

浙江沿海台风浪模式的参数适应性研究

季余¹, 朱业^{2*}, 李莉¹, 贺治国¹, 沈辉^{1,2}, 黎晓飞¹

(1. 浙江大学海洋学院 港口海岸与近海工程研究所, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江省海洋监测预报中心, 浙江 杭州 310000)

摘要: 基于第三代近岸海浪模型(Simulating Waves Nearshore, SWAN)和敏感性分析提出了适用于浙江沿海台风浪模拟的参数方案。选取近10 a影响浙江海域的37个台风进行数值模拟和误差分析,验证该参数方案下模型对不同强度和路径台风的适应性。结果表明,优选参数方案对各类台风浪的模拟效果良好,平均相对误差小于31%,对强台风型台风浪的模拟效果明显优于超强台风和台风,平均相对误差小于25%;对西北向型台风浪的模拟效果最好,平均相对误差小于30%。

关键词: 台风浪; 台风; 适应性分析; SWAN模式; 浙江沿海

中图分类号: P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)02-0022-10

0 引言

浙江省面临东海,海域面积达到26万平方公里,海岸线绵长,频繁遭受台风的袭击^[1]。在台风过程中,海面会出现大风、大浪、水位持续升高等现象^[2],给沿海建筑安全和社会经济发展带来威胁。由于实地测量海浪存在较多局限^[3],因此数值模拟是研究台风影响下沿海波浪特性和变化规律的重要手段。

近年来,第三代近岸海浪模型(Simulating Waves Nearshore, SWAN)被广泛应用于海浪数值模拟^[4-5]。目前,已有许多学者采用SWAN模式对浙江沿海的台风浪进行模拟和分析。黄世昌等^[6]分析了超强台风在浙江沿海产生的有效波高的分布特点,台风浪模拟误差为0.52~1.12 m。余墅幸^[7]将风暴潮模型计算结果作为输入潮位进行模拟,得到的5个台风期间有效波高的误差为0.6~0.9 m。杜艳等^[8]通过研究发现,在SWAN模式下采用不同地形数据和物理参数方案得到的模拟结果存在很大差异,其中在不同底摩擦方案下模拟的最大有效波高差接近0.4 m。郭敬等^[9]研究了1949—2016年南麂

岛在台风影响下的海浪分布情况。DU等^[10]研究发现台风路径的变化会对风暴潮产生显著影响。

已有的研究表明物理参数方案的选取会直接影响台风浪的模拟结果。为提高SWAN模式对浙江沿海台风浪模拟的准确性,学者对不同参数方案进行了模拟实验^[11-12]。目前研究发现,对SWAN模式模拟结果产生影响的关键参数包括波浪破碎、风能输入、白冠破碎项、波-波非线性相互作用和底摩擦耗散等。应王敏等^[13]对SWAN模式进行了多参数敏感性分析。郑桥^[14]研究了SWAN模式中的关键参数对台风浪和寒潮浪有效波高模拟结果的影响,在台风“灿鸿”、台风“摩羯”和台风“玛利亚”期间,台风浪模拟结果的平均绝对误差为0.3~0.4 m,不同风速下不同参数方案的模拟效果存在明显差异。HUANG等^[15]基于SWAN模式研究了飓风“Ike”期间不同风输入参数下的波浪模拟差异。XU等^[16]分析了台风“灿鸿”期间SWAN模式关键参数敏感度的时空变化,发现模式中参数的敏感性与水深密切相关。WU等^[17]研究了SWAN模式对白冠破碎系数的敏感性,发现系数 C_{ds} 与模拟波高值存在显著相关性。

收稿日期: 2022-01-14; 修回日期: 2022-04-28。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFE0206200); 浙江省重点研发项目(2021C03180)。

作者简介: 季余(1998-),女,硕士,主要从事海洋防灾减灾研究。E-mail:jyuzju@zju.edu.cn

*通信作者: 朱业(1979-),女,正高级工程师,硕士,主要从事海洋环境预报研究。E-mail:zhuye97@163.com

然而,现有研究主要基于单个或若干台风浪过程进行参数率定和敏感性分析,缺乏考虑不同强度和路径的台风影响的系统研究,且尚未证明模型参数方案的普适性。因此,本文利用2008—2021年影响浙江沿海的37个台风浪对参数方案的适应性开展研究,通过误差分析,探讨优化参数方案在不同路径和强度台风情境下的适应性和准确性,为我国沿海各类型台风浪的模拟和预报提供参考依据。

1 模型及方案设置

1.1 SWAN模式介绍

SWAN是由荷兰Delft大学开发的浅海风浪数值模型,现已被广泛运用于沿海和内陆水域波浪的数值模拟中。SWAN的控制方程为基于Euler近似的波作用量守恒方程^[18]。公式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} N + \frac{\partial}{\partial x} C_x N + \frac{\partial}{\partial y} C_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} C_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} C_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

式中:左边第一项表示波作用量密度随时间的变化率, N 代表波作用量密度;第二项与第三项表示波作用量密度在二维空间内的传播, C_x 和 C_y 分别代表在 x 和 y 方向上的传播速度;第四项表示流和变化的水深引起的频移, C_σ 为传播速度;第五项表示由流和变化的水深引起的传播方向改变, C_θ 为传播速度, θ 为传播方向; S 表示能量源函数项, σ 为相对频率。 S 可以表示为以下几项的和:

$$S = S_{in} + S_{ds} + S_{nl} \quad (2)$$

式中: S_{in} 代表风输入项; S_{ds} 包含了由风浪的白冠破碎、底部摩擦和浅水破浪破碎引起的能量耗散; S_{nl} 代表通过三波非线性相互作用和四波非线性相互作用的波能量传递^[19-20]。

