、后处理功能等优势被越来越广泛地应用于实际工程之中，MIKE21是其中较为成功的商业软件之一。MIKE21的SW(Spectral Wave Model)模块是基于非结构网格/曲线网格的新一代谱波浪模型，其理论背景与SWAN非常接近，因而能够模拟海岸地区大范围的风浪和涌浪的成长、衰减及变形，可以求解准定常和非定常波浪作用平衡方程的全谱公式和方向解耦参数公式，并可与2D/3D水流模型完全耦合^[10-12]。

2 台风风场模型

台风风场的准确性对台风浪数值模拟效果至关重要。目前我国描述台风气压场的模型主要有4个^[13]：高桥模式、梅尔斯模式、藤田模式、捷

氏模式。很多学者直接使用这4种模型构建台风风场模型，也有学者在经验模型的基础上加入再分析风场资料，或是使用大中尺度气象数值模式的输出风场。其中，对经验模型风场叠加NCEP再分析风场构造的台风风场下台风浪模拟效果良好，可以有效弥补经验模型风场的背景风精度不足的缺陷^[14-15]。

本文采用由捷氏气压模型计算得到的风速和台风移动导致的风速合成得到台风风场，在此基础上叠加NCEP背景风场作为最终波浪模型的驱动条件。其理论背景简述如下：台风区域内每一点的风速由两部分组成，一是与台风中心移动速度有关的风速；二是与台风气压梯度有关的对称梯度风速^[16]。依据捷氏模型，其气压场的分布形式为：

$$\begin{cases} p(r) = p_0 + \frac{1}{4} \Delta p \left(\frac{r}{R_0}\right)^3 & r \leq R_0 \\ p(r) = p_\infty - \frac{3}{4} \Delta p \left(\frac{r}{R_0}\right)^{-1} & r > R_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\Delta p = p_\infty - p_0$ ， p_∞ 是台风外围气压， p_0 是台风中心气压； r 是计算点至台风中心的距离； R_0 为台风参数，表征台风的影响范围。在该气压模式中，假定气压的等压线呈同心圆分布，对同一次台风，随台风中心的移动，气压场结构的变化， R_0 也不断变化。 R_0 代表自中心向外 $0.25 \Delta p$ 的距离。

设台风中心的移速为 v ，假设离中心500 km处由台风中心移动引起的风速衰减为 $\exp(-\pi)$ ，则各网格点与台风中心移动有关风速^[17]取为：

$$F = C_1 v \exp\left(-\frac{\pi r}{500}\right) \quad (2)$$

式中：系数 C_1 一般取 $4/7 \sim 6/7$ ，对于 R_0 大的台风取 $4/7$ ， R_0 小的台风取 $6/7$ 。

与台风气压有关的梯度风速由单位空气质点绕台风作圆周运动的离心力、压强梯度力、柯氏力的平衡求出，即：

$$\frac{U_{gr}^2}{r} + 2\omega \sin\varphi U_{gr} - \rho_w \frac{dp}{dx} = 0 \quad (3)$$

求解上面的二次方程，得梯度风速为：

$$U_{gr} = r\omega \left(\sqrt{\sin^2\varphi + \frac{1}{\rho_a r \omega^2} \frac{dp}{dr}} - \sin\varphi \right) \quad (4)$$

在台风中心附近，经验模型可较好地反映台风大风区的风场特征，但一般仅限于几百公里的

范围, 在台风外围区域, 由于同时受到台风和其他天气系统的影响, 风场一般与经验模型差别很大, 使用NCEP资料作为背景风场。最终的台风场由NCEP背景风场和台风经验模型风场合成得到, 在台风影响到的计算区域是采用经验的风场模型, 而在台风外围区域和台风来之前和离开以后则采用NCEP风场资料。

为了使风场在时间和空间上更为顺畅, 在两种不同风场条件之前采用了平滑处理技术^[18], 即

$$v=(1-e)v_{NCEP}+ev_{\text{经验模型}} \quad (5)$$

式中: v 为合成风场风速; v_{NCEP} 为NCEP背景风场风速; $v_{\text{经验模型}}$ 为经验模型风场风速; e 为权重系数, 在本文中取值为0.3。

