

# 考虑潮汐和潮流影响的台州湾台风浪数值模拟研究

王卫远, 吴增斌, 杨娟

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122)

**摘要:** 为了模拟2018年14号台风“摩羯”过境台州湾时的波浪分布情况,利用Holland模式构造台风场,叠加CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)背景风场,由此驱动MIKE 21 SW波浪数学模型,同时也考虑了潮汐和潮流对波浪场的影响。验证结果表明:计算结果能够反映真实的波浪变化,也能够很好地反映台风对当地波浪产生的影响。受台风“摩羯”过境影响,台州湾内外波浪差异明显,整体表现为外大内小。

**关键词:** 台风浪;数值模拟;潮汐;潮流;台州湾

**中图分类号:** P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)03-0054-07

## 0 引言

我国地处西北太平洋沿岸,每年的夏秋季节为台风活跃期,台风引发的台风浪和风暴潮给沿岸城市和居民带来了巨大威胁。浙江是我国受台风影响最大的省份之一,台风每年都会给浙江造成生命和财产损失。台州地处浙江沿海中部,也是受台风侵袭的重灾区。2019年9号台风“利奇马”在温岭城南镇登陆,造成临海全境被淹,临海古城被洪水围困,积水最深处一度可达5 m。2018年14号台风“摩羯”为当年距离台州湾最近的一场台风,对台州湾海域造成了较大影响。

为了全面认识和了解台风气压和风场结构特征,前人通过大量的分析和研究,提出了多种理论模型、经验模型或半经验半理论模型,主要有藤田模式(Fujita)<sup>[1]</sup>、捷氏模式(Jelesnianski)<sup>[2]</sup>、高桥模式(Takahashi)<sup>[3]</sup>、梅尔斯模式(Myers)<sup>[4]</sup>和Holland模式<sup>[5]</sup>。本文采用Holland模式构造台风场,叠加CCMP(Cross Calibrated Multi-Platform)背景风场,同时考虑潮汐和潮流对波浪场的影响<sup>[6-10]</sup>,运用MIKE 21 SW模块模拟2018年14号台风“摩羯”过境台州湾时的波浪分布情况,以期在驱动风场构

建、波浪要素验证和计算结果分析等方面给同行提供参考和借鉴。

## 1 波浪数学模型

### 1.1 基本原理

MIKE 21 SW模块基于波作用守恒方程,采用动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 来描述波浪<sup>[11]</sup>。模型的自变量为相对频率 $\sigma$ 和波向 $\theta$ 。动谱密度 $N(\sigma, \theta)$ 与能谱密度 $E(\sigma, \theta)$ 的关系为:

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma \quad (1)$$

在笛卡尔坐标系下,MIKE 21 SW的控制方程,即波作用守恒方程可以表示为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} c_x N + \frac{\partial}{\partial y} c_y N + \frac{\partial}{\partial \sigma} c_\sigma N + \frac{\partial}{\partial \theta} c_\theta N = \frac{S}{\sigma} \quad (2)$$

式中:第1项为 $N$ 随时间的变化率;第2项和第3项表示 $N$ 在 $x$ 、 $y$ 方向上的传播;第4项为由于流场和水深所引起的 $N$ 在相对频率 $\sigma$ 空间的变化;第5项为 $N$ 在谱分布方向 $\theta$ 空间的传播; $S$ 为以能谱密度表示的源汇项,包括风能的输入、非线性波波相互作用和由于底摩擦、白浪、破碎引起的能量损耗; $c_x$ 、 $c_y$ 、 $c_\sigma$ 和

收稿日期: 2023-04-20。

基金项目: 浙江省博士后科研项目择优资助(ZJ2021048)。

作者简介: 王卫远(1985-),男,高级工程师,硕士,主要从事水文、水利和海岸工程方面的研究。E-mail:wangweiyuan008@126.com

$c_\theta$  分别表示在  $x$ 、 $y$ 、 $\sigma$  和  $\theta$  空间的波浪传播速度,其表达式分别为:

$$(c_x, c_y) = \frac{dx}{dt} = c_g + U \quad (3)$$

$$c_\sigma = \frac{d\sigma}{dt} = \frac{\partial \sigma}{\partial d} \left[ \frac{\partial d}{\partial t} + U \cdot \nabla_x d \right] - c_g k \cdot \frac{\partial U}{\partial s} \quad (4)$$

$$c_\theta = \frac{d\theta}{dt} = -\frac{1}{k} \left[ \frac{\partial \sigma}{\partial d} \frac{\partial d}{\partial m} + k \cdot \frac{\partial U}{\partial m} \right] \quad (5)$$