1.2 模型设置

1.2.1 研究区域

本文选取的计算区域为东中国海,范围为 $11^\circ \sim 43^\circ \text{N}$, $114^\circ \sim 134^\circ \text{E}$,东边界和南边界设置为开边界,对重点研究区域浙江近海进行了加密处理(见图1)。网格由15 423个节点、29 193个三角形构成。

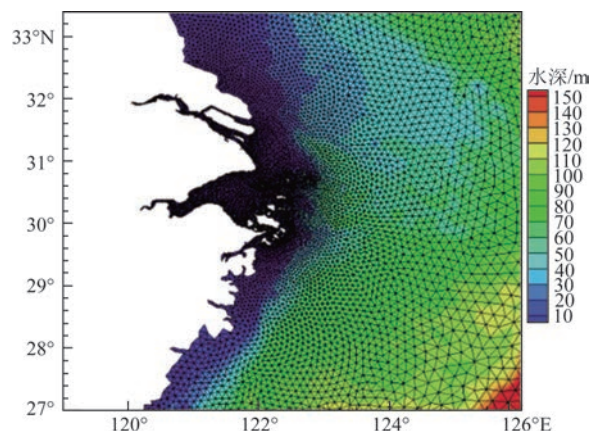


图1 重点研究区域网格示意图

Fig.1 The computational grid of the key study area

成。时间步长为20 min,离散频率范围为0.040 0~1.000 0 Hz。采用自然资源部东海局制作的东中国海水深数据,研究区域内最大水深约为6 000 m,最小水深约为11 m。

1.2.2 观测站点数据

本文在浙江沿海区域选择了5个浮标观测站,分别为朱家尖站、南麂站、大陈站、舟山外海站、温州外海站,图2为研究区域及各观测站的位置。各站点经纬度及水深数据见表1。

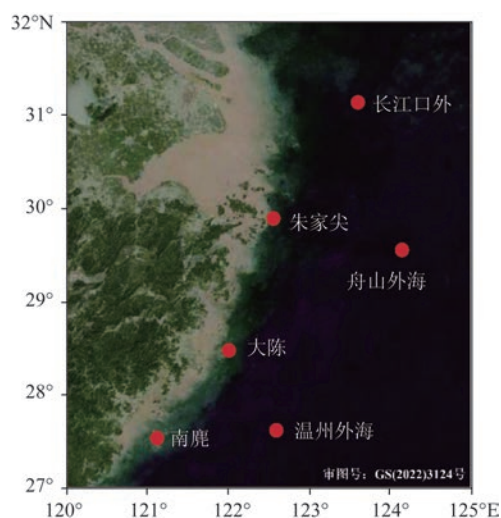


图2 观测站点示意图

Fig.2 Schematic diagram of observation sites

本文所用的站点数据为2008—2021年朱家尖、南麂、大陈、舟山外海、温州外海5个站点的海浪浮标观测数据。

表1 观测站点基本信息表

Tab.1 Basic information of observation sites

| 站点名称 | 经度/°E | 纬度/°N | 水深/m |
|-------|---------|--------|-------|
| 南鹿站 | 121.082 | 27.459 | 21.26 |
| 朱家尖站 | 122.427 | 29.894 | 9.08 |
| 温州外海站 | 122.500 | 27.500 | 91.44 |
| 大陈站 | 121.900 | 28.450 | 2.99 |
| 舟山外海站 | 123.965 | 29.500 | 69.44 |

1.2.3 输入风场数据

本文使用的风场数据为 CCMP (Cross-Calibrated Multi-Platform) 海面风场数据(来源: <http://data.remss.com/ccmp/v02.0/>)。CCMP 风场数据采用变分同化分析方法融合交叉校准卫星及浮标观测数据,构建了较高分辨率和时间精度的全球尺度海面风场数据,时间精度为 6 h,空间分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ [21]。

图3为超强台风“美莎克”期间浮标实测风速与 CCMP 风场数据对比图。整体而言,CCMP 风场数据与实测数据拟合较好,能较好地反映出风速的变化趋势,可满足模型的需要。

1.3 关键参数方案设置

除输入风场外,SWAN 模式中的波浪模拟主要受风能输入-白冠破碎、波浪破碎、底摩擦耗散、波-波非线性相互作用等参数影响。本文基于以上 4 种影响因素,采用不同参数方案,模拟了 2020 年 8 月 23 日—9 月 7 日在超强台风“美莎克”影响期间舟山外海站的波高情况,并结合实测数据进行敏感性分析。

SWAN 模式提供了 3 种风能输入模式,分别为 Komen、Janssen 和 Westhuysen 模式。SWAN 模式共考虑了 3 类耗散机制,分别为风浪的白冠破碎、底摩擦及浅水波浪破碎。在深水情况下波能耗散以白冠破碎为主;在中等水深情况下波能耗散以底摩擦为主;当波浪传到浅水破碎带时,能量耗散以波浪破碎为主。

白冠破碎导致的能量耗散可表示为:

$$S_{ds,w} = -\Gamma \bar{\sigma} \frac{k}{\tilde{k}} E(\sigma, \theta) \quad (3)$$

式中: Γ 为总波陡相关系数; $\bar{\sigma}$ 为平均频率; k 为波数; \tilde{k} 为平均波数; $E(\sigma, \theta)$ 为二维能谱密度。由于 Γ 受风输入项影响,因此在 SWAN 模式中风输入项和白冠破碎项通常可统一考虑,并根据可调系数的不同分为 Komen、Janssen 和 Westhuysen 3 种方案。

在底摩擦耗散项中,根据底摩擦系数 C_{bottom} 的不同可选 3 种模式,即 Jonswap(经验性模式)、Collins(拖曳模式)和 Madsen(涡黏模式)。底摩擦公式为:

$$S_{ds,b}(\sigma, \theta) = -C_{bottom} \frac{\sigma^2}{g^2 \sinh^2(kd)} E(\sigma, \theta) \quad (4)$$

