

地形数据对台风浪数值模拟的影响

陈重阳¹, 马云², 夏坤宁³, 陈璇⁴

(1. 海军工程大学 管理工程系, 湖北 武汉 430033; 2. 中国海洋报社, 北京 100031;
3. 解放军 31010 部队, 北京 100081; 4. 解放军 75839 部队, 广东 广州 510510)

摘 要: 采用区域嵌套, 在岛礁处理的方案上采用地形平滑及三次样条插值的方案处理底地形和岛礁。以 QuikSCAT/NCEP 混合风场驱动目前国际先进的第三代海浪模式 WW3, 对 2006 年 7 月发生在中国近海的一次台风浪过程展开模拟, 对比分析了原始地形和处理后地形对海浪数值模拟的影响, 对比结果显示: 经过处理后的地形对于提高台风浪的模拟效果起到了积极作用。

关键词: QuikSCAT/NCEP 混合风场; 中国海域; WW3 海浪模式; 地形

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2018)02-0053-07

1 引言

海浪对水面舰艇的影响主要包括横摇、纵摇、中拱及中垂等^[1]。舰艇的横摇容易导致船体倾斜, 当摇摆角度过大, 容易产生难以应付的安全隐患; 纵摇则会造成螺旋桨空转, 影响航速和螺旋桨使用寿命。此外, 海浪场在一定程度上改变了海表粗糙度, 大浪还可以通过海浪的破碎效应进一步增大海表粗糙度, 这些均会对航速产生一定的影响。海浪可以分为风浪和涌浪, 一般情况下, 涌浪具有波长长、表面光滑的特性; 而风浪则具有不规则的特征。在晴好天气下, 风浪对舰船航行影响不大, 但恶劣的海况对舰船影响则是不可忽略的。

受温带气旋、入海冷空气、台风等天气系统影响, 海面上航行往往伴随恶劣的海况。受舰船材料及结构的限制, 恶劣海况加大了航运的危险系数。西太平洋, 是世界上主要的台风活动区域之一。台风活动海域常常出现大风、巨浪、强降水等恶劣天气, 严重威胁海上航行安全。台风涌浪还会造成近海区域漫滩, 当台风登陆或离开后, 往往会造成泥沙淤塞港口, 或致使船只搁浅, 造成较大的经济损

失和航行障碍。

我国东邻西太平洋, 在每年台风季中, 中国海及沿岸受台风影响显著, 如何提升海浪预测能力是保证恶劣海况下航行安全的关键所在。随着计算机技术的不断发展和对涉及海浪的各种物理过程研究的深入, 海浪数值模式已日趋完善; 其中, 以描述非线性相互作用为代表的第三代海浪模式最具典型性。目前, 第三代海浪模式已日益成为研究、模拟、预测海浪的首要选择。此外, 数值模拟已成为获取大范围海浪数据的重要手段。凭借该手段, 使得海浪的相关研究得以在一些缺少观测数据的海区实现^[2]。在波浪研究的历程中, 人们发现, 过深的地形则几乎不对表面波产生重要的影响; 但在近岸海区, 海浪受地形影响显著 (例如: 折射), 复杂的地形容易抑制海浪能量的传播, 从而影响对海浪场的模拟效果。因此, 在波浪模式的运行过程, 需要重点考虑水深和地形对海浪过程模拟的影响。此外, 海浪有明显的绕射效应, 而当障碍物与海浪波长相比很大时, 这种现象又不是很明显。在模拟过程中修正地形以更好的模拟海浪绕射过程是海浪模式中地形数据处理不可避免的过程。如何处理

收稿日期: 2017-06-11; 修回日期: 2017-07-14。

基金项目: 河口海岸学国家重点实验室开放基金(SKLEC-KF201707); 高端科技创新智库青年项目(DXB-ZKQN-2016-019)。

作者简介: 陈重阳(1974-), 男, 副教授, 硕士, 主要从事军事航海学研究。E-mail: 595657051@qq.com

通讯作者: 陈璇(1989-), 男, 硕士, 主要从事海洋数值模拟研究。E-mail: chzffx@qq.com

地形数据,精确地模拟研究台风浪,将为中国南海岛礁建设^[3]、“21世纪海上丝绸之路”^[4]建设、海洋权益维护等提供重要的参考。

基于前人的处理经验(略去小地形、平滑水深数据、次网格模型^[5]等)和本文的研究方向,拟采用嵌套模式。对于岛礁处理,拟采用地形平滑及三次样条插值的方案处理底地形和岛礁,以期能为台风浪的精确模拟提供借鉴经验。