3 台风浪“梅花”的数值模拟

3.1 “梅花”台风简介

台风“梅花”是2011年我国第9个编号的热带气旋。它于07-28T14:00在菲律宾宾海南部E135°, N11.7°附近发展成热带风暴, 移动过程中不断加强; 07-30T20:00中心气压为925 hPa, 最大风速为50 m/s, 发展成为强台风。此后向正北方向以50~55 m/s的速度移动; 08-03向西转向, 随后再向北转向; 随着台风的移动风速减小, 最终于08-07T21:00左右风速降为30 m/s, 中心气压为975 hPa, 由台风减弱为强热带风暴。08-08T18:30前后在朝鲜西海岸北部沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力9级(23 m/s), 中心最低气压985 hPa, 并于08-09T02:00在辽宁省铁岭市减弱为热带低压, 之后强度继续减弱, 对我国影响逐渐减小, 中央气象台于08-09T08:00对其停止编号。

受“梅花”影响, 08-08—08-09, 山东半岛东部、辽宁、吉林中东部、黑龙江中部等地有大到暴雨, 辽宁中东部部分地区有大暴雨, 局地有特大暴雨; 08-04以来, 辽宁、上海、江苏、浙江、山东部分地区遭受大风和强降雨袭击, 导致5省(直辖市)29市183个县(区、市)360余万人不同程度受灾。据国家减灾委办公室统计, 截至08-08T16:00, 364.98万人受灾, 135.3万人紧急转移安置, 房屋倒塌600余间, 损坏4 800余间, 直接经济损失31.28亿元。图1为台风“梅花”的路径。

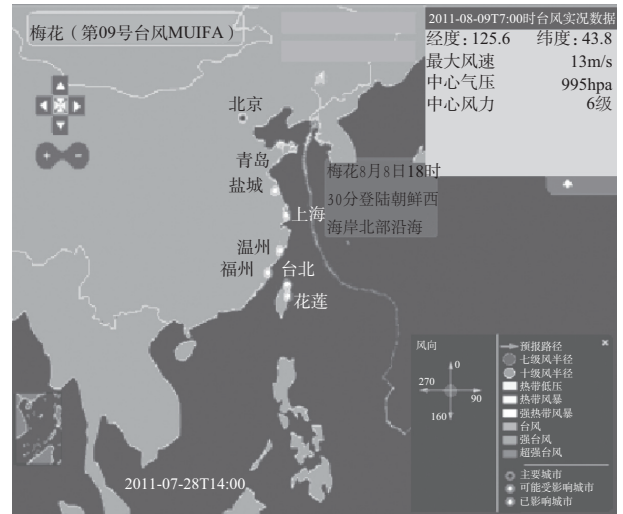


图1 1109号“梅花”台风路径

3.2 风场模型参数

在本次台风浪数值计算过程中, 所采用的NCEP再分析风场资料的时间分辨率为6 h, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 而有台风风场模型产生风场的时间分辨率为1 h, 空间分辨率为 $0.067^\circ \times 0.067^\circ$ 。为了使得风场在时间和空间上更为平顺, 在模型参数中选用了空间和时间平滑技术, 对梅花期间影响到台风风场进行重新构建。

3.3 潮位模型参数

在此次台风浪数值计算过程中, 所采用的潮位变化使用的模型为MIKE21FM模块, 模型计算了2011-07-15—2011-08-15连续1个月的潮位, 时间步长选用120 s, 基面为85基面。模型开边界由东中国海潮波数学模型提供水位边界条件, 岸线闭边界采用不可入条件。底摩阻根据水深率定。