式中: C_{bottom} 为底摩擦系数; σ 表示频率; g 表示重力加速度; k 表示波数; d 表示水深。

在波浪破碎项中,波浪破碎导致的每单位水面积能量耗散率 D 和最大波高 H_m 可表示为:

$$D = -\frac{1}{4} \alpha_{Bj} Q_b \left(\frac{\bar{\sigma}}{2\pi} \right) H_m^2 \quad (5)$$

$$H_m = yd \quad (6)$$

式中: $\alpha_{Bj} = 1$ (下标表示此常数最早由 BATTJES 和

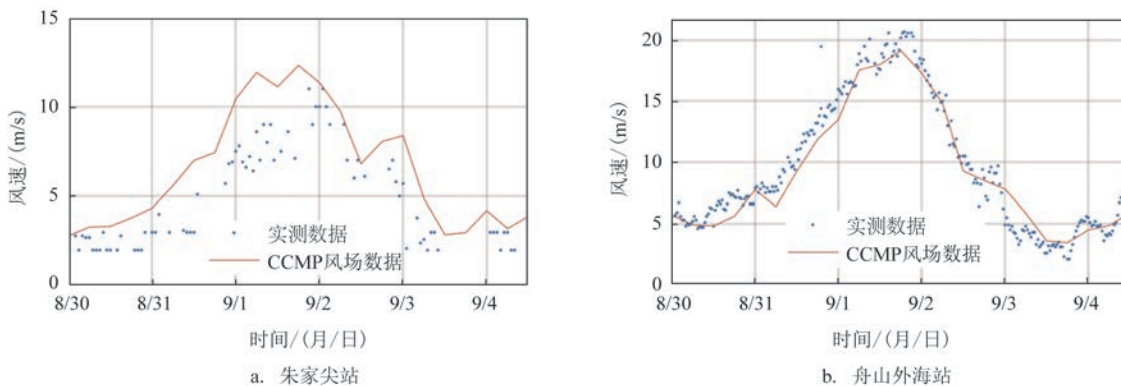


图3 台风“美莎克”期间 CCMP 风速与站点实测风速对比图

Fig.3 Comparison of CCMP wind speed and observed wind speed during typhoon "Maysak"

JANSSEN 提出); Q_b 表示破碎波系数; H_m 表示给定水深下的最大波高; γ 表示波浪破碎参数; d 表示水深。KAMINSKY 等^[22]通过大量实验数据分析证明 γ 的取值范围为 0.6~1.59, 平均值为 0.79。

SWAN 模式中包含四波非线性相互作用和三波非线性相互作用两种模式。深水中的能量传输以四波非线性相互作用为主, 而三波非线性相互作用引起的能量传输率在浅水情况中更为重要。

本文考虑以上 4 种物理过程参数对模拟结果的影响, 分别选取不同模式进行浪高模拟。参数方案设置见表 2。对风能输入-白冠破碎项, 采用 Komen、Janssen 及 Westhuysen 3 种模式; 对波浪破碎项, 波浪破碎参数 γ 选取 0.58~1.28; 对底摩擦耗散项, 采用 Jonswap、Collins 和 Madsen 3 种模式; 对波-波非线性相互作用项, 选择仅考虑四波非线性相互

作用、仅考虑三波非线性相互作用或两者均考虑。综合各物理过程的最佳参数或模式, 得到优选参数方案。

2 参数优化方案分析

本文通过模拟超强台风“美莎克”期间浙江沿海区域的台风浪, 对 SWAN 模式中的关键参数进行率定, 提出适用于浙江沿海波浪模拟的优选参数方案。由于文章篇幅原因, 结果分析以舟山外海站和朱家尖站为例。

2.1 不同参数方案结果分析

图 4a 和图 5a 表明, 对于不同水深站点, 风能输入-白冠破碎模式对波高模拟有较为显著的影响。3 种方案中, Janssen 方案模拟的波高在整个波浪周期中均偏高, 这种现象在深水站点更显著, 而且 Janssen 方案模拟的波高陡增时间均早于实测值。Westhuysen 方案模拟的波高极值均偏小, 且波高陡增时间略晚于实测值。在不同水深站点处, Komen 方案的模拟结果与实测数据的拟合性最好, 在波高极值和波高变化趋势的模拟方面表现优良。因此在该模式中选择 Komen 方案作为优选参数。

图 4b 和图 5b 显示了两站点选取不同波浪破碎参数时的模拟结果。结果表明, 波浪破碎参数的选取对波高模拟的整体影响较小, 水深减小时其影响略微增加, 且主要体现在波高极值处, 这是由于水深较大区域的波浪破碎参数对波能耗散的影响较小。在台风天气下, 模型对该参数并不敏感, 因此选取 KAMINSKY 等^[22]通过大量实验得到的波浪破碎平均值 0.79 为最优方案。

图 4c 和图 5c 还表明, 底摩擦耗散模式的调整对波高模拟的影响明显大于波浪破碎参数。这是由于在台风影响下, 站点水深较大, 波能耗散以底摩擦耗散为主。对比 3 种方案, 波高模拟的差异主要体现在波高极值处, 且随着水深减小, 差异增大。在 3 种方案中, Madsen 方案下的波高极值偏小, Collins 方案下的波高极值偏大, 因此选取 Jonswap 为优选方案。