2 模式、数据、方法介绍

2.1 台风及驱动风场

2006年7月19日14时(世界时,下同),第5号台风“格美”于西北太平洋洋面上生成,并向偏西方向移动;至20日14时发展为强热带风暴;21日08时,加强为台风级。此后第5号台风“格美”一直维持台风级别,并于24日23时45分在台湾台东登陆,

25日15时50分在福建晋江金井镇围头码头沿海登陆,其路径见图1。

登录后不久,“格美”即减弱为热带风暴,并于26日05时减弱为热带低气压。至此,本次台风过程结束。本次台风过程影响区域大、台风强度较为稳定、附带影响显著。是一次典型的影响中国近海的台风浪过程。

常用于驱动海浪模式的海表风场有ERA-40海表10 m风场^[6-7]、NCEP(National Centers for Environmental Prediction,美国国家环境预报中心)风场、QuikSCAT/NCEP(QN)混合风场等,其中QN风场具有较高的精度和时空分辨率^[8-11],常被用作模拟天气过程的驱动场,且效果好于NCEP和ERA-40风场^[8,12-14]。QN混合风场,是对卫星散射计(Quick Scatterometer, QuikSCAT)观测数据和NCEP分析数据的时空混合分析的结果,其空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,每6 h一次数据。

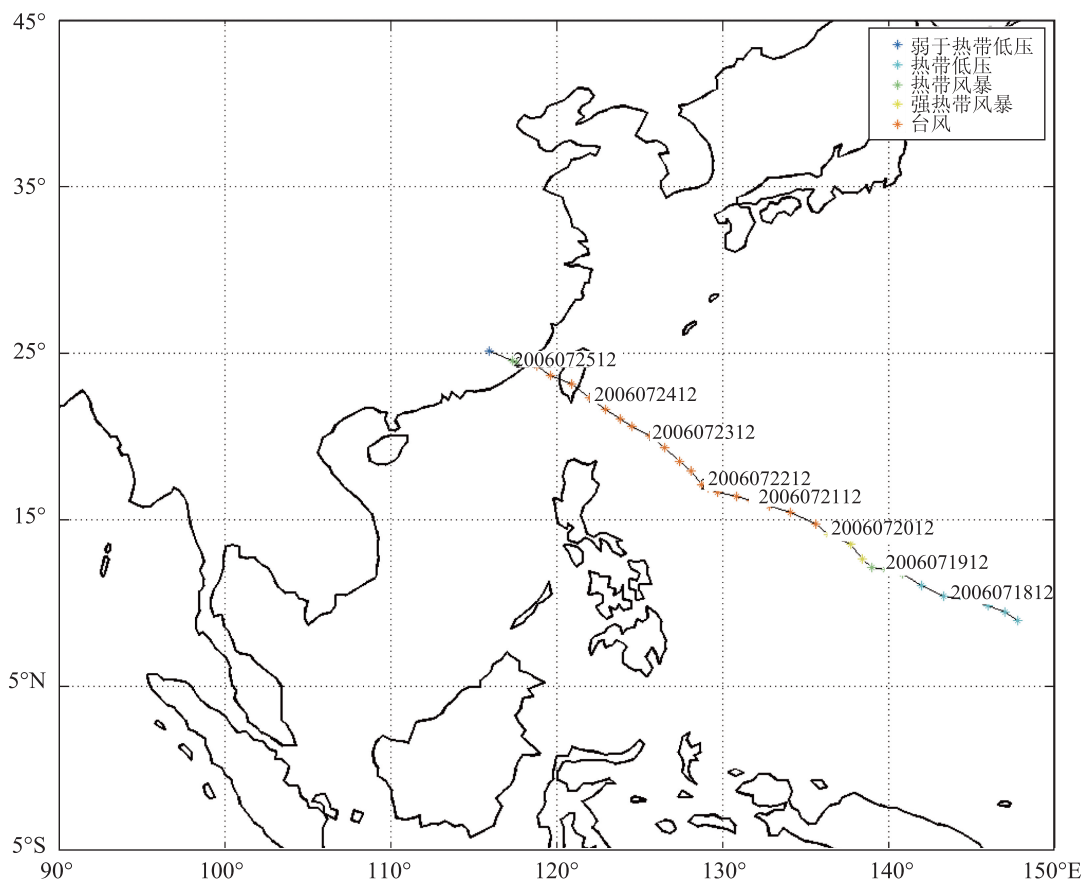


图1 2006年第5号台风“格美”路径图

(2006072512表示2006年7月25日12时)

2.2 地形数据及处理

模式所需地形来自 ETOPO2 (2-Minute Gridded Global Relief Data Collection) 全球地形数据集, 其分辨率为 $2' \times 2'$, 其中海岸线数据来自 GSHHS (A Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database) 全球高分辨率海岸线数据库。

