研究论文 · Linn ARTICLE

台风"灿鸿"影响下海浪的数值模拟研究

杜 艳¹, 刘国强¹, 何宜军¹, 韩 雪²

(1. 南京信息工程大学 海洋科学学院, 江苏 南京 210044; 2. 江苏省海涂研究中心, 江苏 南京 210036)

摘要:台风是影响中国黄东海的强天气现象,其引起的强风、巨浪和台风增水严重威胁着沿海地区人民的生命与财产安全。本文以海浪模式 SWAN(Simulating Waves Nearshore)与区域海洋模式 ROMS (Regional Ocean Modeling System)为基础,构建了中国黄东海海域在 201509 号台风"灿鸿"影响下的海浪-海洋耦合模式。通过浮标与 Jason-2 高度计有效波高数据验证了模式结果的准确性。进行了敏感性实验分析,对比耦合(ROMS+SWAN)与非耦合(SWAN)下以及使用不同地形数据(ETOPO1、ETOPO2、GEBCO)、不同物理参数化方案(风能输入、白冠耗散、底摩擦耗散)下的模拟结果差异。结果发现在射阳与前三岛浮标处,使用 GEBCO 地形数据(15 弧秒间隔)下的模拟效果更好且稳定。在空间分布上,台风中心附近的浪流相互作用显著,在其前进方向右侧表现为耦合的有效波高值低于非耦合有效波高值,差值最高可达 1 米。选择不同风输入与耗散项方案时的模拟差异主要发生在最大波高处,选择不同的风能输入与白冠耗散项方案带来的差异接近 0.4 米,而底摩擦项方案选择不同带来的差异接近 1 米。因而在模拟实际的海况时,需要综合考虑这些因素带来的影响,才能达到 SWAN 海浪模型最好的海浪模拟效果。

关键词: 台风浪; SWAN; ROMS; 耦合模式 中图分类号: P731 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2020)10-0012-11 DOI: 10.11759/hykx20191116001

海浪对沿海海洋工程和海洋渔业有重要影响, 海洋灾害中 90%来自海浪的破坏,特别是热带气旋 和台风引起的海浪^[1],台风强度高、移动速度快、轨 迹不规则,对沿海地区人民的生命和财产安全构成 巨大威胁(如强风、巨浪和台风增水)。风是产生和驱 动海浪的主要因素,而台风引起的台风浪波高最高 可达 20 多米^[2],尽管到达浅水区域后波高会迅速降 低,但是它对沿海地区的破坏力不可小觑。为了尽量 减少和减轻极端台风所造成的损害,确保海洋和沿 海工程项目的安全,需要对近海的台风、海浪等极端 环境因素进行细致的研究。

由于观测的难度较大,目前在对台风浪的研究 主要采用数值模式的方式。近岸浅海区域影响海浪 的因素很多,例如风、海流、地形等。海浪作为一种 海洋表面的运动,与海平面高度也是密切相关。为了 准确模拟海浪,还需要考虑风、海流、地形的相互作 用的影响。已有学者通过海浪模式对台风影响下的 海浪场进行数值模拟,目前应用较多的海浪模式主要 是 SWAN(Simulating Waves Nearshore)、WAM(Wave Modeling)、WW3 (WAVEWATCH III)。Ou 等^[3]利用 SWAN 模拟台湾沿岸海域的台风浪,发现模拟效果 较好。Moon等^[4]使用高分辨率WW3模式模拟台风作用下的海浪谱特征,也发现数值模拟结果与观测数据吻合较好。相较适用于大洋等深水条件下的WAM和WW3模式,SWAN模式更适用于近岸海域浅水条件下的模拟。如王道龙^[5]利用SWAN模式模拟了辽东湾近岸水域的海浪,其在浅水复杂地形下的模拟结果比较好。SWAN可以输出不同海浪要素(如有效波高、平均波周期、波向、涌浪等)的场数据、线数据以及点数据,可以输出二维能量谱,并且可以进行嵌套以达到对精细化网格区域的模拟^[6-7],也可与其他模式进

收稿日期: 2019-11-16; 修回日期: 2020-03-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41506028); 江苏省青年科学基金 (BK20150913);国家重点基础研究发展计划项目(2016YFC1401407); 全球变化与海气相互作用专项项目(GASI-IPOVAI-04);南京信息工程 大学人才启动基金

[[]Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41506028; Jiangsu Youth Science Foundation, No. BK20150913; National Basic Research Program of China, No. 2016YFC1401407; Global Change and Air-Sea Interaction Project, No. GASI-IPOVAI-04; Nanjing University of Information Science and Technology Research Foundation for Advanced Talents]