由图 4d 和图 5d 可知, 在波-波非线性相互作用下, 不同水深站点和方案的模拟波高与实测波高没有明显差异, 模型对波-波非线性相互作用不敏感。

表 2 参数方案设置表

Tab.2 Parameter setting table

| 物理过程 | 工况 | 模式或参数选择 |
|------------|------|---------------|
| 风能输入-白冠破碎 | 1-1 | Komen |
| | 1-2 | Janssen |
| | 1-3 | Westhuysen |
| 浅化引起的波浪破碎 | 2-1 | $\gamma=0.58$ |
| | 2-2 | $\gamma=0.63$ |
| | 2-3 | $\gamma=0.68$ |
| | 2-4 | $\gamma=0.73$ |
| | 2-5 | $\gamma=0.78$ |
| | 2-6 | $\gamma=0.83$ |
| | 2-7 | $\gamma=0.88$ |
| | 2-8 | $\gamma=0.93$ |
| | 2-9 | $\gamma=0.98$ |
| | 2-10 | $\gamma=1.08$ |
| | 2-11 | $\gamma=1.18$ |
| | 2-12 | $\gamma=1.28$ |
| 底摩擦耗散 | 3-1 | Jonswap |
| | 3-2 | Collins |
| | 3-3 | Madsen |
| 波-波非线性相互作用 | 4-1 | OFF-Triad |
| | 4-2 | OFF-Limiter |
| | 4-3 | ALL |

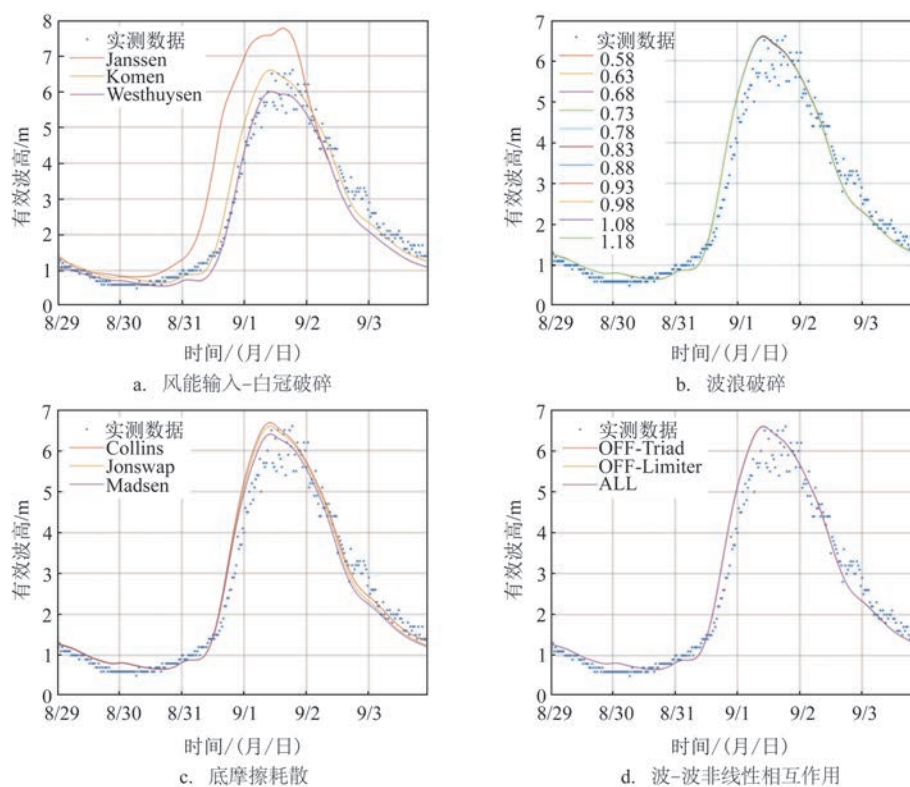


图4 舟山外海站不同参数方案下有效波高模拟值与实测值对比图

Fig.4 Comparisons between the simulated and observed significant wave height under different parameter schemes of Zhoushan offshore station

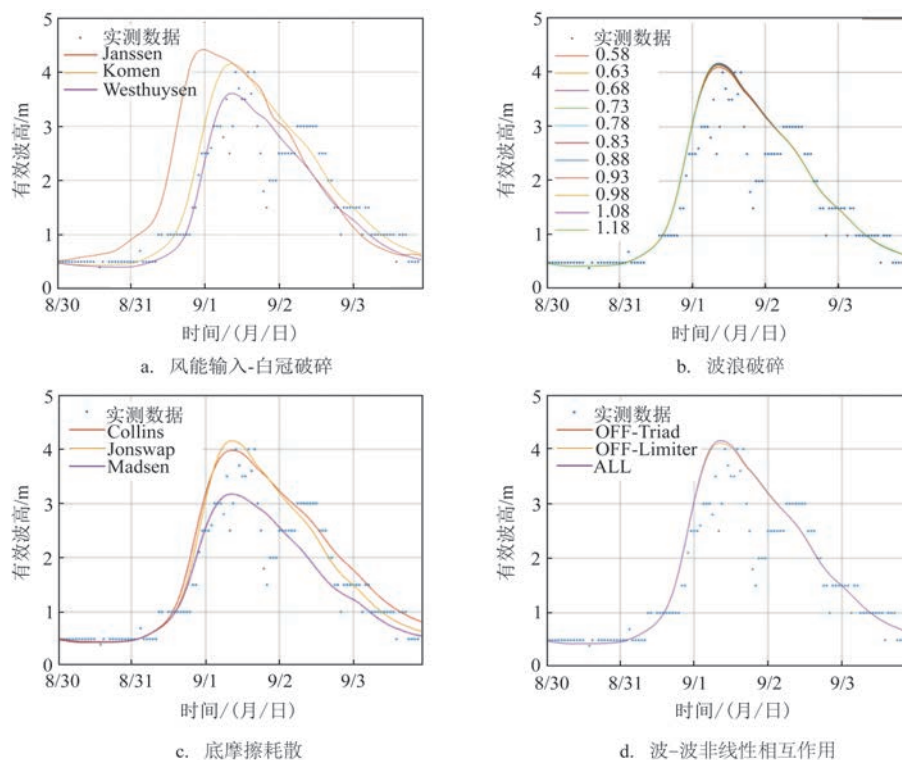


图5 朱家尖站不同参数方案下波高模拟值与实测值对比图

Fig.5 Comparisons between the simulated and observed significant wave height under different parameter schemes of Zhujiadian station

