



福建沿海台风浪模拟 及其对台风路径平移的响应^{*}

陈 橙¹, 杜 飞¹, 李 焱¹, 郑雨杭²

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建福州 350108;

2. 福建港信工程咨询服务有限公司, 福建福州 350002)

摘要: 针对福建沿海台风频发对港航工程建设的影响, 以 ECMWF 背景风场和 Holland 模型风场叠加作为驱动风场建立 SWAN 数值模型, 对 201808 号台风“玛莉亚”引起的台风浪进行数值模拟。通过对“玛莉亚”的路径进行平移, 选择漳州、泉州、宁德作为福建沿海 3 个典型的台风登陆点, 派生出 3 条理想台风路径。结果表明: 1) 随着台风中心由太平洋靠近福建省沿海, 各特征点附近海域产生的有效波高先逐渐增大再逐渐减小。2) 在各台风路径下, 路径左侧海域波向由 SSW 转为 NNE, 而路径右侧海域波向由 SSW 转向 WNW。3) 台风中心距离福建省越近, 各特征点波向变化的速率越快。4) 台风路径平移响应对优化港航工程防台方案具有一定的参考价值。

关键词: SWAN 模型; 福建省; 台风浪; 台风路径; 波向; 有效波高

中图分类号: P 731; U 652

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)08-0032-08

Simulation of typhoon waves along the coast of Fujian and its responses to typhoon path translation

CHEN Cheng¹, DU Fei¹, LI Yan¹, ZHENG Yu-hang²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Fujian Gangxin Engineering Consulting Co., Ltd., Fuzhou 350002, China)

Abstract: Focusing on the impact of frequent typhoons along the coast of Fujian on the construction of port and waterway engineering, this study builds a numerical Simulating Wave Nearshore (SWAN) model with the European Center for Medium Weather Forecasting (ECMWF) background wind field and the Holland model wind field superimposed as its driving wind field and simulates the typhoon waves caused by the 201808 Typhoon “Maria” numerically. By translating the path of “Maria”, it selects Zhangzhou, Quanzhou, and Ningde as three typical typhoon landing points along the coast of Fujian and derives three idealized typhoon paths. The results yield the following conclusions: 1) As the typhoon center approaches the coast of Fujian Province from the Pacific Ocean, the significant wave height in the sea area near each feature point increases first and then decreases. 2) Concerning each typhoon path, the wave direction of the sea area on the left side of the path changes from south-southwest (SSW) to north-northeast (NNE), while that on the right side of the path changes from SSW to west-northwest (WNW). 3) A typhoon center closer to Fujian Province corresponds to a faster wave direction change at each feature point. 4) The response to typhoon path translation has reference value for optimizing the typhoon prevention scheme of port and waterway engineering.

Keywords: SWAN model; Fujian Province; typhoon wave; typhoon path; wave direction; significant wave height

收稿日期: 2021-12-26

*基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51809047); 福建省自然科学基金项目(2019J05029)

作者简介: 陈橙(1988—), 男, 博士, 副研究员, 从事河口海岸水沙环境模拟及海岸工程防灾减灾研究。

福建沿海常受台风浪袭击, 台风造成的大浪威胁沿海航运的安全, 可导致深水航道的骤淤, 极端时会对码头设施造成破坏并造成施工人员伤亡和大量的经济损失。对于台风浪的模拟将对港口与航道工程的防灾减灾提供帮助。2000—2019年间共有42个热带气旋登陆了福建省, 其中201808号台风“玛莉亚”登陆时最大风力有14级、风速达到42 m/s, 对福建省各地造成了不同程度的灾害。因此数值模拟研究典型台风产生的风浪, 对福建省港航工程建设防灾减灾工作具有重要的意义。