3.4 波浪模型参数

如前所述, 本次台风浪模拟使用MIKE21SW模块进行模拟, 根据研究内容的要求, 数学模型西自现有岸线, (37°N , 122.5°E), 外海边界使用弧段边界, 以克服该模块要求边界入射波浪与边界线垂直的缺点, 使得边界上各个方向的入射波浪都能够较好地传入到模拟区域。模型计算区域的离散均采用三角形网格, 外海网格尺度5 km, 近岸网格尺度2 km。图2为此次台风浪的模拟区域地形图, 其中C1为响水波浪测站, 坐标为 120.101°E , 34.437°N , C2为大丰气象测站, 坐标为 120.45°N , 33.19°E 。

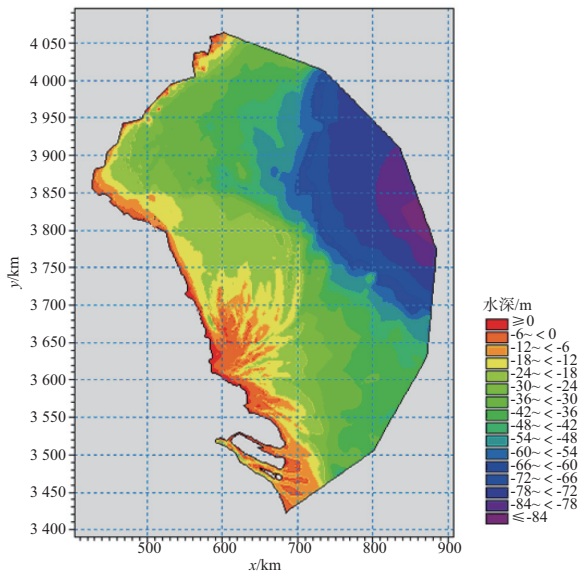


图2 1109“梅花”台风浪模拟区域地形

时间条件：计算时间从2011-08-02—08-09，时间步长 $\Delta t=300\text{ s}$ 。

水位条件：本文就考虑水位和未考虑水位两种情况进行比较，其中考虑水位时的水位是由MIKE21 FM模型模拟潮汐运动并经验证得到的。

风场条件：本次模拟先根据台风路径模拟台风局域风场再叠加由NCEP提供的风场作为本次模拟的总风场。

边界条件：在此次梅花台风浪的研究中，考虑西边界（岸线）取为陆地边界，外海弧形边界取为水边界，采用东中国海大范围由WAM模型计

算结果在开边界处提供。

初始条件：在本次台风浪的模拟中，初始条件选择由JONSWAP经验公式^[19]给定的模式。

4 模拟结果及分析

4.1 台风风场的模拟结果

图3和4为大丰测站（120.45°N，33.19°E）的实测风资料与模拟值的比较，可以看出，该风场可以模拟出台风到来期间强风过程，风速和风向基本吻合。图5为模拟区域分别在2011-08-06—2011-08-09各日的零点风场图，可以较精确地看到台风眼的位置，经比较得出该风场图与台风路径图吻合。

4.2 潮位模拟结果

本文给出了2011-07-23—2011-08-10期间两个测站W1(32°51' 30" N, 121°06' 18" E)和T3(32°39' 41" N, 121°01' 49" E)的模拟结果（图6），其中由于地形数据精度不够，W1站水深小于实际水深，导致模拟低潮值略大于实测低潮值，但可以看出模拟结果与实测数据基本吻合。最终作为本次台风浪模拟的水位变化条件。率定潮位计算公式为：