地形处理: 本次台风过程共有两次登陆, 第一次发生在 24 日晚, 于台湾台东登陆; 第二次发生在 25 日下午, 于福建晋江金井镇登陆。围绕台风整体过程, 我们发现, 台风浪在巴士海峡及台湾海峡的传播过程当中受地形影响显著。粤东近海区域地形较浅, 受此地形影响, 波浪传播过程当中存在折射、绕射等现象。这对于台风浪的整体模拟是不可忽略的, 故我们在大区域上采用平滑后的地形, 以保证提供较为良好的侧边界条件。而在小区域中, 考虑到此次台风过程涉及到小地形, 故而采用三次样条插值的方式对浅海区域地形进行整理, 以平滑地形梯度较大的区域; 同时, 利用三次样条插值, 完善岛礁和地形的匹配, 以保证模式可以识别完整中国近海, 尤其是登陆区域附近完整的岛礁信息。

在对地形处理的过程中, 我们发现本次台风对我国南海的影响区域主要集中在粤东近海、台湾海峡、巴士海峡附近。这些区域存在地形陡变的特征, 海浪的折射、绕射往往与地形变化存在明显关系, 对于陡变地形来说, 数值模拟存在较大问题。故而, 在小区域上, 三次样条处理主要集中在粤东近海及台湾海峡周边海区 ($15^\circ \sim 30^\circ \text{N}$) 间水深低于 200 m 或地形梯度大于 1° 的地方, 嵌套小区域内的其余地方仅对地形梯度大于 1° 的地方进行处理。在此给出处理后的中国海的海底地形 (见图 2)。

2.3 WW3 海浪模式

WW3 (WaveWatch-III) 模式是在 WAM 的架构下, 由美国 NOAA/NCEP (National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centres for Environmental Prediction) 环境模拟中心海洋模拟小组开发的一个全谱空间的第三代海浪模式。其以 N (二维波作用量) 代替 E (能谱密度) 来描述波浪场。 $N = E/\sigma$, σ 为相对频率。WW3 模式通常用于大洋, 对谱型做事先假定^[10]。本文中 WW3 以

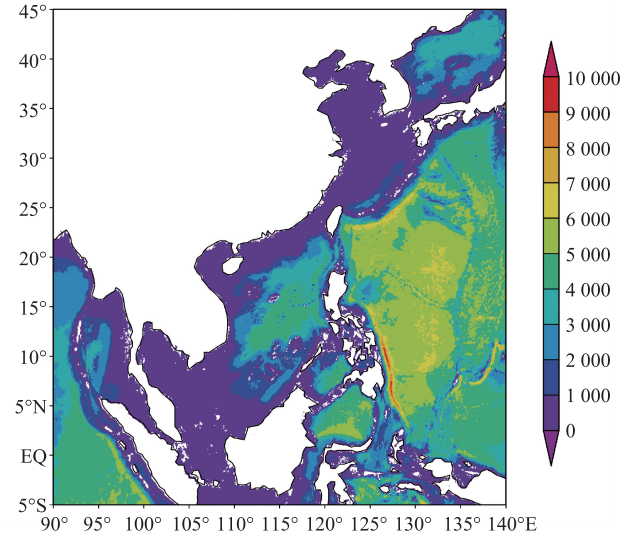


图2 中国近海海底地形图(单位:m)