SWAN模型是第3代浅海海浪数值模型。针对模型中参数的选取, 应王敏等^[1]以SWAN模型为基础, 构建东海海域波浪数值模拟, 分析了摩擦参数化方案、波浪破碎参数、风能输入与白冠耗散、波-波非线性相互作用等因素的影响; Kim等^[2]通过SWAN和WAVEWATCH III两种模型, 采用相同的数据和网格, 对1215“布拉万”过境东海过程进行数值模拟比较, 为建立台风浪预报系统提供精确的参数。对于台风风场分布和风浪模拟的研究, 赵红军等^[3]利用SWAN模型对0601号台风“珍珠”进行数值模拟, 显示台风浪要素的数值模拟值与实测结果值吻合良好; 陈橙等^[4]对0906号“莫拉菲”台风进行模拟, 得到台风风场与浪场变化趋势分布相似、由中心向外围呈递减趋势, 并对台风浪的组成机制进行探讨, 得到台风浪由风浪和涌浪构成; 唐艳平等^[5]利用SWAN模型对登陆福建的台风“莫拉克”和“鲶鱼”发生的台风浪过程进行数值模拟, 得知风浪夹角与到台风中心的距离成正比, 且右侧夹角较小。对于台风行进路径的研究, 陈剑桥^[6]基于SWAN模型, 针对台湾海峡及其周围海域, 分别对海峡北路、中路和南路过境的台风进行模拟分析, 讨论不同台风路径影响下台湾海峡的风速值、波浪场和能量谱的变化规律; 吴亚男^[7]对影响杭州湾海域的北行、西北行

和东北行共3种气旋路径进行风暴潮模拟, 分析不同路径对下流场、风场以及风暴增水的变化影响程度; 沈旭伟^[8]对从北侧经过、直接穿过和从南侧穿过西沙海区的3种热带气旋进行模拟, 研究不同气旋路径下西沙海区受波浪影响的程度。以上研究表明, 在良好的参数选取及风场计算下, SWAN模型可对我国大部分海域的海浪较好地进行模拟。

本文利用Holland模型风场与ECMWF背景风场叠加构造出SWAN模型的台风风场; 基于SWAN模型建立“玛莉亚”台风数值模型, 利用卫星资料和浮标实测数据对风速和有效波高进行验证, 并基于模型计算结果探讨4种平行路径下台风对福建沿海波浪要素的影响。

1 数值模型

SWAN模型由荷兰Delft大学土木工程系开发, 基于Euler近似的作用量谱平衡方程^[9], 采用线性随机表面重力波理论, 属于第3代浅海海浪数值模型。SWAN模型完善了波浪的产生、传播及耗散等物理过程。

SWAN模型中随机波以二维动谱密度表示, 即 $N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, 其中 $N(\sigma, \theta)$ 为波作用量, $E(\sigma, \theta)$ 为能谱密度, 其基本控制方程为波作用量守恒方程:

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

等式左侧的第1项表示波作用量密度随时间的变化率, 第2项和第3项表示作用量密度在几何空间上的传播, 第4项表示由于流和变化的水深引起的频移、在 σ 空间的变化, 第5项表示由于流和变化的水深引起的折射和变浅的作用、在 θ 空间的传播; 等式右侧的 S 表示能量的源汇项, 包括风场能量输入、白浪耗散作用、底摩阻耗散作用、浅水破碎及非线性波相互作用等物理过程。

2 风场模型建立

台风风场的模型精度各有差别, 唐建等^[10]选用藤田、Myers、Jelesnianski 及 Holland 风场模型 4 种不同的梯度风场模型进行比较, 得出了 Holland 模型模拟精度较高的结论。风场由两个矢量场叠加而成, 其一是相对台风中心对称的风场, 其风场矢量穿过等压线指向左方偏角(流入角)为 20°, 风速与梯度风成比例; 其二是基本风场, 假定其速度取决于台风移速。本文采用 Holland 台风风场模型, 台风梯度风场的表达式^[11]如下:

$$v(r) = \sqrt{\left(P_n - P_c\right) \frac{B}{\rho_a} \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B \exp\left(-\left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^B + \left(\frac{rf}{2}\right)^2 - \frac{rf}{2}\right)} \quad (2)$$