$$H_{85}=H_d-H_0 \quad (6)$$

式中： H_{85} 为本次使用的85基面下的潮位值； H_d 为研究点的实测水深； H_0 为研究点的静水深。

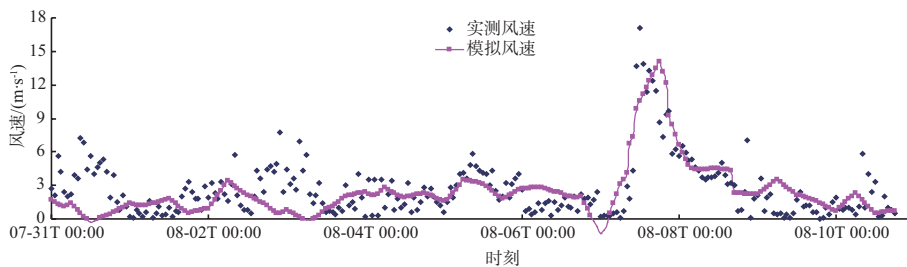


图3 大丰测站实测风速与模拟风场风速过程线比较

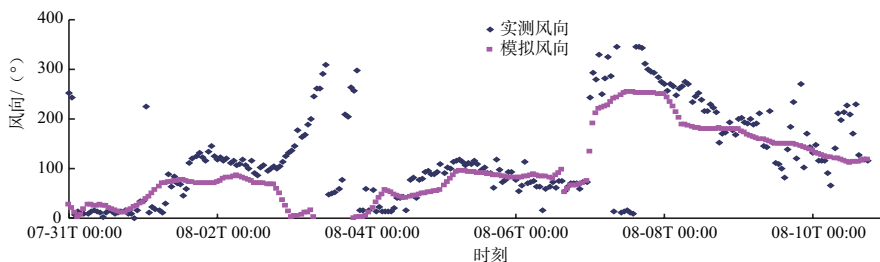


图4 大丰测站实测风向与模拟风场风向过程线比较

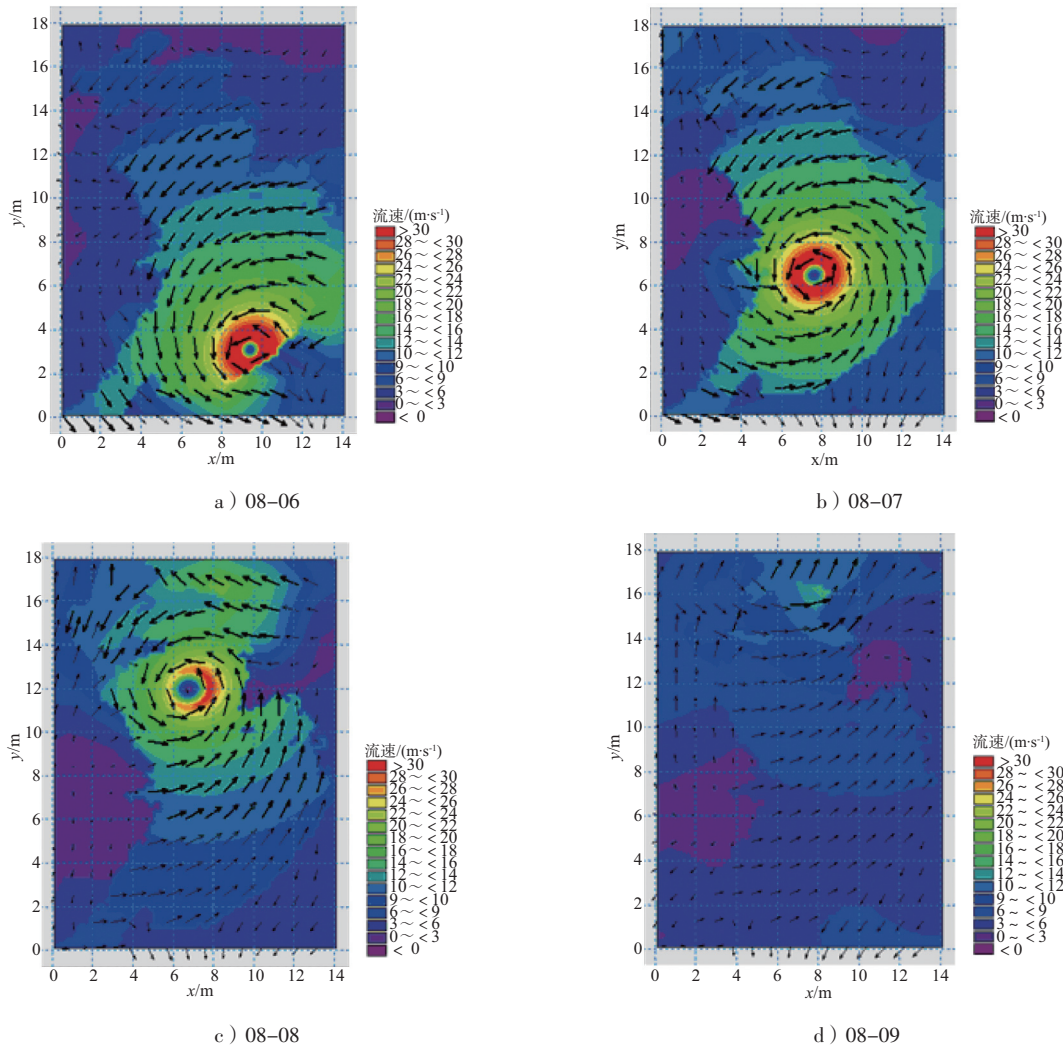


图5 08-06—08-09各日零点的风场

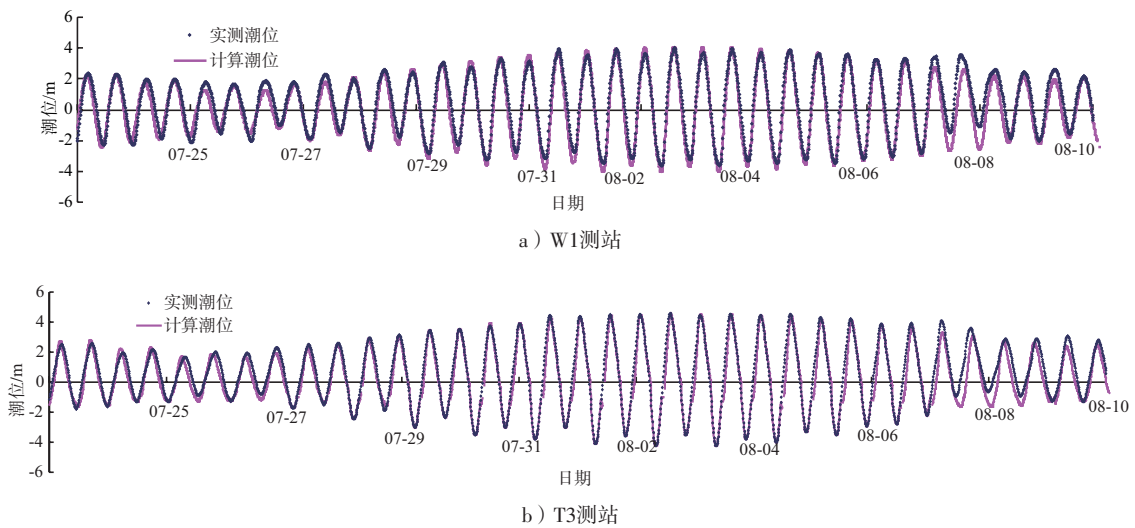


图6 测站计算潮位验证

4.3 台风浪模拟结果

根据上述模拟区域及调试参数得到响水测站的计算有效波高, 在此考虑了有无潮位影响的两

种情况, 将结果与实测值进行比较(图7, 8), 由比较结果可以看出, 在未考虑潮位影响的情形下, 模拟结果基本反映了台风成长的整个过程,

但波高的计算值与实测值存在一定的偏差；而考虑潮位变化影响的情形下，所得到的有效波高与实测结果明显更好一些。另外由图7可以看出，台风来临前由于风速较小，水位对波高的起伏起主要作用，而当台风来临时，风作用对波浪的影响超过了潮位对其的影响，成为波高变化的主导因素。图9为本次台风期间考虑潮位的情况下，响水测站计算最大波高与实测最大波高的比较，整体

上二者吻合较好。比较图8和图9可以看出在台风期间潮位对最大波高的影响大于其对有效波高的影响，这可能是由于台风期间风暴潮的叠加导致最大波高受影响较大，该测站在台风期间最大波高可达3.5 m。图10显示了该点的风过程线，可以看出有效波高大小与该时刻风速大小呈明显的相关关系，反映了本次台风浪对该区域的影响以风浪为主。