作者简介:杜艳(1995-), 女, 江苏泰州人,硕士生,研究方向为台风浪数值模拟, E-mail: 924936252@qq.com; 刘国强,通信作者,教授,研究方向为大气-海浪-海洋-冰边界层动力与耦合模式开发与应用、次中尺度过程、上层海洋动力过程, E-mail: Guoqiang.Liu@dfo-mpo.gc.ca

行耦合[ROMS(Regional Ocean Modeling System)、 WRF(Weather Research and Forecasting Model)等]^[8-9], 综合考虑风、浪、流三者的相互影响。目前 SWAN 海 浪模式常被用于研究台风影响下的海浪场及海洋要 素特征,以及海浪场对不同强度、移动速度、对称性 下台风的响应情况。如 Drost 等^[10]利用海浪模式 SWAN 和浮标观测资料,研究了澳大利亚西北陆架在 热带气旋作用下海面波场的响应,发现热带气旋的移 动速度与最大有效波高和波场不对称性之间存在着 正相关关系。Liu 等^[11]通过 SWAN 模式,量化了风场 分布、风暴平移速度和强度对海浪场的影响。

影响 SWAN 模式的因素有很多, 诸如风场的选择、 海流的影响、SWAN 模式中不同能量输入与耗散项方案 等。海浪模拟需要准确的风场资料输入[12-13],通常利用 数据同化模式获得的长期再分析风数据(如 NCEP, ECMWF, NASA, JRA 等)或风场模型(如 Holland^[14]等)作 为输入风场。海流对浪的影响也尤为重要[15-16] 特别是 在近岸浅水区域受到的影响更为显著[17],已有的研究 也验证了在海浪模拟中采用浪-流耦合模式的结果会更 符合实测情况^[18]。SWAN 模式中不同物理参数化方案的 选择也会对结果产生影响。尹洪强等人^[19]基于 SWAN 模式分析了南海台风浪的变化过程,同时考虑了 SWAN 模式设置及风场选择对模拟研究的影响。罗浩等^[7]结合 WRF 模式,通过改变 SWAN 模式中风输入项以及白冠 耗散项方案,提高了 SWAN 模式在渤海湾的适用性。应 王敏等^[20]利用 SWAN 模式与高分辨率 CCMP 风场结合, 对台风"灿鸿"登陆时的中国东南沿海海浪场变化的研 究中,考虑了底摩擦、波浪破碎、风输入指数增长、白 冠耗散对模拟的影响,发现参数化方案的选择会对模拟 结果产生影响, 主要在最大波高模拟值和变化曲率上产 生偏差。此外, SWAN 进行模拟时, 时间步长、网格分 辨率、角度分辨率以及冷热启动的选择也会对模拟结果 产生影响, Wu 等^[21]就发现当计算时间步长与风场相同 时,计算出的有效波高低于实测值。

我国近海处于太平洋西北部,夏季经常受到台风的侵袭。201509号台风"灿鸿"在西北太平洋洋面上生成,于2015年7月10日进入我国东海区域并沿西北向移动,并于7月11日17时左右在浙江舟山沿海一带登陆,登陆时中心附近最大风力达14级(45 m/s),中心最低气压为955 hpa;后沿东北方向穿过黄海,向朝鲜半岛移动,最后在朝鲜黄海南道沿海再次登陆。本文利用海浪模式 SWAN 与区域海洋模式 ROMS 耦合对台风"灿鸿"影响下的中国黄东

海区域进行海浪数值模拟研究。文章结构如下:第一 部分介绍海浪模式 SWAN、区域海洋模式 ROMS 及 耦合模式的设置。第二部分通过浮标数据与高度计 数据验证耦合模式结果。第三部分进行敏感性实验 分析。第四部分给出总结与讨论。

1 模式介绍及耦合模式设置

1.1 模式介绍

近岸浅海区域影响海浪的因素有很多,利用数 值模式可以综合考虑风速风向、浪-流相互作用及地形 对海浪的影响。本文采用 COAWST(Coupled-Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport)模式中的浪-流 耦合模式进行研究,利用 MCT 耦合器实现海浪模式 SWAN 和海流模式 ROMS 的耦合。MCT 耦合器采用 并行计算模式,通过简易快捷的方式实现子模式间 变量的传递与转换^[22]。浪-流耦合模式基于浪-流相互 作用理论,耦合器将流模式模拟出的流场与水位输 入进海浪模式,进行海浪场的模拟,然后将海浪模 式输出的海浪要素(例如波向、波长、有效波高、平 均波周期等)传递给流模式。这种要素交换在模式设 置的时间步长处进行,然后利用交换后的数据进行 计算,以此循环,最后得出模拟结果^[23]。