式中: P_c 为台风中心气压; P_n 为远离台风中心的外围气压; r 为网格点到台风中心的距离; ρ_a 为空气密度; f 为科氏力参数, $f = 2\omega \sin \varphi$, 其中 ω 为地球自转角速度; B 为 Holland 拟合参数, 采用自 Hubbert^[12]给出的经验公式 $B = 1.5 + (980 - P_c)/120$; R_{\max} 为台风最大风速半径, 本文采用最大风速半径的经验公式^[13]:

$$R_{\max} = 28.52 \tanh[0.0873(\varphi - 28)] + 12.22 \exp[(P_c - 1032.2)/33.86] + 0.2 v_f + 37.22 \quad (3)$$

式中: φ 为台风中心纬度; v_f 为台风中心移动速度。

背景风场采用 ECMWF 风场数据, 其空间分辨率比 CCMP 背景风场更为精确, 达到 0.125° × 0.125°, 背景风场每隔 6 h 输出 1 次。参照 CCMP 背景风场的合成风场公式, 通过相关权重系数将 Holland 梯度风场与背景风场叠加, 构造出输入 SWAN 模型中的台风风场。合成风场^[14]的表达式如下:

$$v_{hc} = (1-e)v_{tc} + ev_{ECMWF} \quad (4)$$

式中: v_{hc} 为合成风场; v_{tc} 为 Holland 梯度风场; v_{ECMWF} 为 ECMWF 背景风场; e 为权重系数^[15]。

计算区域内数值模拟采用的水深数据来自

ETOPO1, 并把计算范围内的水深数据进行插值处理, 水深数据的空间分辨率为 1' × 1', 范围为 18°N ~ 30°N、116°E ~ 128°E。201808 号台风“玛莉亚”要素见表 1。

表 1 201808 号台风“玛莉亚”要素

时间(UTC)	中心位置		中心风速/ (m·s ⁻¹)	中心风力/级	中心气压/hPa
	东经/(°)	北纬/(°)			
2018-07-10T00:00	127.3	24.0	52	16	935
2018-07-10T06:00	125.6	24.7	52	16	935
2018-07-10T12:00	124.1	25.3	50	15	940
2018-07-10T18:00	122.3	26.1	48	15	945
2018-07-11T00:00	120.3	26.4	48	15	945
2018-07-11T06:00	118.4	26.5	20	8	990
2018-07-11T12:00	117.0	27.1	15	7	996

3 模型设置及其验证

3.1 模型设置

“玛莉亚”计算区域为 18°N ~ 30°N、116°E ~ 128°E。计算区域采用矩形网格, 网格点个数为 145 × 145, 网格空间分辨率为 5' × 5'; 计算时间(UTC)为 2018-07-10T:00—2018-07-11T12:00, 时间分辨率为 1 h, 共 37 个计算时刻。

整个模型采用球坐标系、二维时变的模式; 计算区域的频率范围为 0.04 ~ 1.00 Hz, 方向上为 24 个分段, 分辨率为 15°; 在 SWAN 模型设置过程中考虑了白浪耗散、波浪破碎、底摩阻、非线性相互作用等物理过程, 设置了相关参数并采用 GEN3 的风场模式; 模型计算的时间步长取为 15 min, 每隔 1 h 输出一次计算结果。在本模型模拟范围内, 考虑模型边界距离福建沿海足够远, 入射波浪条件对福建沿海的影响相比于台风浪可忽略(取为 0)。