考虑到三波非线性相互作用和四波非线性相互作用均会对不同水深的波能交换产生影响,因此综合考虑两种非线性相互作用为优选方案。

根据分析结果统一各个台风模拟的参数方案,波浪破碎参数选取0.79;第三代(GEN3)风输入指数增长、白冠破碎项能量耗散模式采用Komen方案;综合考虑三波非线性相互作用和四波非线性相互作用;底摩擦耗散选取Jonswap模式。

2.2 参数优选方案准确性验证

为验证参数方案的准确性,本文基于SWAN模式,选取优选参数和模式缺省值模拟超强台风“美莎克”期间浙江近海台风浪有效波高,并结合朱家尖、南麂、舟山外海站点的实测波高数据,计算模型的相对误差。

整体而言,在本研究选取的优选参数方案下,模拟波高与实测波高的极值和变化趋势基本一致,

其中舟山外海站点的模拟数据与实测数据在波浪周期、波高极值、相位等方面吻合度较高。虽然在缺省参数方案下的波高变化趋势与实测值接近,但波高极值和相位的拟合程度明显劣于本研究参数方案(见图6)。两种参数方案下各站点波高的相对误差见表3。

结果表明,在本研究的参数方案下,模拟波高与实测结果的平均相对误差约为21.35%,平均绝对误差约为0.26 m。舟山外海站点的实测数据精度较高,相对误差更小,达到14.82%,明显优于缺省参数方案。

3 参数优化方案适应性分析

为验证优选参数方案对不同强度和路径台风浪模拟的适应性,本文基于2008—2021年对浙江沿海影响显著的台风数据,按照强度和路径(见图7)进行分类,并设置不同的数值模型工况进行模拟分析。

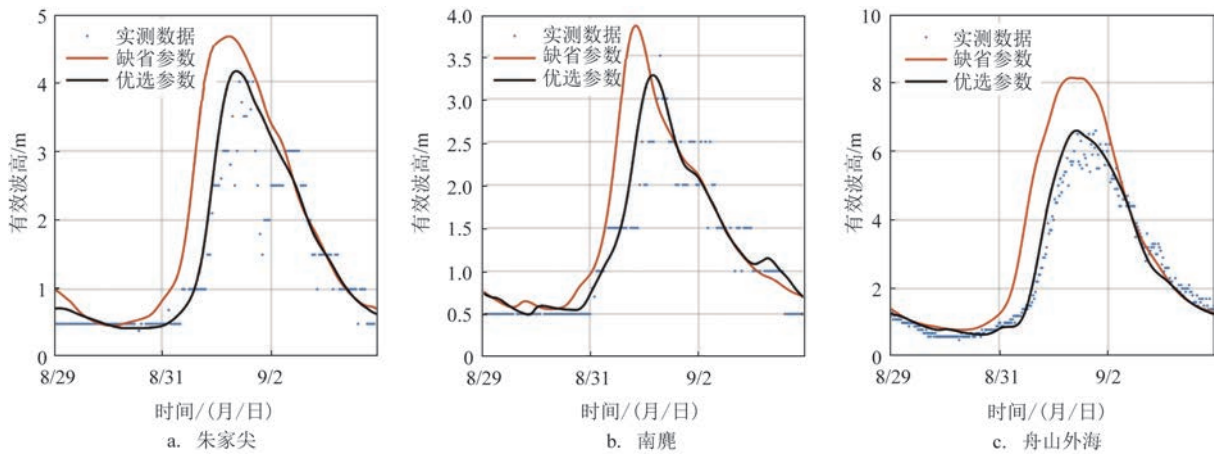


图6 台风“美莎克”期间不同参数方案站点波高模拟和实测数据对比图

Fig.6 Comparisons between the simulated and observed wave height under different parameter schemes during typhoon "Maysak" at different stations

表3 台风“美莎克”期间不同参数方案站点模拟波高误差

Tab.3 Errors of stimulated wave height under different parameter schemes during typhoon "Maysak" at different stations

| 站点名称 | 平均相对误差/% | | | | 平均绝对误差/m | | | |
|------|----------|-------|-------|-------|----------|------|------|------|
| | 标准参数方案 | 平均值 | 缺省值 | 平均值 | 标准参数方案 | 平均值 | 缺省值 | 平均值 |
| 朱家尖 | 25.99 | | 31.72 | | 0.24 | | 0.38 | |
| 南麂 | 23.23 | 21.35 | 26.83 | 30.98 | 0.26 | 0.26 | 0.31 | 0.47 |
| 舟山外海 | 14.82 | | 34.38 | | 0.27 | | 0.73 | |