式中:  $c_g$  为波群速;  $U = (U_x, U_y)$  为流速;  $d$  为水深;  $k = (k_x, k_y)$  为波数;  $s$  为沿  $\theta$  方向的空间坐标;  $m$  为垂直于  $s$  的坐标;  $\nabla_x$  为二维微分算子。

MIKE 21 SW 模型中的源函数项是描述各种物理现象的源函数的叠加形式,即:

$$S = S_{in} + S_{nl} + S_{ds} + S_{bot} + S_{surf} \quad (6)$$

式中:  $S_{in}$  表示风能的输入;  $S_{nl}$  表示非线性波波相互作用;  $S_{ds}$  表示由白帽引起的能量损耗;  $S_{bot}$  表示底摩擦引起的能量损耗;  $S_{surf}$  表示由于水深变化引起的波浪破碎导致的能量损耗。

## 1.2 计算范围

本次计算范围北起象山石浦镇,南至温岭东海,东至渔山列岛(约海图 50 m 等深线处),水下地形来自 2005 年版韭山列岛—台州列岛海图(比例尺 1:250 000),水深统一至平均海平面(见图 1)。此次研究主要针对台州湾海域,为了节约计算时间,没有搭建更大范围的计算区域。为了尽量体现计算域外波浪对计算域内波浪传播的影响,可将模型的北边界和南边界作为侧边界处理,东边界参照波浪测站观测资料提供常量波浪要素(有效波高、谱峰周期和波向),这样的处理方法可以在一定程度上弥补计算域偏小的不足。

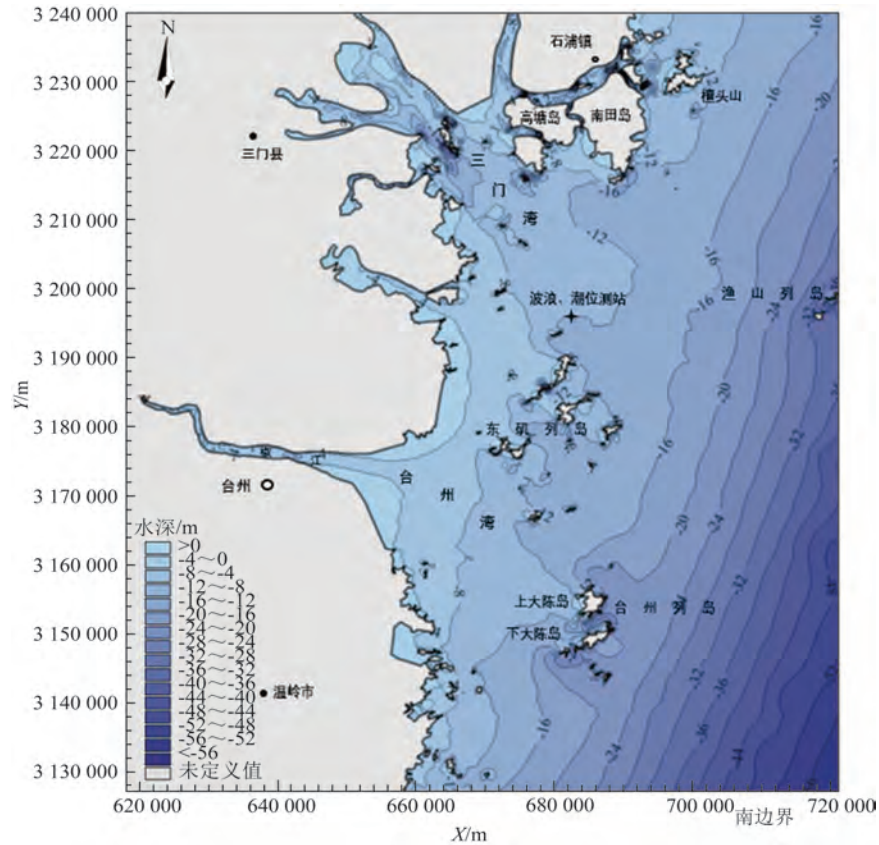


图1 计算范围、地形及相关测站位置示意图

Fig.1 The diagram of computation domain, bathymetry and the locations of observation stations