1.1.1 海浪模式 SWAN

SWAN模式作为第三代海浪模型,基于WAM模 式发展而来,但更适用于河口、湖泊和海岸等近岸浅 水条件下的海浪模拟。除了考虑WW3中物理过程外, SWAN包括了一些海浪传播因素,如浅水中的波浪 破碎、波浪绕射和底部摩擦,还包含能量耗散和地形 诱发的三相波波相互作用,可以用于计算浅水水域 的风浪、涌浪和混合波,给出海岸工程所需的各种重 要海浪参数,包括波高、波周期、波长、波速、波向、 波浪能量传播等。SWAN控制方程遵循动谱平衡方 程,采用线性随机表面重力波理论,笛卡尔坐标系 下可以写为^[24]:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial c_{g,x}N}{\partial x} + \frac{\partial c_{g,y}N}{\partial y} + \frac{\partial c_{g,\theta}N}{\partial \theta} + \frac{\partial c_{g,\sigma}N}{\partial \sigma} = \frac{S_{\text{total}}}{\sigma}, (1)$$

左一项表示时间上能量的局地变化,其中 N 是 作用密度谱,左二、三项表示波浪能量在二维地球空 间中的传播(x 和 y 空间上的传播速度分别为 c_{g.x}和 c_{g.y}),左四项表示地形深度变化和海流引起的波浪 折射(方向改变),左五项表示地形深度变化和海流 引起的频率改变^[25]。右边为代表物理过程的源项,包 括风能输入 S_{in}、底摩擦耗散 S_{ds,b}、三相波波相互作



用 S_{nl3} 、四相波波相互作用 S_{nl4} 、波浪破碎 $S_{ds,br}$ 、白 冠耗散项 $S_{ds,w}$ 等,可以表示为:

 $S_{\text{total}} = S_{\text{in}} + S_{\text{ds,w}} + S_{\text{ds,b}} + S_{\text{ds,br}} + S_{\text{nl3}} + S_{\text{nl4}}.$ (2)

1.1.2 区域海洋模式 ROMS

区域海洋模式 ROMS 目前有法国发展研究机构 (IRD)、罗格斯大学、加州大学洛杉矶分校三个版本(分 别为 Agrif、Rutgers、UCLA), ROMS 可以模拟多尺度 的海水运动,被广泛应用于区域海洋模拟及海洋动力 研究中。ROMS 模式是基于一个三维非线性、自由表 面的斜压原始方程模式,满足 Boussinesq 近似、流体静 力近似、流体不可压缩这三个近似假定^[26]。其垂向分 层采用的是地形坐标——"S"坐标系统,即垂向分层 的深度会随着水深而变化。ROMS 模式离散时用到的网 格为 C 网格,其差分方式为中心差分,具有二阶精度, 更满足质量守恒的条件。ROMS 的湍流参数化包括了经 典的 KPP、MY2.5、GLS 方案等。此外, ROMS 也提供 了多种模块,可以实现与多种模式的耦合,包括了 SWAN、WRF、海冰、生物地球化学、光学、沉积物和 泥沙等^[27]。本文中耦合模拟使用的是 Rutgers 版本。

1.2 耦合模式设置

本研究模拟区域为中国黄东海区域, 空间范围 为 27.2°—41.2°N, 117.2°—127.2°E。ROMS 水平网格 分辨率为 1/10°, 垂直方向分为 16 层。地形数据采用 GEBCO(The General Bathymetric Chart of the Ocean) 的 15 弧秒间隔地形数据,最大水深设为 2 000 m,最小 水深设为5 m,图1即为耦合模拟区域的地形图。初始 场和侧边界采用来自 HYCOM(Hybrid Coordinate Ocean Model, http://hycom.coaps.fsu.edu/thredds/catalog.html) 全球模拟数据提供的流场、水位、盐度和温度等数据^[28], 设置东南边界为开边界,潮汐由 TPXO8-ATLAS 的数 据提供。风场强迫场数据则由 CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)提供。从 NOAA-WW3 全球预报模 拟(ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves) 中提取 了代表有效波高 h_s 、峰值周期 t_p 和峰值方向 θ_p 的波参 数, 其空间分辨率为 0.5°, 时间分辨率为 3 h, 并应用 于 SWAN 的开放边界。SWAN 模式风场强迫同样使 用 CFSR 数据。在物理参数方案上考虑波浪破碎、底 摩擦耗散、白冠以及波波非线性相互作用(三相波波相 互作用、四相波波相互作用)等物理过程,其中风能输 入及白冠耗散项分别采用 Janssen 方案和 Komen 方案, 底摩擦项采用 JONSWAP 方案。在本文数值实验中, ROMS 模式采用 60 s 时间步长, SWAN 模式采用 180 s 时间步长,模式间每3600s交换一次数据。