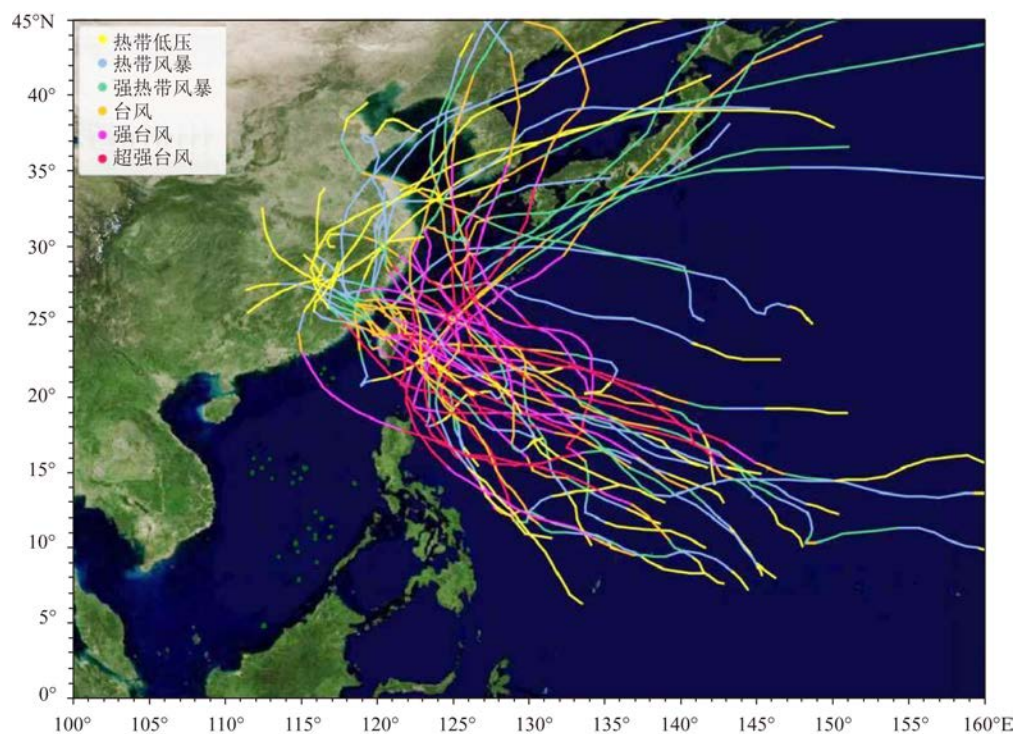


图7 2008—2021年影响浙江台风路径示意图

Fig.7 Schematic diagram of typhoon tracks affecting Zhejiang from 2008 to 2021

3.1 不同强度的台风

台风强度按照台风中心附近地面最大风速进行划分。强度大的台风在海域产生的平均风力大,易产生波高较高的台风浪,而在波高较大区域,参数敏感度极高,因此有必要检验此参数方案下模型对不同强度台风的适应性。

本节选取2008—2021年影响浙江沿海的典型台风,按照强度分类并进行模拟,计算台风浪波高模拟值与实测值的相对误差,结果见表4。总体来看,模型较好地模拟了近10a来影响浙江沿海的台风浪波高情况。强台风下波高模拟的平均相对误差为24%,明显优于台风和超强台风下的模拟结果。在强台风影响下,模型各参数敏感性适中,波高模拟结果与实测值更近;超强台风引起的最大波高可达10 m以上,此时模型对各参数的敏感性更高,存在更多不确定性;台风强度过低时,台风对浙江沿海的影响较小,较难反演波浪场变化。因此,针对台风强度过高或过低的情况,需要进行额外调参来提高模型准确度。本研究提出的优选方案更

适用于模拟强台风引发的波浪。

3.2 不同路径的台风

由于受台风本身强度、结构发展及大气环流、下垫面、地形等多因素的作用^[23],台风路径和登陆位置对台风浪的大小和分布有重要影响。

为验证该参数方案对不同路径台风的适应性,按照台风进入东海的路径趋势将其分为西向型、西北向型和北向型^[24]。将该参数方案应用到不同路径类型的台风模拟中,计算台风浪波高模拟值与实测值的相对误差,结果见表5。整体而言,参数优化方案对西北向型进入东海的台风模拟效果最好,波高平均相对误差为29.4%。不同路径波高的平均相对误差在30%左右,表明本参数方案对3种路径类型的适应性良好。北向型进入东海台风的波高模拟误差高于其余两种类型,主要原因是浙江沿海区域处于北上台风的风圈左侧,波浪场受台风影响偏小,而波高较小区域的参数敏感度更高。因此,对于该类台风,需要多次进行参数率定,才能确定最佳方案。

表4 2008—2021年不同强度台风浪波高模拟平均相对误差表

Tab.4 Average relative errors of stimulated wave height of typhoons with different intensities from 2008 to 2021

| 台风强度 | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% |
|------|----------|-------|----------|------|-------|----------|
| 超强台风 | 2114 | “灿都” | 26.2 | 1515 | “天鹅” | 51.0 |
| | 2009 | “美莎克” | 21.4 | 1513 | “苏迪罗” | 26.0 |
| | 1913 | “玲玲” | 25.0 | 1509 | “灿鸿” | — |
| | 1909 | “利奇马” | 30.0 | 1506 | “红霞” | 43.7 |
| | 1808 | “玛莉亚” | 30.6 | 1408 | “浣熊” | 35.0 |
| | 1718 | “泰利” | 29.8 | 1307 | “苏力” | 41.7 |
| | 1622 | “海马” | 29.3 | 1217 | “杰拉华” | 34.5 |
| | 1618 | “暹芭” | — | 1215 | “布拉万” | 29.0 |
| | 1617 | “鲑鱼” | 24.3 | 1109 | “梅花” | 36.0 |
| | 1614 | “莫兰蒂” | 31.3 | 1102 | “桑达” | 31.7 |
| | 1601 | “尼伯特” | 36.5 | 0815 | “蔷薇” | — |
| | 1521 | “杜鹃” | 18.5 | 0813 | “森拉克” | 34.0 |
| | 平均相对误差/% | | 31.7 | | | |
| 强台风 | 2106 | “烟花” | 26.6 | 1211 | “海葵” | 23.7 |
| | 1410 | “麦德姆” | — | 0808 | “凤凰” | 21.0 |
| | 1323 | “菲特” | 27.3 | | | |
| | 平均相对误差/% | | 24.7 | | | |
| 台风 | 2004 | “黑格比” | 20.5 | 1209 | “苏拉” | 31.7 |
| | 1918 | “米娜” | 23.5 | 1010 | “莫兰蒂” | 31.0 |
| | 1312 | “潭美” | 50.0 | 0908 | “莫拉克” | 31.0 |
| | 1210 | “达维” | — | 0807 | “海鸥” | — |
| | 平均相对误差/% | | 31.3 | | | |