3.2 模拟值与卫星数据验证

Jason-2 卫星可以覆盖全球海域 0°E ~ 360°E、66°S ~ 66°N 的范围。在中国海域内 Jason-2 测量的有效波高数据有着良好的准确性^[16], 因此本文采用 Jason-2 卫星数据资料对 SWAN 模型计算数据验证。台风“玛莉亚”过境时 Jason-2 卫星处于

cycle537周期, 有T032轨道经过模拟的区域, 轨道经过的时间范围为2018-07-11T 8:54:44—2018-07-11T 9:50:40, 此时台风恰好要登陆福建省, 热带气旋强度由强台风降为台风。“玛莉亚”台风路径及T032轨道见图1。

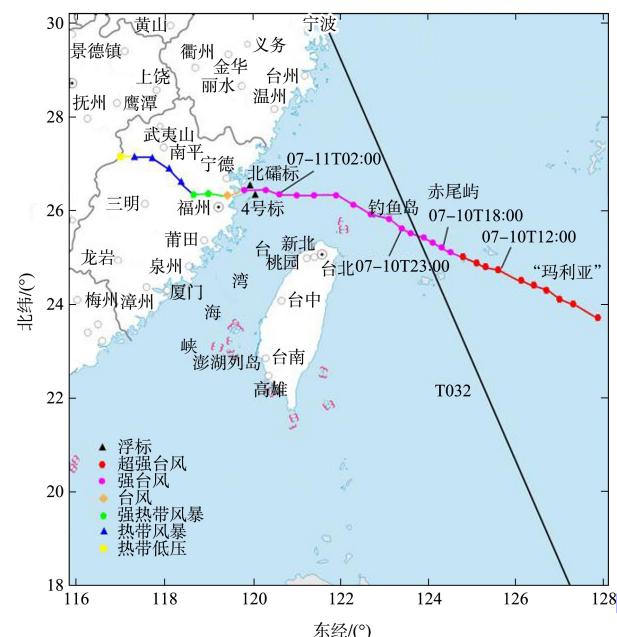
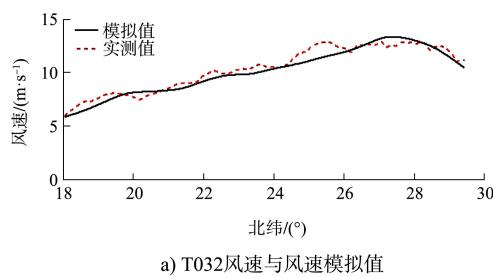
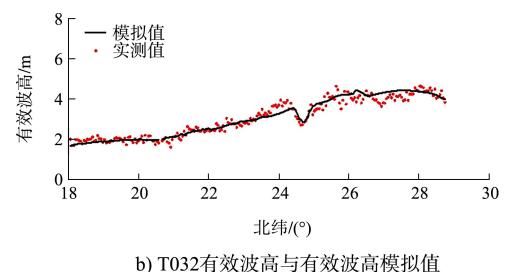


图1 “玛莉亚”台风路径及T032轨道

台风风速及有效波高模拟结果与卫星轨道数据对比见图2。由图2可知, 风速及有效波高的模拟值与轨道T032观测数据较为吻合, 变化趋势基本一致。但由于模拟时间与卫星观测时间存在一定偏差, 以及受到模拟区域内水深地形数据精确度的影响, 导致在25.3°N处实测风速较模拟风速大1.4 m/s, 相对误差为10.97%; 在27.2°N处实测风速较模拟风速小0.9 m/s, 相对误差达7.63%; 在24.1°N处实测波高比模拟波高高0.6 m, 相对误差达16.2%; 在25.8°N处实测波高比模拟波高低0.7 m, 相对误差达19.8%。