## 2 驱动风场

### 2.1 台风风场

本文选择2018年14号台风“摩羯”开展台风风的计算与分析。2018年8月8日14时(北京时,下同),第14号台风“摩羯”生成,其中心位于台湾省花莲市东偏南方向约1330 km的海面上,即19.4°N、133.5°E,强度等级为热带风暴级,中心附近最大风力达8级(风速约为18 m/s),中心最低气压为998 hPa。8月11日05时,台风中心位于浙江象山东南方向大约970 km的西北太平洋洋面上,即24.8°N、130.3°E,中心附近最大风力达8级(风速约为18 m/s),中心最低气压为998 hPa,强度基本无变化。8月12日23时35分前后,台风在浙江温岭沿海登陆,登陆时中心附近最大风力达10级(风速约为28 m/s)。8月13日08时,台风中心位于安徽广德境内,中心附近最大风力达8级(风速约为18 m/s)。8月13日23时,强度减弱为热带低压。台风路径信息见图2。

台风模型采用Holland模式,气压和梯度风风速计算公式为:

$$P(r) = P_c + (P_n - P_c) e^{\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B} \quad (7)$$

$$V_g(r) = \left[ R_{\max}^B B (P_n - P_c) \frac{e^{\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B}}{\rho r^B} + \frac{r^2 f^2}{4} \right]^{\frac{1}{2}} - \frac{rf}{2} \quad (8)$$

式中: $P(r)$ 为距离台风中心 $r$ 处的气压, $r$ 为计算点 $(x, y)$ —台风中心 $(x_c, y_c)$ 的距离,计算公式为 $\sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}$ ;  $P_n$ 为台风外围气压,这里取1013.3 hPa;  $P_c$ 为台风中心气压;  $R_{\max}$ 为最大风速半径,可调,这里选用 $R_{\max} = R_k - 0.4(P_c - 900) + 0.01(P_c - 900)^2$ ,  $R_k$ 推荐值为40;  $B$ 为指数参数,可调,这里选用 $B = 1.5 + (980 - P_c)/120$ ;  $V_g(r)$ 为距离台风中心 $r$ 处的梯度风风速;  $\rho$ 为空气密度;  $f$ 为科氏力系数,  $f = 2\omega \sin\varphi$ ,  $\omega$ 为地球自转角速度,  $\varphi$ 为地理纬度。

台风中心移行风速采用宫崎正卫公式<sup>[12]</sup>,即:

$$V_m = e^{-\pi r / 500000} \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $V_m$ 为台风中心移行风速;  $V_x$ 、 $V_y$ 为台风中心移行速度分量。

台风风场的风速由梯度风风速和台风中心移行风速叠加而成,即:

$$V_t = \begin{bmatrix} V_{tx} \\ V_{ty} \end{bmatrix} = \frac{C_1 V_g}{r} \begin{bmatrix} -(x - x_c) \sin\phi - (y - y_c) \cos\phi \\ (x - x_c) \cos\phi - (y - y_c) \sin\phi \end{bmatrix} + C_2 V_m \quad (10)$$