Fig. 1 Bathymetry (m) of the study domain

2 模拟结果验证

本文模拟了台风"灿鸿"(编号 201509)过境当 月(2015 年 7 月)的海浪场,台风移动路径如图 2 所 示。使用浮标与高度计提供的有效波高数据相结合 来验证模拟结果,下文用于对比验证的模拟数据采 用的是 GEBCO 地形下的耦合模式的结果。





注:黑色实线代表台风灿鸿的移动路径,黑色实点为每6小时一次的台风中心位置(台风中心及路径信息参考 JTWC 及中国台风 网数据),黑色星号代表前三岛与射阳浮标站点位置(浮标数据来 自江苏省海涂研究中心)



2.1 浮标数据对比

本文选取江苏省海涂研究中心于黄海投放的射阳站和前三岛站两处浮标(如图 2)的有效波高数据进行验证,射阳站浮标(121°E,34°N)放置处水深22~23 m,前三岛站浮标(120°E,34.83°N)放置处水深 26 m,皆为近岸浅水浮标。将2015年台风"灿鸿"

登陆黄东海 7 月 7 日—13 日的有效波高数据进行对 比(图 3)。从图 3 中可以看出,模式模拟的有效波高 与浮标站点测得的有效波高比较吻合,且两站最大 波高出现在 7 月 12 日附近,射阳站有效波高均方根 误差为 0.264 2 m,前三岛站有效波高均方根误差为 0.264 6 m。



图 3 射阳与前三岛浮标实测有效波高与模式结果对比图 Fig. 3 Time series of modeled and measured significant wave heights at Qiansandao and Sheyang buoys

2.2 遥感数据对比

遥感数据采用 Jason-2 高度计测得的有效波高数 据进行对比,沿轨数据间隔为每秒一个。选取了高度 计经过黄东海区域轨迹 138 和轨迹 229 的有效波高 数据以验证模拟结果。高度计经过黄东海时,轨迹 138 数据时间跨度为 2015 年 7 月 10 日 01 时 38 分至 41 分(台风过境前),轨迹 229 数据时间跨度为 2015 年 7 月 13 日 15 时 17 分至 19 分(台风过境后)。图 4 中可 以看出,耦合模式模拟的有效波高与 Jason-2 高度计的 观测结果比较吻合。7 月 10 日 01 时台风"灿鸿"的中 心位于(24.9°N, 126.9°E),属超强台风级,图 4a 右下角 区域处于"灿鸿"7 级风圈以内,有效波高高达 7~8 m。 图 4c 中,7 月 13 日 01 时由于台风在陆地登陆,至 15 时 台风基本消弥,图 4c 右上角区域有效波高降至 3 m。

3 敏感性实验分析

为获取更符合实际情况下的模拟结果,本文进行 了敏感性实验分析,主要研究使用耦合模式(ROMS 与 SWAN 耦合)与不使用耦合模式(只模拟 SWAN)的模拟 结果差别,采用3种不同地形数据(ETOPO1、ETOPO2、 GEBCO)的模拟结果差别,以及选用不同 SWAN 风能 输入与白冠耗散、底摩擦耗散方案的差别。

3.1 耦合与非耦合下的对比

海浪与海流是海洋中两种十分常见重要的动力 学过程,海流会显著影响海浪。根据已有的数值模式 研究可以发现,考虑浪-流相互作用下对有效波高的 模拟会更准确,尤其在有效波高峰值处,海流引起 的有效波高增大最大可达1m^[27]。在强流处,由于高 流速,有效波高变化更为明显,而且还会发生显著 的波浪折射^[16]。因此考虑到浪-流相互作用的影响, 本文对 SWAN 与 ROMS 耦合模拟结果以及只模拟 SWAN 的结果进行了对比,由图 5 可以看出,在射阳 站与前三岛站附近,流速主要在 0~0.6 m/s,除在最 大波高值附近,考虑海流作用后的模拟结果与不考 虑时差异不大,有效波高差值分别在 0~0.13 m 和 0~0.11 m之间波动。

针对耦合作用的空间分布情况,本文选取台风"灿 鸿"登陆中国黄东海海域 12 个时刻下(7月 10日 20时— 7月 12日 16时,每4小时一次,其中台风中心位置及 最大风速数据来源于中国台风网)耦合与非耦合有效 波高差值的分布情况(图 6),差值为耦合波高值减去 非耦合波高值。由图 6 中可见,台风中心附近浪流