JONSWAP 谱初始化。

在球坐标系下, 欧拉形式的控制方程可写为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{\cos \phi} \frac{\partial}{\partial \phi} \dot{\phi} N \cos \theta + \frac{\partial}{\partial \lambda} \dot{\lambda} N + \frac{\partial}{\partial k} \dot{k} N + \frac{\partial}{\partial \theta} \dot{\theta}_g N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

$$\dot{\phi} = \frac{c_g \cos \theta + U_\phi}{R} \quad (2)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{c_g \sin \theta + U_\lambda}{R \cos \phi} \quad (3)$$

$$\dot{\theta}_g = \dot{\theta} - \frac{c_g \tan \phi \cos \theta}{R} \quad (4)$$

式(1)为控制方程, 其左边第一项为波作用量随时间的局地变化, 第二、三项代表波作用量在地理空间上的传播, 第四项是频移项, 主要由水深和流速的变化产生, 第五项是由水深和流引起的折射。控制方程右边的 S 是源函数项: $S = S_{in} + S_{dis} + S_{nl} + S_{bot}$, 式中: S_{in} 为风能输入, S_{dis} 为白冠破碎引起的能量耗散, S_{nl} 为波-波相互作用引起的非线性能量传输, S_{bot} 为底摩擦引起的能量耗散。 R 为地球半径, θ 为波向, U_λ 和 U_ϕ 是平均海流在经度 λ 和纬度 ϕ 方向上的分量, c_g 为群速度。

郑崇伟等^[15]曾指出海浪具有“失忆”的特点, 因此在海浪模式的设置中, 通常有两种方法可以消除边界效应: (1) 模式嵌套, (2) 在需要的区域上将范围扩大, 最后从模拟数据中截取所需要的范围。本文在此采用第二种方法。计算空间范围: $0^\circ \sim$

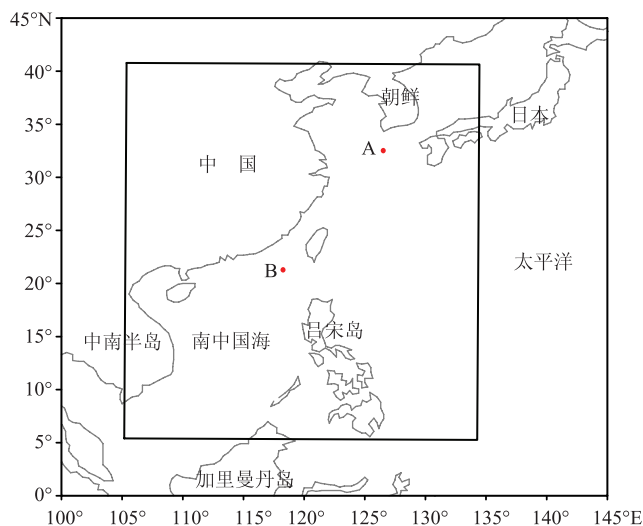


图3 数值模拟的范围(大区域)及关注的区域(小区域)
(A为济州岛浮标站,B为东沙岛浮标站)

45°N, 100°~145°E(最后从模拟数据中截取5°~41°N, 105°~135°E, 见图3)。空间分辨率取 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 计算时间步长取为600 s, 每小时输出一次结果, 计算时间为2006年7月20日00时—2006年7月31日18时。

3 水深处理前后的海浪模拟效果对比

3.1 海浪场的整体对比

图4是两次试验各个时次的对比图, 由于研究区域受台风影响, 在图中, 我们统一同一时刻的海浪图的色标, 其中图a是对地形未作处理的试验(对比试验), 图b试验采用上述方案处理地形的试验。23日14时, 台风位于菲律宾北端偏西区域, 从图中看两个试验台风浪场是较为相似的, 两个试验模拟出的浪向是一致的, 此外, 波高分布在低值区域也是相似的, 而高于3 m的波高则存在部分差异, 在大浪区, 地形修改的试验与对比试验相比有, 波高分布存在间断。