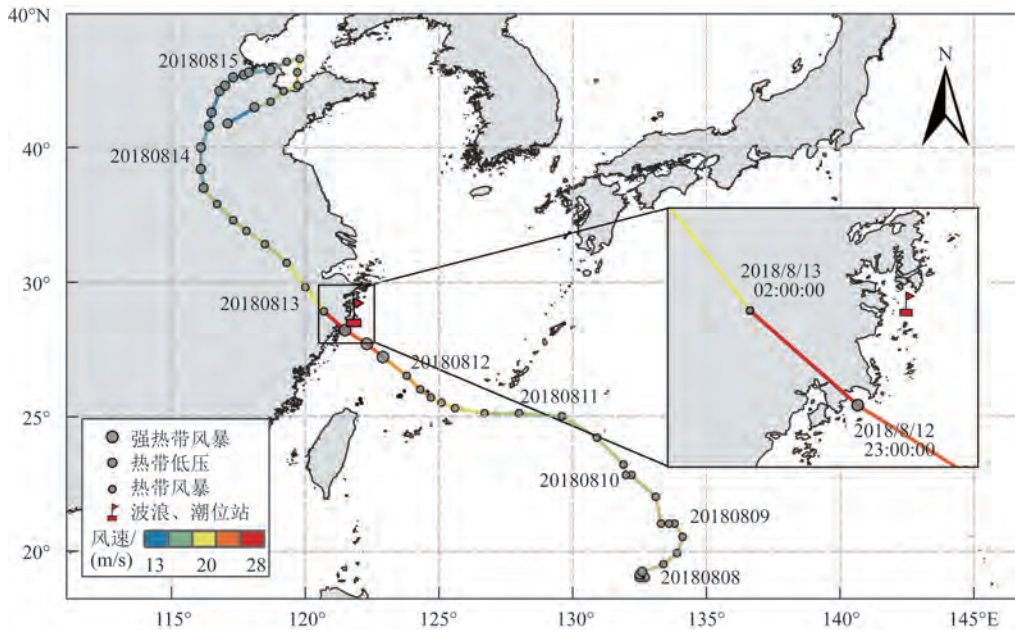


图2 1814号台风“摩羯”移动路径示意图

Fig.2 The diagram of 1814 Typhoon "Yagi" moving path



式中:  $C_1$ 、 $C_2$  为修正系数, 可调, 这里  $C_1$  取 0.8,  $C_2$  取 0.7;  $\phi$  为流入角, 一般为  $15^\circ \sim 30^\circ$ 。

## 2.2 背景风场

CCMP 海面风场是由美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 在 2009 年推出的海面 10 m 高度处的混合风场, 空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 时间分辨率为 6 h, 覆盖范围为  $78.375^\circ\text{S} \sim 78.375^\circ\text{N}$ 、 $0.125^\circ \sim 359.875^\circ\text{E}$ 。相关研究显示, 对于远离台风中心的区域, CCMP 风场与实测值吻合较好, 而对于距离台风中心较近的区域, CCMP 风场与实测值相差较大。因此, 本文将同期的 CCMP 风场作为背景风场。

## 2.3 合成风场

台风中心及附近主要受台风本身影响, 需采用台风风场, 远离台风的区域受台风影响较小, 应采用背景风场。合成风场可由台风风场和背景风场构造而成, 进而实现台风风场和背景风场之间的平滑连接和过渡。构造公式为:

$$V = (1 - e)V_t + eV_b \quad (11)$$

式中:  $V$  为合成风场风速;  $V_t$  为台风风场风速;  $V_b$  为背景风场风速;  $e$  为权重系数,  $e = \frac{c^4}{1 + c^4}$ , 其中  $c = \frac{r}{nR_{\max}}$ ,  $n$  可调, 这里取 9。

## 3 台风浪验证

在精度要求不是特别高的工程实践中, 可以不考虑潮流对波浪场的影响。在台风影响期间, 强烈的海气相互作用会导致风暴潮的产生, 进而也会对波浪场产生一定的影响, 因此, 在台风浪模拟过程中需要同时考虑潮汐和潮流的影响。为了相对准确地模拟台风浪传播过程, 需要对相应的水动力模型进行验证, 进而计算得到潮汐和潮流场。利用图 1 中潮位测站 ( $121^\circ 52.3'\text{E}$ ,  $28^\circ 51.8'\text{N}$ ) 的观测资料对潮位过程进行验证, 验证结果见图 3。由图 3 可以看出, 潮位计算值与实测值吻合相对较好, 尤其是在 2018 年 8 月 12—13 日的台风影响期间, 潮位模拟结果与实测值基本一致。由于没有同期的潮