表5 2008—2021年不同路径台风浪波高平均相对误差表

Tab.5 Average relative errors of stimulated wave height of typhoons with different tracks from 2008 to 2021

| 路径类型 | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% |
|----------|----------|-------|----------|------|-------|----------|
| 西向型进入东海 | 1808 | “玛莉亚” | 30.60 | 1312 | “潭美” | 50.00 |
| | 1521 | “杜鹃” | 18.50 | 1211 | “海葵” | 23.70 |
| | 平均相对误差/% | | 30.7 | | | |
| 西北向型进入东海 | 2106 | “烟花” | 21.2 | 1323 | “菲特” | 27.30 |
| | 2004 | “黑格比” | 20.50 | 1307 | “苏力” | 41.70 |
| | 1918 | “米娜” | 23.50 | 1217 | “杰拉华” | 34.50 |
| | 1909 | “利奇马” | 30.00 | 1215 | “布拉万” | 29.00 |
| | 1718 | “泰利” | 29.80 | 1209 | “苏拉” | 31.70 |
| | 1622 | “海马” | 29.30 | 1109 | “梅花” | 36.00 |
| | 1617 | “鲑鱼” | 24.30 | 908 | “莫拉克” | 31.00 |
| | 1614 | “莫兰蒂” | 31.30 | 815 | “蔷薇” | — |
| | 1601 | “尼伯特” | 36.50 | 813 | “森拉克” | 34.00 |
| | 1513 | “苏迪罗” | 26.00 | 808 | “凤凰” | 21.00 |
| | | | | | | |

续表 5

| 路径类型 | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% | 台风编号 | 台风名称 | 平均相对误差/% |
|---------|----------|-------|----------|------|-------|----------|
| 北向型进入东海 | 1509 | “灿鸿” | — | 807 | “海鸥” | — |
| | 1410 | “麦德姆” | — | | | |
| | 平均相对误差/% | | 29.4 | | | |
| | 2114 | “灿都” | 26.6 | 1506 | “红霞” | 43.70 |
| | 2009 | “美莎克” | 21.40 | 1408 | “浣熊” | 35.00 |
| | 1913 | “玲玲” | 25.00 | 1210 | “达维” | — |
| | 1618 | “暹芭” | — | 1102 | “桑达” | 31.70 |
| | 1515 | “天鹅” | 51.00 | 1010 | “莫兰蒂” | 31.00 |
| | 平均相对误差/% | | 33.2 | | | |

4 结论

本文采用超强台风“美莎克”期间浙江海域浮标的实测台风浪数据,对基于SWAN模式的东海波浪数值模型的关键参数进行了率定和验证,提出了适用于浙江海域波浪模拟的优选参数方案,即波浪破碎参数选取0.79,底摩擦耗散选取Jonswap模式,第三代(GEN3)风输入指数增长、白冠破碎项能量耗散模式采用Komen方案,综合考虑三波非线性相互作用和四波非线性相互作用。对影响浙江海域的37个台风进行模拟分析,结果表明参数优化方案适用于大部分台风情况下的波高模拟,优选方案的模拟结果明显优于缺省参数方案,平均相对误差小于31%。优选方案对强台风和西北向型台风引起的波高模拟效果最好,平均相对误差分别为24.7%和29.4%。研究结论为灾害性波浪的预报和防灾减灾工作提供了科学参考依据。

参考文献:

- [1] 县彦宗, 吴玮, 胡建华, 等. 浙江省海洋灾害与防御对策[J]. 海洋开发与管理, 2014, 31(10): 106-109.
XIAN Y Z, WU W, HU J H, et al. Marine disasters and defense countermeasures in Zhejiang Province[J]. Ocean Development and Management, 2014, 31(10): 106-109.
- [2] 莫冬雪. 中国近海寒潮影响下的灾害性海洋动力环境研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2018.
MO D X. Study on disastrous ocean dynamical environment under the influence of cold waves in the northern East China Sea[D]. Qingdao: University of Chinese Academy of Sciences (The Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [3] AMAROUCHE K, AKPINAR A, BACHARI N E I, et al. Evaluation of a high-resolution wave hindcast model SWAN for the west Mediterranean basin[J]. Applied Ocean Research, 2019, 84: 225-241.
- [4] 尹超, 黄海军, 王道儒, 等. 海南岛近岸养殖区台风浪预报技术研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(1): 1-7.
YIN C, HUANG H J, WANG D R, et al. Storm wave forecasting technique for the nearshore aquaculture area of Hainan Island[J]. Marine Sciences, 2020, 44(1): 1-7.
- [5] HOQUE M A, PERRIE W, SOLOMON S M. Application of SWAN model for storm generated wave simulation in the Canadian Beaufort Sea[J]. Journal of Ocean Engineering and Science, 2020, 5(1): 19-34.
- [6] 黄世昌, 赵鑫, 娄海峰, 等. 浙江沿海超强台风作用下的台风浪高[J]. 海洋通报, 2012, 31(4): 369-375.
HUANG S C, ZHAO X, LOU H F, et al. Typhoon-generated wave height due to the super typhoon in the coastal region of Zhejiang Province[J]. Marine Science Bulletin, 2012, 31(4): 369-375.
- [7] 余墅幸. 浙江省沿海风暴潮位对台风浪的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
YU S X. Research on the influence of storm tide on typhoon waves in the coast of Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [8] 杜艳, 刘国强, 何宜军, 等. 台风“灿鸿”影响下海浪的数值模拟研究[J]. 海洋科学, 2020, 44(10): 12-22.
DU Y, LIU G Q, HE Y J, et al. Numerical simulation of typhoon waves under the influence of typhoon “Chan-Hom” [J]. Marine Sciences, 2020, 44(10): 12-22.
- [9] 郭敬, 李尚鲁, 李婷, 等. 南麂岛重现期波高空间分布特征分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(5): 86-94.
GUO J, LI S L, LI T, et al. Characteristics of wave height spatial distribution with different return periods in Nanji Island[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(5): 86-94.
- [10] DU M, HOU Y J, QI P, et al. The impact of different historical typhoon tracks on storm surge: a case study of Zhejiang, China[J]. Journal of Marine Systems, 2020, 206: 103318.
- [11] 冯兴如, 杨德周, 尹宝树, 等. 中国浙江和福建海域台风浪变化特征和趋势[J]. 海洋与湖沼, 2018, 49(2): 233-241.
FENG X R, YANG D Z, YIN B S, et al. The change and trend of