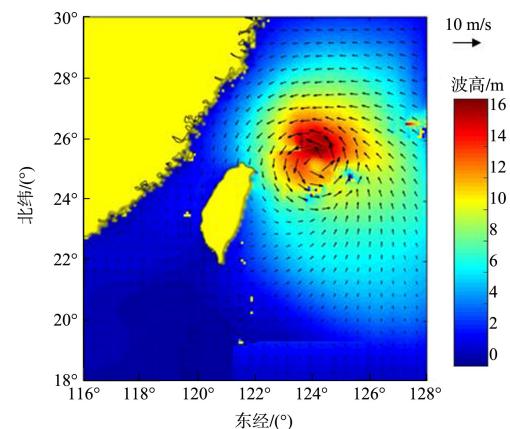
a) T032风速与风速模拟值



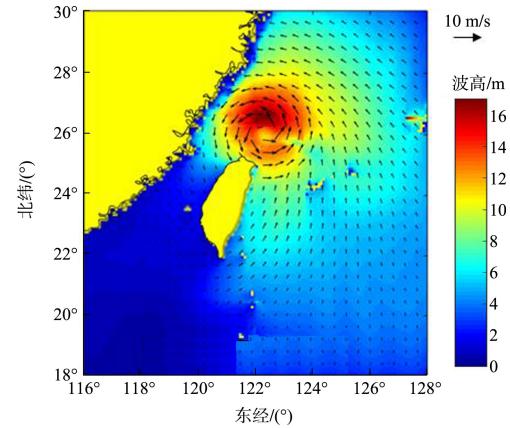
b) T032有效波高与有效波高模拟值

图2 模拟结果与卫星轨道数据对比

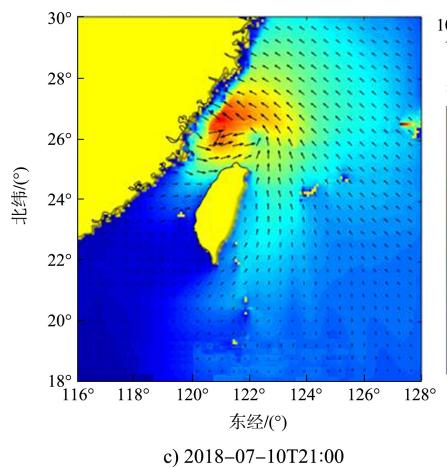
“玛莉亚”台风风场矢量及有效波高分布见图3。由图3可知, 在台风气压梯度的影响下, 各计算时刻点的风向沿台风中心呈逆时针分布。台风行进路线左侧的风速较小, 而右侧的风速稍大, 风向呈逆时针旋转, 且风速沿着台风中心由内向外递减。有效波高的分布与风场分布基本保持一致, 有效波高高值区域对应风速大值区域且有效波高也对应着“台风路线左侧波高小、右侧波高大”的逆时针旋转现象, 并且有效波高亦遵循从台风中心向外围递减的规律。从计算结果可知, 台风登陆时, 福建沿海的波高亦可达6~10 m, 不仅影响近海航道的正常运行, 还威胁到航道工程的安全。



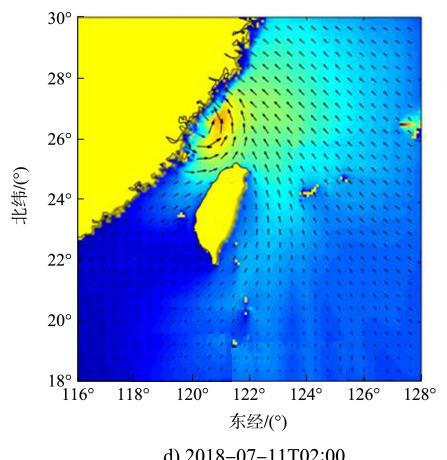
a) 2018-07-10T12:00



b) 2018-07-10T18:00



c) 2018-07-10T21:00



d) 2018-07-11T02:00

图 3 “玛莉亚”台风风场矢量及有效波高分布

3.3 模拟值与浮标数据验证

采用 4 号标 (120.7°E, 26.3°N) 及北礁标 (120.3°E, 26.7°N) 的观测数据对模型的有效波高及风速进行验证。由于 4 号标仅采集到有效波高的数据而无风场数据, 因此模拟值仅与 4 号标的有效波高进行验证。浮标位置见图 1。