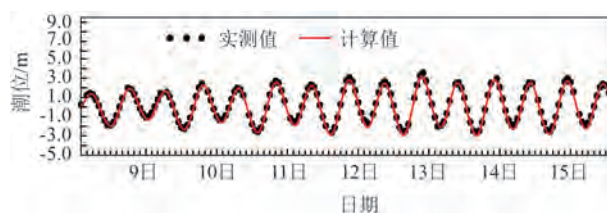


图3 潮位验证图(2018年8月)

Fig.3 The validation diagram of the tidal level (August 2018)

流观测资料, 可采用其他时段的潮流观测资料对水动力模型进行验证, 潮流验证结果良好<sup>[13]</sup>。由此说明, 水动力模拟结果基本合理, 可以将其作为波浪数学模型的输入条件。

在 MIKE 21 SW 模块中, 白帽耗散系数对计算结果影响较大。相较之前的版本, 自 MIKE 2012 版开始, SW 模块对白帽耗散系数的描述进行了更新调整<sup>[14-15]</sup>。经测试, 对于同一套模型和相同的参数设置, MIKE 2012 版及后期其他版本的计算结果偏大很多。为了让计算值与实测值吻合良好, 在 MIKE 2014 版 SW 模块波浪验证时, 需要结合老版验证经验适当调整新版的白帽耗散系数  $C_{\text{dis}}$ 。针对本模型, 在老版中  $C_{\text{dis}}$  取 4.5, 在 MIKE 2014 版中  $C_{\text{dis}}$  则调整为 6.5。

利用图 1 中波浪测站 ( $121^\circ 52.3'\text{E}$ ,  $28^\circ 51.8'\text{N}$ ) 的观测资料对台风期间的波浪过程进行验证, 验证结果见图 4—6。为了呈现潮汐和潮流对波浪传播过程的影响, 特把未考虑潮汐和潮流影响的计算结果也绘制在图上。总的来看, 与实测值和未考虑潮汐和潮流影响的模型计算结果相比, 考虑潮汐和潮流影响的模型计算结果能够更加真实地反映波浪传播过程, 也能够很好地反映台风对当地波浪产生的影响, 计算值与实测值变化趋势相同、量级相当, 可以进一步用于分析当地的波浪场。

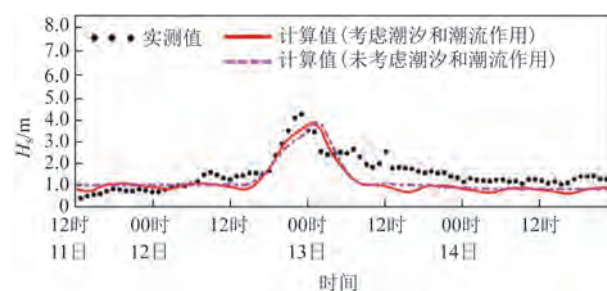


图4 有效波高验证图(2018年8月)

Fig.4 The validation diagram of the significant wave height (August 2018)

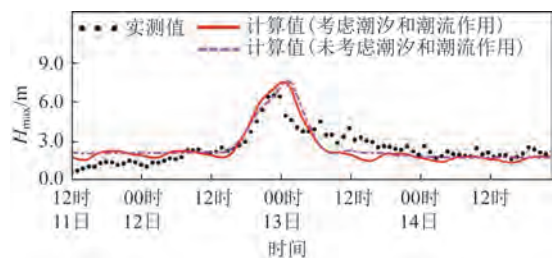


图5 最大波高验证图(2018年8月)

Fig.5 The validation diagram of the maximum wave height (August 2018)

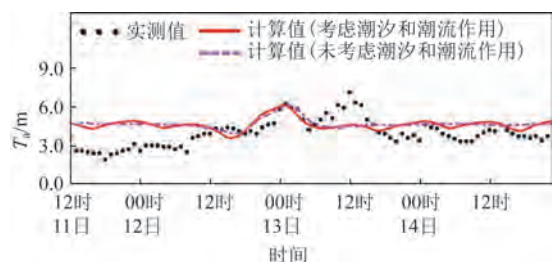


图6 平均周期验证图(2018年8月)