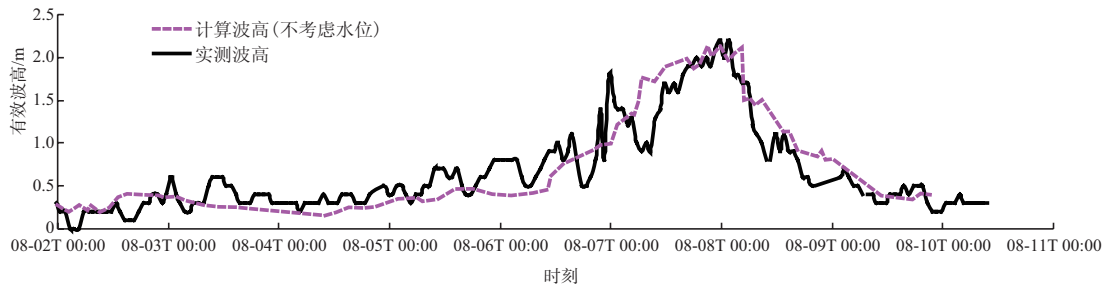


图7 响水测站实测有效波高与计算有效波高（未考虑水位）比较

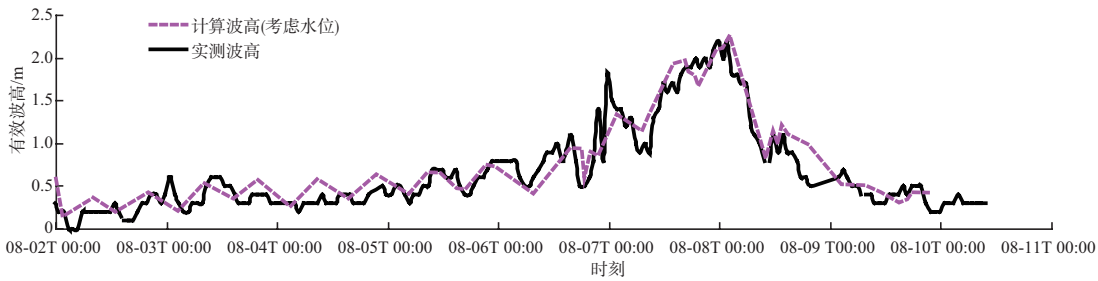


图8 响水测站实测有效波高与计算有效波高（考虑水位）比较

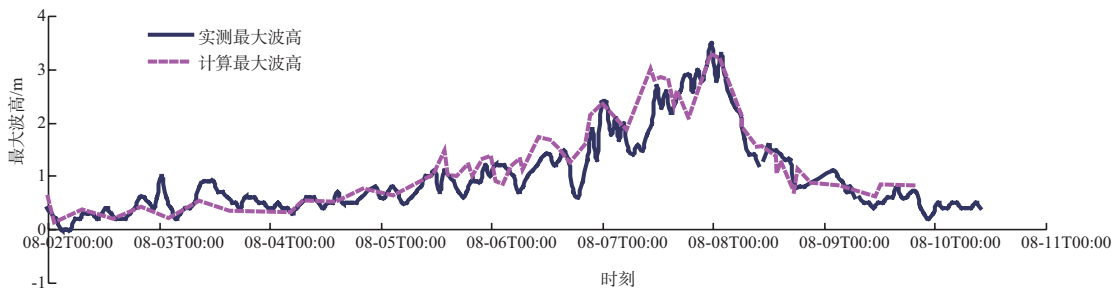


图9 响水测站最大波高比较

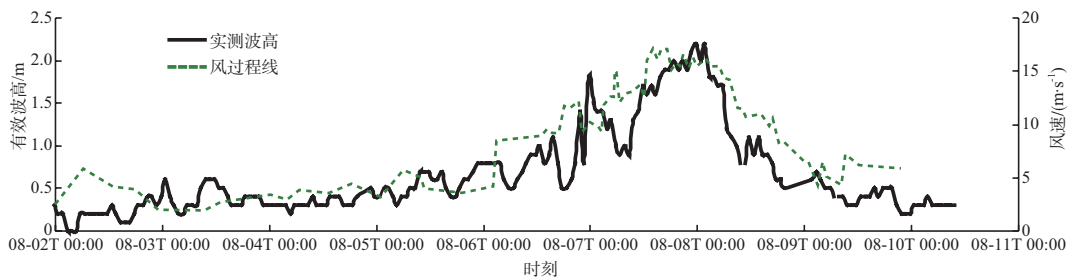


图10 响水测站风过程线

5 结语

本文利用QSCAT/NCEP再分析气象资料和捷氏台风模型构造了“梅花”台风的风场条件,利用MIKE21 SW对该台风在江苏沿海产生的近岸台风浪进行了数值模拟,通过与大丰站气象资料和响水站波浪资料的比较验证了上述模拟的可行性。在此基础上,进一步考虑了潮位对模拟结果的影响,发现考虑潮位变化的影响有助于该区域近岸台风浪模拟精度的提高。

参考文献:

- [1] 徐启春,杨春成,戴明瑞,等. 一种台风浪的数值预报方法[J]. 海洋学报, 1996(1): 1-12.
- [2] 许富祥. 中国近海及其邻近海域灾害性海浪的时空分布[J]. 海洋学报, 1996(2): 26-31.
- [3] 胡克林,丁平兴. 长江口波浪对泥沙输运影响的初步研究[C]. 上海: 第八届全国海岸河口学术研讨会暨海岸河口理事会议, 2004.
- [4] Berkoff J C W. Computation of combined refraction-diffraction[C]. Proc of the 13th Conference Coastal Eng, 1972: 471-490.
- [5] Radder A C. On the parabolic equation method for water-wave propagation[J]. J Fluid Mech, 1979 (1): 159-176.
- [6] Nowgu O. An alternative form of Boussinesq equations for nearshore wave propagation [J]. J of Waterway, Port, Coastal and Ocean, 1993,119(6):618-638.
- [7] Ris R C,Holthuijsen L H,Booij N. A spectral model for waves in the near shore zone[J]. Coastal Engineering, 1994(1): 68-78.
- [8] XU Fu-min, YAN Yi-xin. Wave numerical model for shallow water[J]. Ching Ocean Engineering, 2000, 14(2):193-202.