“玛莉亚”过境前后, 4 号标有效波高实测值与模拟值的对比见图 4。由图 4 可知, 4 号标的模拟情况与实测情况较为吻合, 在该点处模拟值与实测值均是随时间先增大后减小, 有效波高峰值出现的时刻点也基本一致, 实测值的最大值为 9.3 m, 而模拟结果的最大值为 9.5 m。

北礁标风速的实测值与模拟值对比见图 5、有效波高的实测值与模拟值对比见图 6。由图 5、6 可知, 在北礁标处风速与有效波高都随时间先增

大后减小, 峰值出现的时刻也大致相同。但是北礁标处有效波高和风速的模拟值比实测值略大, 这是由于计算范围内水深地形精度有限, 而近海的局部复杂地形是引起波浪计算误差的原因之一。此外, 模拟过程中并未考虑现实中潮位和潮流的影响, 例如在近岸潮位变化可导致水深变化, 进而影响波浪的破碎及极限波高; 而潮流又会导致波流相互作用。

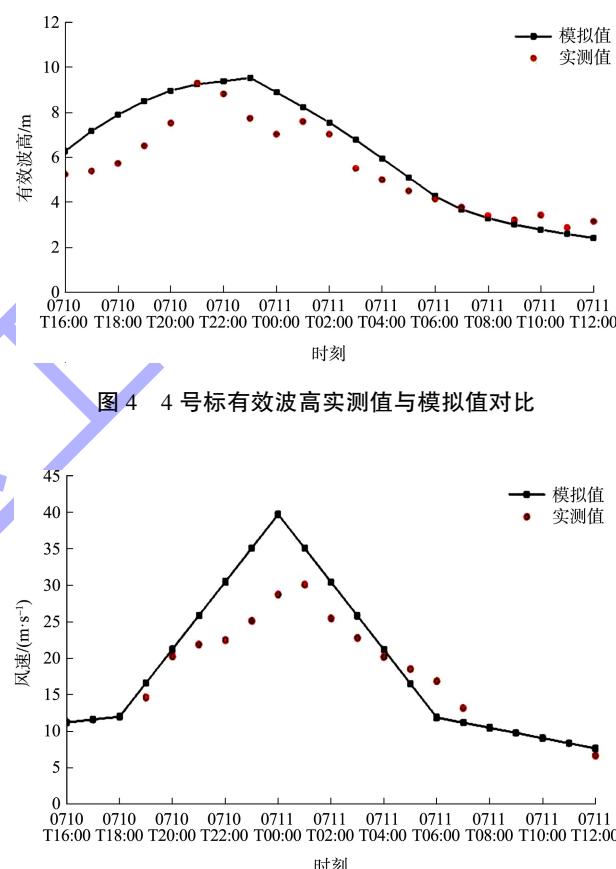


图 4 4 号标有效波高实测值与模拟值对比

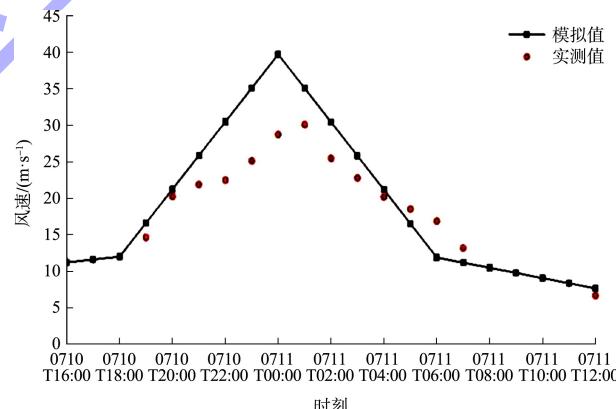


图 5 北礁标风速实测值与模拟值对比

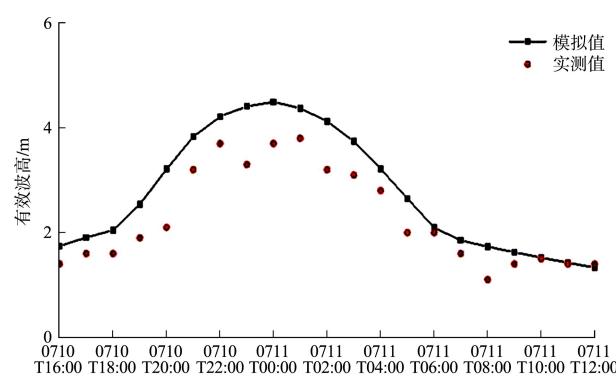


图 6 北礁标有效波高实测值与模拟值对比

4 台风路径南北平移对福建省沿海波浪的影响