Fig.6 The validation diagram of the average period (August 2018)

## 4 台风浪分析

受本次台风过境影响,台州湾海域波高最大值出现在8月12日(七月初二)22:30左右,恰逢天文大潮期,此时,台风中心位于靠近温岭的隘顽湾,台风中心附近最大风力达10级(风速约为25 m/s),台风中心最低气压为985 hPa,属于强热带风暴级别,即将登陆。此时,台风中心距离台州湾约40 km,七级风圈(风速约为17 m/s)半径为120 km,为当年距离台州湾最近的台风。受其影响,台州市普降暴雨,渔船回港避风,相关客运航线停航。

从图7可以看出,模型最南边有效波高达到6.0 m,上大陈岛和下大陈岛东部海域有效波高在5.0 m左右,台州湾内受到外围岛屿的遮挡和掩护以及水深变浅、底摩擦增大的影响,有效波高由外围的4.4 m逐渐衰减到2.4 m左右,椒江河口及上游地区的有效波高在2.0 m以下。北半球台风呈逆时针旋转,从台州湾外一湾内,波向由东南向逐渐转变为东向。相应地,最大波高由湾外的8.0 m逐渐衰减到4.8 m左右(见图8)。从图上也可以明显地看

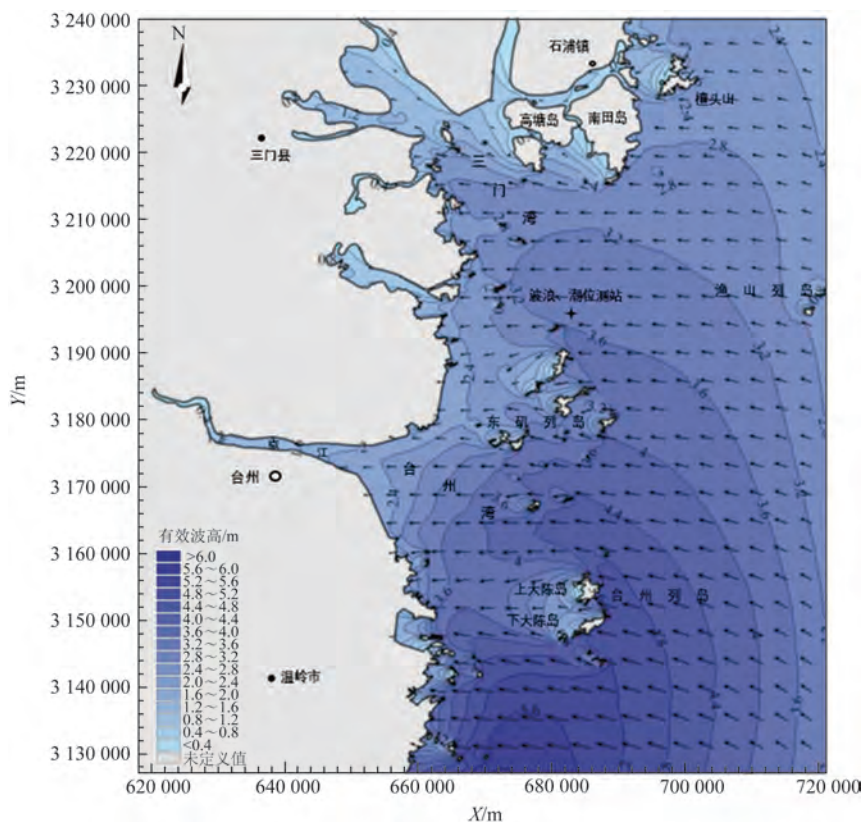


图7 有效波高分布图

Fig.7 The distribution of the significant wave height

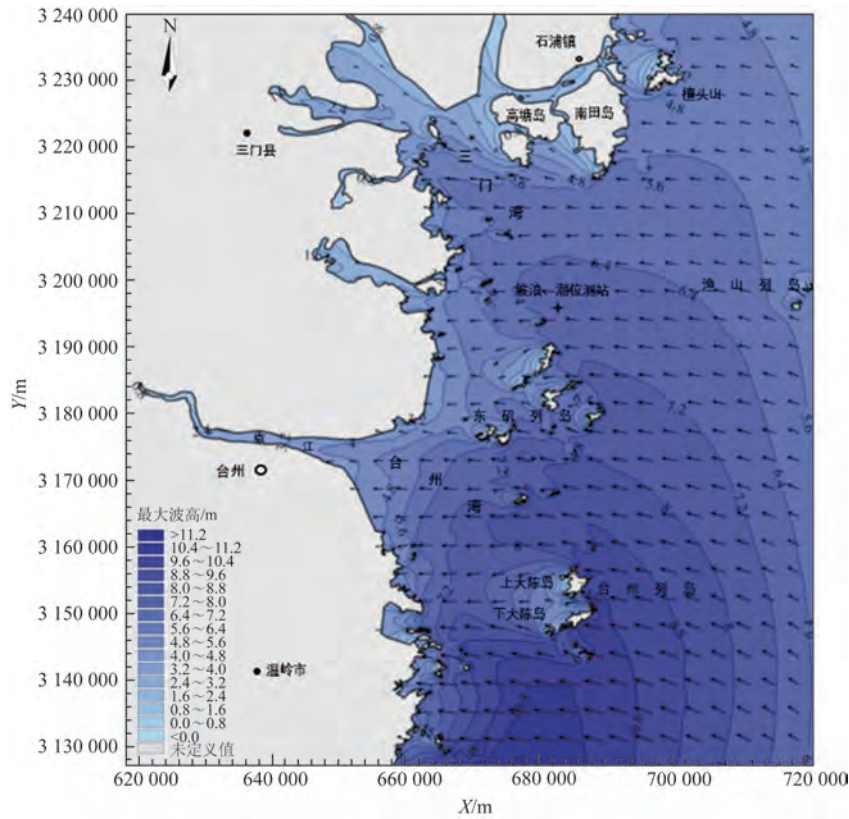


图8 最大波高分布图

Fig.8 The distribution of the maximum wave height

出,距离台风中心越远,受台风影响越小,波高也明显减小,比如北部的檀头山海域正好处于台风的7级风圈边缘,有效波高在2.5 m左右。

## 5 结论

模拟台风浪传播过程是一个相对复杂的系统工程,涉及到台风场次选择、驱动风场构建、波浪要素验证和计算结果分析等方面的工作。通过模拟1814号台风“摩羯”过境台州湾时的波浪传播过程,得到结论如下:

①关于驱动风场构建。主流的台风模型有藤田模式(Fujita)、捷氏模式(Jelesnianski)、高桥模式(Takahashi)、梅尔斯模式(Myers)和Holland模式。选定合适的模式后,需要对模式中最大风速半径等有关可调经验参数进行率定,最终确定适合场次台风的计算参数。

②关于波浪要素验证。在台风浪模拟过程中

一般需要同时考虑潮汐和潮流的影响,这样能够更加真实地反映波流相互作用,进而提高模拟精度。另外,还要分析模型中有关参数对计算结果产生的影响,最终给定合适的经验值。

③关于计算结果分析。1814号台风“摩羯”从靠近台州湾的温岭沿海登陆,台州湾处于7级风圈以内,受到台风的影响较大。湾外波浪较大,湾内受到水深变浅、外围岛屿的遮挡和掩护等影响,有效波高由外围的4.4 m逐渐衰减到2.4 m左右,波高减小明显。

## 参考文献:

- [1] FUJITA T. Pressure distribution within typhoon[J]. Geophysical Magazine, 1952, 23(4): 437-451.
- [2] JELESNIANSKI C P. A numerical calculation of storm tides induced by a tropical storm impinging on a continental shelf[J]. Monthly Weather Review, 1965, 93(16): 343-358.
- [3] TAKAHASHI K. Distribution of pressure and wind in typhoon[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1939, 17(2): 417-421.
- [4] MYERS V A. Characteristics of United States hurricanes pertinent