相互作用明显,海流显著影响了有效波高在台风中心 附近的分布情况。在台风中心前进方向右侧象限,普 遍表现为耦合的有效波高低于非耦合有效波高,差值 大小与台风中心最大风速有关。图 6a—6e 中,台风强 度高,最大风速介于 48~55 m/s,差值最高可达 1 m, 且这种影响会随着台风的移动传播相当一段距离。

3.2 不同地形条件下的对比

热带气旋下海浪的时空分布特征不仅取决于热带气旋的风速、平移速度和路径等,在地形足够浅时,还受陆架和海岸地形特征的影响^[29-30]。海浪在浅水中会发生折射和破碎^[31],因此在近岸浅水区域,需要考虑到地形对模拟的影响。本文使用了三种地形

数据进行耦合模拟,分别是 ETOPO1、ETOPO2、 GEBCO数据,分辨率分别为1弧分、2分、15弧秒。 根据图 7 对比结果,在射阳、前三岛浮标站处, ETOPO2 地形数据下的模拟结果均偏高,使用 ETOPO1、GEBCO地形模拟的有效波高的均方根误差 分别为0.5897m、0.2642m和0.2192m、0.2646m。 可以看出在这两处浮标点,使用 GEBCO地形数据模 拟的结果相对更准确和稳定。此外,对文中这两处浮 标以及中科院海洋所浮标的实测水深(浮标地形数据 来源 http://msdc.qdio.ac.cn/)与三种地形数据下的水深 进行对比,发现 GEBCO 地形数据与实际浮标处水深 更接近,所以还是选用 GEBCO 地形数据进行模拟。





Fig. 5 (a) and (b) Comparison of significant wave heights between coupled and uncoupled simulations. (c) and (d) Time series of the corresponding current velocities at two buoys



图 6 7月 10日 20时至 7月 12日 16时耦合与非耦合模拟的有效波高差值分布情况

Fig. 6 Differences of simulated significant wave heights between coupled and uncoupled models from 20: 00 on July 10 to 16: 00 on July 12. The black mark indicates the typhoon center

注:黑色星号代表台风中心位置

Marine Sciences / Vol. 44, No. 10 / 2020





图 7 使用三种不同地形数据下的耦合模拟结果对比 Fig. 7 Comparison of modeled results using three terrain data

3.3 不同物理参数化方案下的模拟结果对比

海浪模式 SWAN 进行模拟时,物理参数化方案的选择会对模拟结果产生影响,需要进行敏感性分析,以获得最佳模拟效果的模式设置。Battjes^[32]针对影响 开阔大洋和沿海海域海浪演变的各种过程对各个影 响因素作了相对重要性的分析,影响近岸海浪的主要 因素有风能的输入、波波相互作用、白冠耗散、底摩 擦等。而 SWAN 模式主要考虑三种类型的耗散机制: 在深水情况,风浪的白冠耗散占主要地位,控制谱高 频部分的饱和程度;在中等深度和浅水情况下,底摩 擦变得重要;但当波浪传到浅水破碎带附近时,水深 变浅引起的波浪破碎占主要地位。

3.3.1 风能输入与白冠耗散项

风是产生和驱动海浪的主要因素,在风持续强迫 作用下产生风浪并使风浪不断发展时,最终会由于波 陡变大而导致海浪破碎,海浪破碎时将大量空气卷入 水中形成白冠。白冠耗散是由于波浪破碎而引起的能 量损失,在 SWAN模式中作为一个源项存在。白冠耗 散和风能输入对风浪成长起着重要作用,SWAN模式 中采用的是第三代(GEN3)风输入指数增长、白冠破碎 项能量耗散模式。GEN3模式有三种常用的风输入指 数增长和白冠破碎项能量耗散的参数化方案^[33]:默 认设置的 Komen 方案(KOM)、Janssen 方案(JAN)和 Westhuysen方案。Komen 方案和 Janssen 方案直接来 源于第三代海浪模式 WAM,在早期版本的 SWAN模 式中已经广泛应用,其不同点在于指数增长项部分, Komen 是根据海上观测提出的经验公式,Janssen 是根 据临界层机制提出的参数化, Westhuysen 方案是通过 修改模式中已有的参数化方案而得到。

本文对 SWAN 模式物理参数化方案中的风能输入 以及白冠耗散项的选择采取了分组对比,分别采用 JAN+KOM(即风能输入采用 JAN 方案,白冠耗散采用 KOM 方案)、JAN+JAN、KOM+JAN、KOM+KOM 这 四种组合方式,此时底摩擦参数项均使用 JONSWAP 方案。图 8 描述了使用不同风能输入与白冠耗散方案 对有效波高的影响,可以看出不同的参数化方案对模 拟有效波高的影响主要集中在最大波高处,不同方案 之间的波高差值接近 0.4 m。根据表 1,在本文研究背 景下,使用 KOM+KOM 和 KOM+JAN 方案所得到的模 拟结果相对更接近浮标处的观测结果。