由初步统计的热带气旋数据可知, 1945—2019年热带气旋在福建省共登陆上百次, 以福州市、泉州市、漳州市、宁德市登陆最为频繁。因此本文以“玛莉亚”为例, 对台风路径变化进行理想化的平移处理, 即保持台风中心气压和中心经度不变, 将台风中心纬度向南北方向平移, 派生出3条路径, 分别为泉州路径、漳州路径及宁德路径。在此基础上研究不同路径下有效波高及波向的变化情况。同时依据福建省海洋预报台浮标观测点位置在福建省附近海域选取4个特征点进行比较分析, 分别是1号标(118.2°E, 23.6°N)、2号标(119.3°E, 24.5°N)、4号标(120.7°E, 26.3°N)、5号标(121.0°E, 27.0°N), 台风路径及浮标位置见图7。

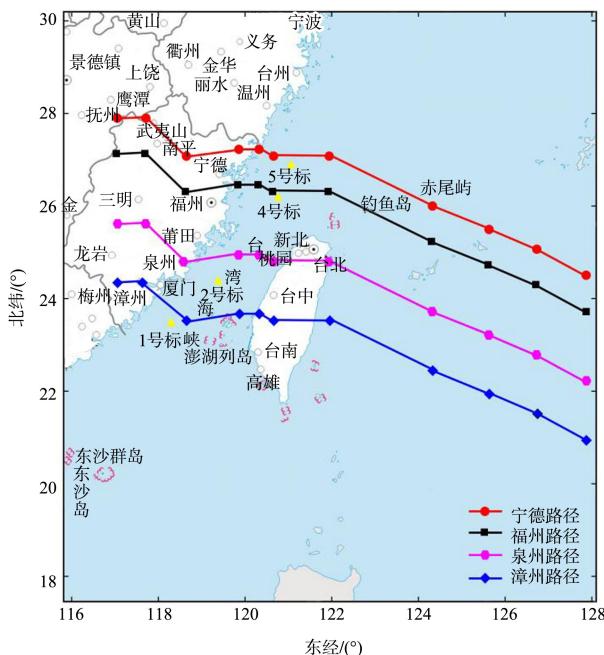


图7 “玛莉亚”台风派生路径及特征点

4.1 有效波高的变化

由“玛莉亚”台风路径派生出的其他台风路径影响下, 福建海域各特征点有效波高的变化情况见图8。由图8可知: 4个特征点的变化趋势大致相同, 其中1号标和2号标的波高最大值均出现在漳州路径, 因此相比于其他路径, 201808号台风“玛莉亚”以漳州路径过境时, 闽南附近海域产生的有效波高最大、影响最为严重; 4号标和5号标所处海域为闽北附近海域, 在各条路径中尤以福州路径影响最为严重, 有效波高最大值达到了11.3 m。