20时, 两个试验模拟的浪场分布形态依然较为接近, 从大浪分布的区域和浪高来看, 台风浪场有所增强, 相对于对比试验, 右侧试验中心波高和区域都较对比试验有所增强, 而断裂部分也有所发展。此时, 两个试验的浪向分布仍然较为一致。

至24日08时, 台风中心位置位于台湾岛南端

偏西处, 而此时, 两个试验模拟的浪场浪向分布开始分布产生了明显的差异: 对比试验模拟的浪向相比于右侧试验在南沙海域、粤东海区存在明显向岸分布, 这些位置的波高显著增大, 与台风风场不能很好的匹配。对比试验模拟的浪场波高分布与右侧试验相比显得较大, 高值区域分布并不匹配台风风场。

24日20时, 台风中心位置靠近台湾岛, 此时, 由于台湾岛的大地形影响, 台风风场减弱, 对比试验模拟的海浪浪向与风向差异较大, 在经度115°偏南区域, 对比试验模拟的浪向显著向南偏折, 而偏北区域则向北偏折, 粤东海区仍然存在明显的向岸浪向分布。台风浪场大致分布区域存在于南沙海区、粤东海区、以及台湾岛北侧海区, 而台风中心位置附近区域海浪分布则较小。此时, 对比试验已经不能很合理的描述台风的波高和浪向分布, 且大致区域模拟的偏高, 与实际浪高相比显得不是很合理。相比而言, 右侧试验模拟的波高和浪向均较为合理。

3.2 模拟海浪结果的定量对比

通过图4可以定性地对分析地形处理前后模拟海浪数据的效果。在此将模拟海浪数据与观测海浪数据对比, 通过计算相关系数(Correlation Coefficient, CC)、均方根误差(Root Mean Square error, RMSE)、偏差(Bias)、平均绝对误差(Mean Absolute Error, MAE), 定量地分析模拟海浪数据的有效性。

相关系数(CC)定义为:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

均方根误差(RMSE)定义为模拟值与观测值之差的均方根:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (6)$$

偏差(Bias)定义为模拟数据的平均值和观测数据的平均值之差:

$$Bias = \bar{y} - \bar{x} \quad (7)$$

平均绝对误差(MAE)定义为:

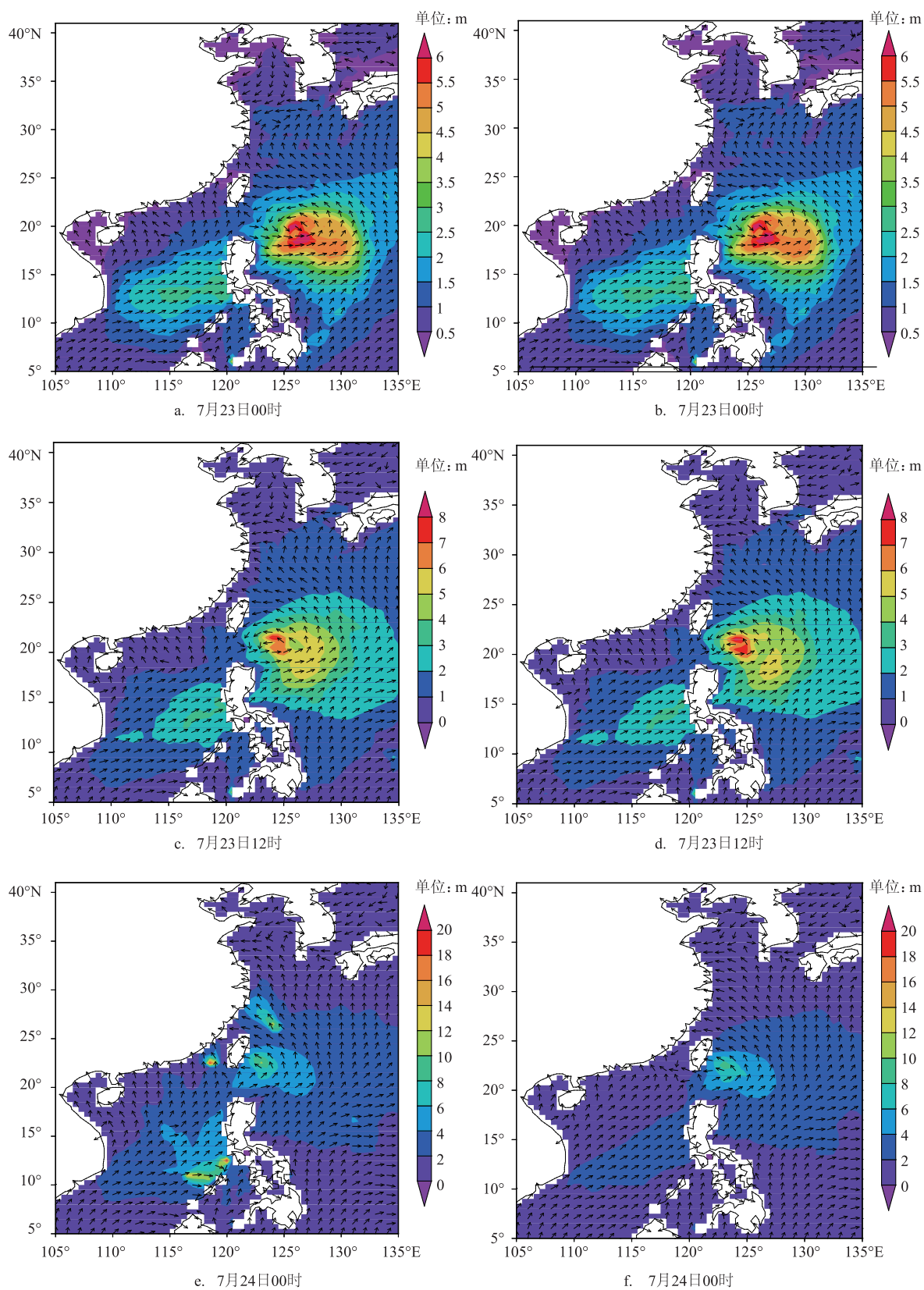


图4 2006年7月地形未经处理的海浪场(左)、地形处理后的海浪场(右)

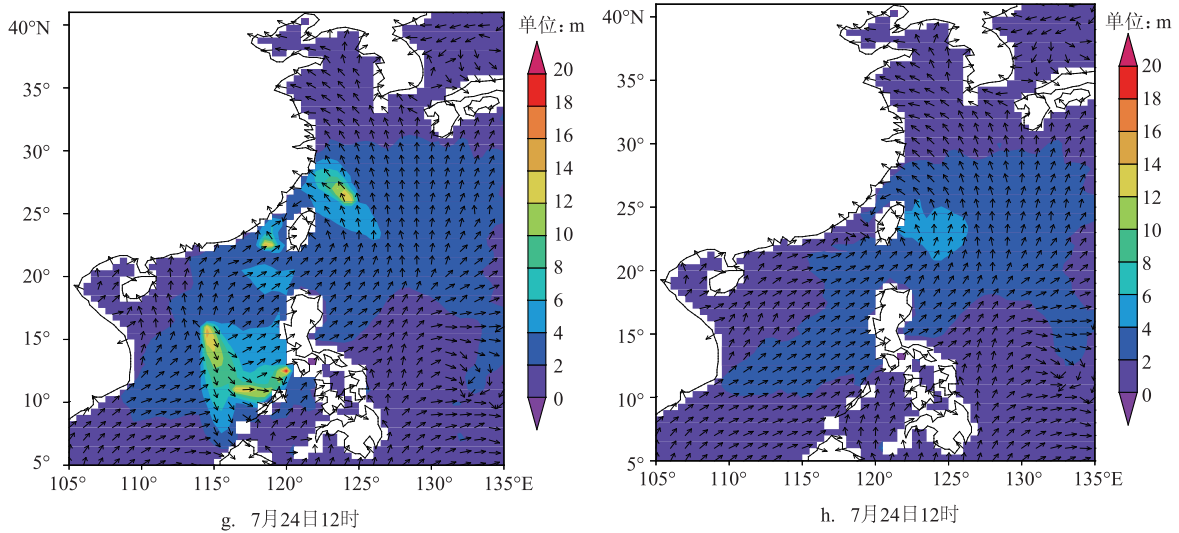


图4 (续)