表 1 不同风能输入与白冠耗散方案下有效波高的均方根误差 Tab. 1 Comparison of root-mean-square errors between different wind energy inputs and whitecapping schemes

Tent while energy inputs and whitecapping schemes					
	JAN+KOM	JAN+JAN	KOM+JAN	KOM+KOM	
射阳站	0.264 2	0.216 9	0.207 9	0.214 0	
前三岛站	0.264 6	0.247 9	0.235 7	0.227 1	

3.3.2 底部摩擦项

SWAN 模式中底摩擦耗散有三种计算方式: JONSWAP(经验性模式 JON)、COLLINS(拖曳模式 COLL)、MADSEN(涡黏模式 MAD),分别由 Hasselmann^[34]、Collins^[35]、Madsen^[36]提出。本文分别采用这 三种底摩擦方案进行模拟,而风能输入与白冠耗散统 一采用 KOM+JAN 方案。由图 9 可以看出,不同底摩 擦参数下模拟的有效波高相差较大,差值接近 1 m,





图 8 使用四种不同风能输入与白冠耗散方案的结果对比

Fig. 8 Comparison of modeled results using four different wind energy inputs and whitecapping schemes



图 9 使用三种不同底摩擦参数方案的结果对比 Fig. 9 Comparison of modeled results using three different bottom friction schemes

主要是在最大波高处,而在中低波高处,也有比较 明显的差异。我们发现,MADSEN 方案下的有效波 高与实测值相比偏低,COLLINS 方案与 JONSWAP 方案相对更接近实测数据,且 JONSWAP 方案在较 低波高处模拟效果相对更好。结合表 2 不同方案下 的均方根误差,使用 JONSWAP 方案模拟效果相对 更好。

表 2 不同底摩擦耗散方案下有效波高的均方根误差 Tab. 2 Comparison of root-mean-square errors between different bottom friction schemes

	JONSWAP	MADSEN	COLLINS
射阳站	0.207 9	0.543 4	0.217 8
前三岛站	0.235 7	0.287 5	0.300 5

4 结论与展望

本文通过海浪模式 SWAN 与区域海洋模式 ROMS 对台风"灿鸿"影响下的中国黄东海海域的 海浪场进行了数值模拟研究,利用浮标观测数据与 Jason-2 遥感高度计数据对模拟结果进行了验证。本 文从三个方面对模拟进行了敏感性实验分析:分别 是耦合与非耦合模拟、使用不同地形数据、选择不 同物理参数化方案,可以得出以下结论:耦合 (SWAN+ROMS)与非耦合(SWAN)情况下,模拟的有 效波高主要在最大波高处有差异,在本次模拟研究 中,射阳与前三岛两浮标处流速较小,对浪的影响 不大;但结合耦合作用的空间分布情况来看,台风 中心附近的海流显著影响了有效波高的分布。在台

研究论文 · lim ARTICLE

风中心前进方向右侧, 普遍表现为耦合的有效波高 低于非耦合的有效波高, 差值大小与台风中心最大 风速有关, 最高可达 1 m, 且这种影响会随着台风的 移动传播相当一段距离。不同地形数据模拟下, GEBCO与 ETOPO1数据下的模拟结果更好, 且在这 两处浮标站, 使用 GEBCO 地形的结果更为稳定。 SWAN 模式中选择不同物理参数化方案对模拟结果 的影响也较大, 在风能输入与白冠耗散项部分, 模 拟结果的差异主要体现在最大波高的模拟, 差值接 近 0.4 m, 但在底摩擦项部分, 最大有效波高差异接 近 1 m, 对中低波高的模拟也有比较明显的影响。

因此,在模拟实际海域海况时尤其是在台风条 件下,需要综合考虑诸如地形、流、参数化方案这些 因素,通过分析对比选择更符合实际的模拟方案, 以便后续更好展开对台风影响下海浪场演变及分布 特征等研究。

参考文献:

- Rabinovich A B, Vilibic I, Tinti S. Meteorological tsunamis: Atmospherically induced destructive ocean waves in the tsunami frequency band[J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2009, 34(17-18): 891-893.
- [2] Wang D W, Mitchell D A, Teague W J, et al. Extreme waves under Hurricane Ivan[J]. Science, 2005, 309(5736): 896-896.
- [3] Ou S H, Liau J M, Hsu T W, et al. Simulating typhoon waves by SWAN wave model in coastal waters of Taiwan[J]. Ocean Engineering, 2002, 29(8): 947-971.
- [4] Moon I J, Ginis I, Hara T, et al. Numerical simulation of sea surface directional wave spectra under hurricane wind forcing[J]. Journal of Physical Oceanography, 2003, 33(8): 1680-1706.
- [5] 王道龙. 近岸海浪模式研究[D]. 青岛: 国家海洋局 第一海洋研究所, 2009.
 Wang Daolong. The research of coastal wave model[D].
 Qingdao: The First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, 2009.
- [6] 于游,邹丽,姜胜超,等.基于 SWAN 嵌套网格的台风浪数值模拟[C].第二十九届全国水动力学研讨会, 2018.