- to levee design for Lake Okeechobee, Florida[R]. Washington D. C.: Department of Commerce, 1954.
- [5] HOLLAND G J. An analytic model of the wind and pressure profiles in hurricanes[J]. Monthly Weather Review, 1980, 108(8): 1212-1218.
- [6] 侯虹波, 陈永平, 张长宽. 江苏沿海近岸台风浪数值模拟[J]. 水运工程, 2013(4): 13-19.
- HOU H B, CHEN Y P, ZHANG C K. Numerical simulation of typhoon waves along Jiangsu coast[J]. Port & Waterway Engineering, 2013(4): 13-19.
- [7] 郑祥靖. 潮汐和潮流作用下 1323 号台风“菲特”台风浪数值模拟[J]. 海洋预报, 2015, 32(5): 8-13.
- ZHENG X J. Numerical simulation of typhoon waves with tide during 1323 typhoon "Fitow"[J]. Marine Forecasts, 2015, 32(5): 8-13.
- [8] 齐庆辉, 刘丽丽, 朱志夏, 等. 基于 WRF 与 MIKE-SW 模式的连云港海域台风浪数值模拟[J]. 水运工程, 2015(7): 36-40.
- QI Q H, LIU L L, ZHU Z X, et al. Numerical simulation on typhoon waves in Lianyungang sea area by WRF and MIKE-SW [J]. Port & Waterway Engineering, 2015(7): 36-40.
- [9] 赵昊辰, 尹宝树, 冯兴如, 等. 台湾附近海域超强台风南玛都期间风暴潮对海浪影响的数值研究[J]. 海洋科学, 2015, 39(3): 127-134.
- ZHAO H C, YIN B S, FENG X R, et al. Numerical study of influence of surge and wave interaction on waves in waters surrounding Taiwan[J]. Marine Sciences, 2015, 39(3): 127-134.
- [10] 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.
- [11] 王卫远, 何倩倩, 周鹏飞, 等. 福建南日群岛海域波浪数值模拟研究[J]. 海洋预报, 2013, 30(5): 26-30.
- WANG W Y, HE Q Q, ZHOU P F, et al. Numerical simulation of wave in the Nanri Islands Sea of Fujian[J]. Marine Forecasts, 2013, 30(5): 26-30.
- [12] 宫崎正卫. 海洋物理Ⅲ[M]. 台中: 东南大学出版社, 1977.
- MASAO M. Marine physics Ⅲ [M]. Taichung, China: Southeast University Press, 1977.
- [13] 王卫远, 董杰, 周鹏飞, 等. 台州 1 号海上风电场项目水动力及泥沙冲淤数模专题研究报告[R]. 杭州: 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司.
- WANG W Y, DONG J, ZHOU P F, et al. The special study report on the hydrodynamic and sedimentation numerical simulation of Taizhou No. 1 offshore wind farm project[R]. Hangzhou: Power China Huadong Engineering Corporation Ltd.
- [14] DHI Water & Environment & Health. MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation[M]. Denmark: DHI, 2009.
- [15] DHI Water & Environment & Health. MIKE 21 Spectral Wave Module Scientific Documentation[M]. Denmark: DHI, 2014.

## Numerical simulation research of typhoon waves in Taizhou Bay considering the influences of tide and tidal current

WANG Weiyuan, WU Zengbin, YANG Juan

(PowerChina Huadong Engineering Corporation Ltd., Hangzhou 311122, China)

**Abstract:** In order to simulate the wave distribution during the passing period of 1814 Typhoon "Yagi" in Taizhou Bay, the MIKE 21 SW wave mathematical model is driven by the typhoon field constructed from the Holland model and the Cross Calibrated Multi-Platform background wind field, and the influences of tide and tidal current on the wave field are also considered. The validation results show that the calculated results can reflect the real wave variation and the impact of typhoon on local waves. Waves inside and outside of Taizhou Bay were significantly different due to the passing of 1814 Typhoon "Yagi", and the overall performance was large outside and small inside.

**Key words:** typhoon waves; numerical simulation; tide; tidal current; Taizhou Bay