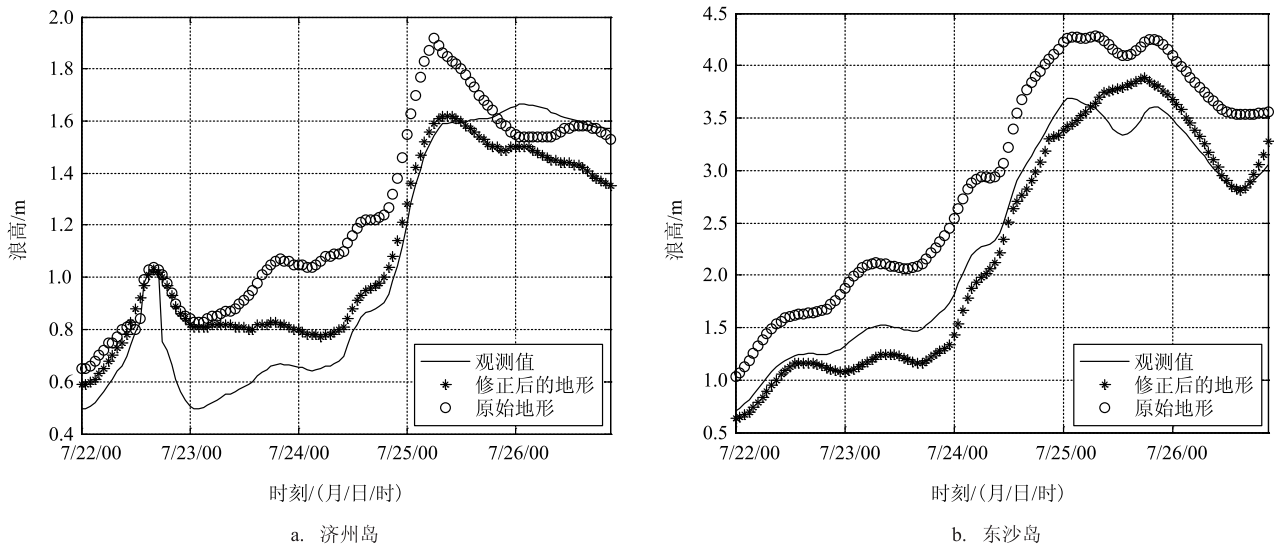


图5 2006年7月模拟海浪数据过程曲线

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |y_i - x_i| \quad (8)$$

式(5)—(8)中: x_i 代表观测数据, y_i 代表模拟数据, \bar{x} 和 \bar{y} 分别为观测数据的均值和模拟数据的均值, N 为样本总量。

在此,我们选用了东沙岛和济州岛浮标站的观测浮标数据与模拟浪高数据进行了比对(见图5),比对时段为图3所示时段,输出间隔1 h,对比结果表明改进地形后的模式在模拟过程中,有效的去除了模拟过高的现象。同时,对于模拟结果的分散性也有所改进,这在两个模拟结果的偏差、均方根误

表1 模拟结果对比

地点	模式结果	CC	RMSE/m	Bias/m	MAE/m
济州岛	地形处理	0.954 9	0.162 6	0.056 4	0.141 4
	地形未处理	0.900 1	0.270 9	0.203 6	0.230 8
东沙岛	地形处理	0.976 6	0.234 9	-0.083 9	0.206 0
	地形未处理	0.896 9	0.603 4	0.593 3	0.593 3