Yu You, Zou Li, Jiang Shengchao, et al. Simulating typhoon waves by nested SWAN wave model[C]. The 29th National Congress on Hydrodynamics, 2018.

[7] 罗浩. SWAN 模式渤海湾海浪数值模拟研究[D]. 天 津: 天津大学, 2012.
Luo Hao. Research on numerical simulation wave in bohai bay by SWAN model[D]. Tianjin: Tianjin Uni-

- [8] 谭凤,张庆河,庞启秀,等.基于 WRF-SWAN 模式 的韦帕台风波浪场模拟[J].水道港口, 2012, 33(1): 14-18.
 Tan Feng, Zhang Qinghe, Pang Qixiu, et al. Numerical
 - simulation of WIPHA typhoon waves using WRF-SWAN model[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2012, 33(1): 14-18.
- [9] Kukulka T, Jenkins R L, Kirby J T, et al. Surface wave dynamics in Delaware Bay and its adjacent coastal shelf[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(11): 8683-8706.
- [10] Drost E J F, Lowe R J, Ivey G N, et al. The effects of tropical cyclone characteristics on the surface wave fields in Australia's North West region[J]. Continental Shelf Research, 2017, 139: 35-53.
- [11] Liu H, Xie L, Pietrafesa L J, et al. Sensitivity of wind waves to hurricane wind characteristics[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(1): 37-52.
- [12] Bennett V C C, Mulligan R P. Evaluation of surface wind fields for prediction of directional ocean wave spectra during Hurricane Sandy[J]. Coastal Engineering, 2017, 125: 1-15.
- [13] Shao Z, Liang B, Li H, et al. Blended wind fields for wave modeling of tropical cyclones in the South China Sea and East China[J]. Applied Ocean Research, 2018, 71: 20-33.
- [14] Holland G J. An analytic model of the wind and pressure profiles of hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [15] Rusu L, Bernardino M, Soares C G. Modelling the influence of currents on wave propagation at the entrance of the Tagus estuary[J]. Ocean Engineering, 2011, 38(10): 1174-1183.
- [16] Wandres M, Wijeratne E M S, Cosoli S, et al. The effect of the Leeuwin Current on offshore surface gravity waves in southwest Western Australia[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2017, 122(11): 9047-9067.
- [17] 贾岩, 尹宝树, 杨德周. 东中国海浪流相互作用对水 位和波高影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2009, 33(8): 82-86.
 Jia Yan, Yin Baoshu, Yang Dezhou. 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.

[18] 桂祈军,沙文钰. 黄渤海春季浪流耦合数值模拟[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, (1): 71-75. Gui Qijun, Sha Wenyu. Numerical simulation of coupling wave-current in Huang-hai and Bo-hai sea in spring[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2005, (1): 71-75.

versity, 2012.

研究论文 • <u>Iim</u> ARTICLE

- [19] 尹洪强. 基于 SWAN 模式下南海台风浪的推算[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
 Yin Hongqiang. Typhoon wave forecast in the South Sea by SWAN model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [20] 应王敏,郑桥,朱陈陈,等. 基于 SWAN 模式的"灿鸿" 台风浪数值模拟[J]. 海洋科学, 2017, 41(4): 108-117. Ying Wangmin, Zheng Qiao, Zhu Chenchen, et al. Numerical simulation of "CHAN-HOM" typhoon waves using SWAN model[J]. Marine Sciences, 2017, 41(4): 108-117.
- [21] Wu Z Y, Jiang C B, Deng B, et al. Evaluation of numerical wave model for typhoon wave simulation in South China Sea[J]. Water Science and Engineering, 2018, 11(3): 229-235.
- [22] 孙一妹,费建芳,程小平,等. WRF_ROMS-1.2 中尺 度海气耦合模式简介[J]. 海洋预报, 2010, 27(2): 82-88.
 Sun Yimei, Fei Jianfang, Cheng Xiaoping, et al. Introduction of mesoscale air-ocean coupled model: WRF_ ROMS-1.2[J]. Marine Forecasts, 2010, 27(2): 82-88.
- [23] Warner J C, Sherwood C R, Signell R P, et al. Development of a three-dimensional, regional, coupled wave, current, and sediment-transport model[J]. Computers and Geosciences, 2008, 34(10): 1284-1306.
- [24] Holthuijsen L H. Waves in Oceanic and Coastal Waters[M]. Cambridge University Press, 2007.
- [25] 肖文军, 丁平兴, 胡克林. 潮汐和流影响下长江口波 浪场数值计算[J]. 海洋工程, 2008, 26(4): 45-52.
 Xiao Wenjun, Ding Pingxing, Hu Kelin. Numerical calculation of wave fields with tide and currents in Yangtze estuary[J]. The Ocean Engineering, 2008, 26(4): 45-52.
- [26] Shchepetkin A F, Mcwilliams J C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model[J]. Ocean Modelling, 2005, 9(4): 347-404.
- [27] 刘娜, 李本霞, 王辉, 等. 西北太平洋浪流相互作用