- [9] 林钢. 长江口波浪折射绕射数值模拟[J]. 港工技术, 1999(3): 7-9,21.
- [10] Janssen P A E M. Wave induced stress and the drag of airflow over sea waves[J]. J Phys Oceanogr, 1989, 19: 745-754.
- [11] Janssen P A E M. Quasi-linear theory of wind wave generation applied to wave forecasting[J]. J Phys Oceanogr, 1991, 21: 1 631-1 642.
- [12] Komen G J L, Cavaleri M. Doneland, et al, Dynamicis and Modeling of Ocean Waves[M]. Cambridge: Cambridge University Press,1994.
- [13] Wang Chong-hao,Li Yok-sheung,Chen Yong. Modeling of the wave-current interaction in the pearl river estuary[C]. Hongkong: Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, 2006.
- [14] 张志旭,齐义全,施平,等. 卫星高度计波高资料的同化试验分析[J]. 海洋学报, 2003, 25(5): 21-28.
- [15] 蒋小平,钟中,张金善,等. 台风浪模拟预报种的风场比较研究[J]. 海洋通报, 2007,26(2): 11-19.
- [16] 朱首贤,沙文钰,丁平兴,等.近岸非对称型台风风场模型[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2002(3): 66-71.
- [17] 陈洁,躺立群,申锦瑜,等. 台风气压场与风场研究进展[J]. 海洋工程, 2009(3): 136-142.
- [18] 赵红军,宋志尧,徐福敏,等. 南中国海台风浪数值模拟研究——以台风“珍珠”为例[J]. 海洋工程, 2010(3): 128-134.
- [19] Hasselmann K, Barnett E T P, Bouws E, et al. Measurements of windwave growth and swell decay during the joint north sea wave project(JONSWAP) [R]. Netherlands: TU Delft, 1973.

(本文编辑 武亚庆)