- the typhoon waves in Zhejiang and Fujian coastal areas of China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2018, 49(2): 233-241.
- [12] 蒋廷松. 浙江省海域的波浪数值模拟与波浪能资源分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
- JIANG T S. Numerical simulation and analysis of wave energy resource at nearshore area of Zhejiang Province[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013.
- [13] 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 W M, ZHENG Q, ZHU C C, et al. Numerical simulation of "CHAN-HOM" typhoon waves using SWAN model[J]. *Marine Sciences*, 2017, 41(4): 108-117.
- [14] 郑桥. 浙江近海典型台风浪和寒潮浪的精细化数值模拟[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
- ZHENG Q. Numerical simulation of typical typhoon waves and cold waves in Zhejiang adjacent seas with refined grids[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [15] HUANG Y, WEISBERG R H, ZHENG L Y, et al. Gulf of Mexico hurricane wave simulations using SWAN: bulk formula-based drag coefficient sensitivity for Hurricane Ike[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(8): 3916-3938.
- [16] XU Y, ZHANG J C, XU Y, et al. Analysis of the spatial and temporal sensitivities of key parameters in the SWAN model: an example using Chan-hom typhoon waves[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2020, 232: 106489.
- [17] WU W F, LIU Z Z, ZHAI F G, et al. A quantitative method to calibrate the SWAN wave model based on the whitecapping dissipation term[J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 114: 102785.
- [18] RIS R C, HOLTHUIJSEN L H, BOOIJ N. A spectral model for waves in the near shore zone[C]//24th International Conference on Coastal Engineering. Kobe: ASCE, 1994: 68-78.
- [19] WU W F, LI P L, ZHAI F G, et al. Evaluation of different wind resources in simulating wave height for the Bohai, Yellow, and East China Seas (BYTES) with SWAN model[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 207: 104217.
- [20] SWAN Team. Scientific and technical documentation, SWAN Cycle III version 41.01[R]. Delft: Delft University of Technology, 2014.
- [21] 宋超辉, 王楠, 王阔, 等. 基于1988-2017年CCMP数据的浙江沿海海表风速变化及成因[J]. *大气科学学报*, 2019, 42(4): 562-570.
- SONG C H, WANG N, WANG K, et al. Variation and cause of sea surface wind speed in Zhejiang coastal area based on CCMP data from 1988 to 2017[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2019, 42(4): 562-570.
- [22] KAMINSKY G M, KRAUS N C. Evaluation of depth-limited wave breaking criteria[C]//Proceedings of 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. New York: ASCE, 1993: 180-193.
- [23] 王远超. 0214号热带气旋强度突变的研究[J]. *海洋预报*, 2006, 23(1): 44-47.
- WANG Y C. Study on the rapid change of typhoon 0214 (vongfong) intensity[J]. *Marine Forecasts*, 2006, 23(1): 44-47.
- [24] 董加斌, 黄新晴. 登陆浙江的台风路径分类和暴雨落区分析[J]. *浙江气象*, 2019, 40(3): 13-19.
- DONG J B, HUANG X Q. Classification of typhoon track and analysis of rainstorm area landing in Zhejiang[J]. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 2019, 40(3): 13-19.

Study on the parameters adaptability of typhoon wave model in Zhejiang coastal area

JI Yu¹, ZHU Ye^{2*}, LI Li¹, HE Zhiguo¹, SHEN Hui^{1,2}, LI Xiaofei¹

(1. Institute of Port, Coastal and Offshore Engineering, Ocean College, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. Zhejiang Marine Monitoring and Forecasting Center, Hangzhou 310000, China)

Abstract: In this paper, a parameter scheme suitable for typhoon wave simulation along Zhejiang coastal area is proposed based on the third-generation Simulating Wave Nearshore (SWAN) model and sensitivity analysis. The numerical simulation results and error analysis of 37 typhoons affecting the Zhejiang Province in the past 10 years are selected to verify the adaptability of the model to typhoons of different intensities and paths under this parameter scheme. The results show that the parameter scheme proposed in this paper is suitable for simulating various types of typhoon waves with the average relative error less than 31%. The simulation effect of strong typhoon waves is significantly better than that of super typhoons and typhoons with the average relative error less than 25%. The simulation effect of northwest-oriented typhoon waves is the best with the average relative error less than 30%.

Key words: typhoon wave; typhoon; adaptability analysis; SWAN model; Zhejiang coastal area