对有效波高的影响研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(9): 21-31.

Liu Na, Li Benxia, Wang Hui, et al. A study of the influence of wave-current interaction on significant wave height in the Northwestern Pacific[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(9): 21-31.

- [28] Warner J C, Armstrong B, He R, et al. Development of a Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COASWST) modeling system[J]. Ocean Modelling, 2010, 35(3): 230-244.
- [29] Wright C W, Walsh E J, Vandemark D, et al. Hurricane directional wave spectrum spatial variation in the open ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(8): 2472-2488.
- [30] Walsh E J, Wright C W, Vandemark D, et al. Hurricane directional wave spectrum spatial variation at landfall[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 32(6): 1667-1684.
- [31] Chen S, Curcic M. Ocean surface waves in Hurricane Ike (2008) and Superstorm Sandy (2012): Coupled model predictions and observations[J]. Ocean Modelling, 2015, 103(5): 161-176.
- [32] Battjes J A. Shallow water wave modelling[C]. Waves -Physical and Numerical Modelling, 1994: 1-23.
- [33] Mulligan R P, Bowen A J, Hay A E, et al. Whitecapping and wave field evolution in a coastal bay[J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(C3): C03008.
- [34] Hasselmann K, Barnett T P, Bouws E, et al. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)[J]. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, 1973, A8(12): 1-95.
- [35] Collins J I. Prediction of shallow-water spectra[J]. Journal of Geophysical Research, 1972, 77(15): 2693-2707.
- [36] Madsen O S, Poon Y K, Graber H C. Spectral wave attenuation by bottom friction: theory[C]. 21th International Conference on Coastal Engineering, 1988: 492-504.



Numerical simulation of typhoon waves under the influence of Typhoon "Chan-Hom"

DU Yan¹, LIU Guo-qiang¹, HE Yi-jun¹, HAN Xue²

(1. School of Marine Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Tidal Flat Research Center of Jiangsu Province, Nanjing 210036, China)

Received: Nov. 16, 2020 **Key words:** typhoon waves; SWAN; ROMS; coupled model

Abstract: Typhoon can cause catastrophic damages to the coastlines of the Yellow Sea and the East China Sea. In this study, the wave model Simulating Waves Nearshore (SWAN) and the Regional Ocean Modeling System (ROMS) are applied on the wave-ocean coupling simulations under the forcing of the typhoon Chan-Hom (201509) in the coastal regions of the Yellow Sea and East China Sea. The model results were validated by measured significant wave height (SWH) data from available buoys and altimeter onboard satellite Jason-2. Several sensitivity experiments were conducted to examine the difference in simulation results under different terrain data (ETOPO1, ETOPO2, and GEBCO); coupled and uncoupled models (SWAN + ROMS and SWAN); and different physical parameterization schemes (wind energy input, whitecapping, and friction dissipation). It was found that the modeled results using GEBCO topographic data (at 15 arc-second intervals) at the Sheyang and Qiansandao buoys are in agreement with the buoy measurements than using other topographic data. We found that the wave-current interaction near the typhoon center was significant. On the right side of the typhoon-advancing direction, the coupled significant wave height was lower than the uncoupled results, and the difference in the significant wave heights between coupled and uncoupled simulations can even reach 1 m. The differences between different physical parametric schemes occur mainly at the stage of highest wave height. The difference of wave heights between different wind energy inputs and whitecapping dissipation schemes can be close to 0.4 meters whereas the difference in wave heights between different bottom friction schemes can be approximately 1 m. Therefore, to achieve the best wave simulations of SWAN wave model under actual sea conditions, it is necessary to consider the effects of these factors.

(本文编辑:丛培秀)