差和平均绝对误差上均有体现(见表1)。除此之外,改进后的模拟数据与观测的相关性显著提高,相关误差统计量明显降低。

4 结论

海浪作为海洋表层最为活跃的海洋要素分布,对人类在海上活动有着巨大的影响。在近岸浅水区域,海浪不仅受到风场的影响,还受到地形的影响,这种影响的效果体现为海浪的折射和绕射。对于近岸和浅水区域的海浪模拟,地形和网格的处理显得尤为重要,本文采用三次样条插值和平滑的方式处理地形,利用QN混合风场驱动WW3海浪模式,模拟了2006年7月发生在中国近海的一次台风浪过程。通过对比发现,地形修改处理后的试验可以更好的模拟台风浪场,期望该方案可以为海浪预报的业务化运行提供参考。

参考文献

- [1] Zheng C W, Li C Y. Analysis of temporal and spatial characteristics of waves in the Indian Ocean based on ERA-40 wave reanalysis[J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 63: 217-228.
- [2] 郑崇伟, 游小宝, 潘静, 等. 钓鱼岛、黄岩岛海域风能及波浪能开发环境分析[J]. *海洋预报*, 2014, 31(1): 49-57.
- [3] 郑崇伟, 李崇银. 中国南海岛礁建设: 重点岛礁的风候、波候特征

- 分析[J]. *中国海洋大学学报*, 2015, 45(9): 1-6.
- [4] 郑崇伟, 潘静, 孙威, 等. 经略21世纪海上丝路之海洋环境特征系列研究[J]. *海洋开发与管理*, 2015, 32(7): 4-9.
- [5] 毛科峰, 陈希, 李妍, 等. 琉球群岛海域海浪数值计算地形处理效应及试验分析[J]. *海洋科学*, 2010, 34(11): 91-96.
- [6] 郑崇伟, 李崇银, 杨艳, 等. 巴基斯坦瓜达尔港的风能资源评估[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2016, 55(2): 210-215.
- [7] 郑崇伟, 高悦, 陈璇. 巴基斯坦瓜达尔港风能资源的历史变化趋势及预测[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(4): 617-626.
- [8] 李明悝, 侯一筠. 利用QuikSCAT/NCEP混合风场及WAVEWATCH模拟东中国海风浪场[J]. *海洋科学*, 2005, 29(6): 9-12.
- [9] 丁赞. QuikSCAT/NCEP混合风场资料在海上风资源评估中的应用[J]. *水电与新能源*, 2011, (2): 69-71.
- [10] 梅婵娟, 赵栋梁, 史剑. 两种海浪模式对中国黄海海域浪高模拟能力的比较[J]. *海洋预报*, 2008, 25(2): 92-98.
- [11] 张德天, 郑崇伟, 石岭琳, 等. 基于QuikSCAT/NCEP风场的1999-2009年中国海表风场研究[J]. *海洋预报*, 2011, 28(4): 58-64.
- [12] 梅勇, 宋帅, 周林. 北印度洋—南海海域海浪场、风场的年际变化特征分析[J]. *海洋预报*, 2010, 27(5): 27-33.
- [13] 徐艳清, 尹宝树, 杨德周, 等. 东中国海海浪数值模式的研究[J]. *海洋科学*, 2005, 29(6): 42-47.
- [14] 徐艳清. 东中国海海浪数值模拟及波候统计分析[D]. 青海: 中国科学院海洋研究所, 2005.
- [15] 郑崇伟, 邵龙潭, 林刚, 等. 台风浪对掠海飞行安全性的影响[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(3): 301-306.

Impact of topography on the simulation of ocean wave driven by typhoon

CHEN Chong-yang¹, MA Yun², XIA Shen-ning³, CHEN Xuan⁴

(1. Naval University of Engineering, PLA, Wuhan 430033 China; 2. China Ocean News, Beijing 100031 China;

3. The 31010 Army of the PLA, Beijing 100081 China; 4. The 75839 Army of the PLA, Guangzhou 510510 China)

Abstract: Based on the third-generation wave model WW3, driven by the QuikSCAT/NCEP mixed wind field, a typhoon-wind wave in China's coastal waters in July 2006 was simulated. The topography and island reefs are smoothed by using cubic spline interpolation method. Comparing the effect of the original topography and the treated terrain on the numerical simulation of ocean waves, it is found that the treated terrain has played a positive role in enhancing the simulation effect of typhoon waves.

Key words: QuikSCAT/NCEP wind data; China seas; WW3 wave model; topography