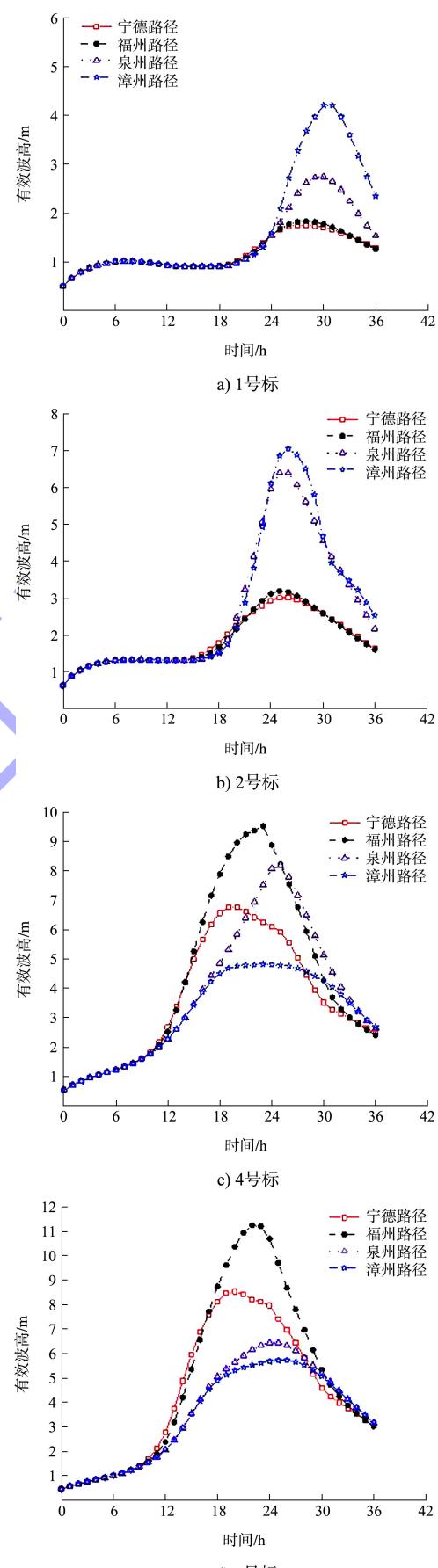
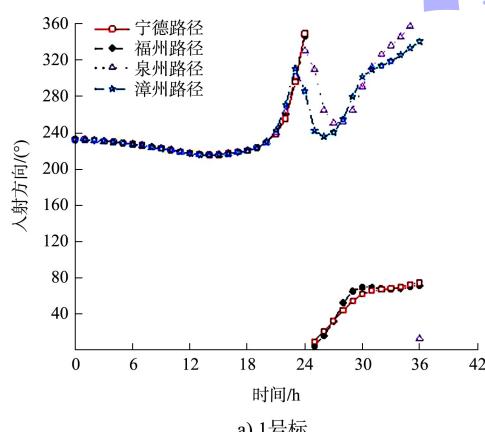


图8 “玛莉亚”不同路径下各特征点的有效波高变化

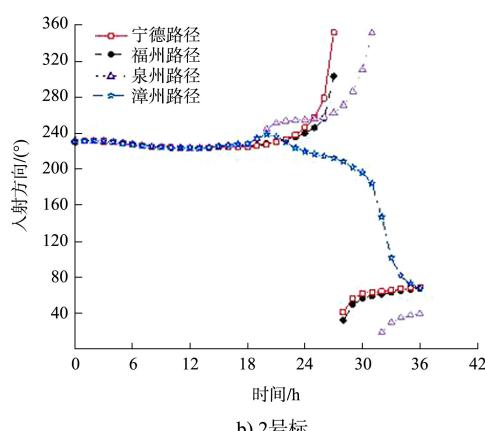
4.2 波向的变化

以正东方向的波向为 0° ，沿顺时针方向角度逐渐减小、沿逆时针方向角度逐渐增大。结合图 7、8 可以发现：台风“玛莉亚”在不同路径下，位于台风移动路径左侧的特征点波向均沿着逆时针方向逐渐变化，位于台风移动路径右侧的特征点波向均沿着顺时针方向逐渐变化。

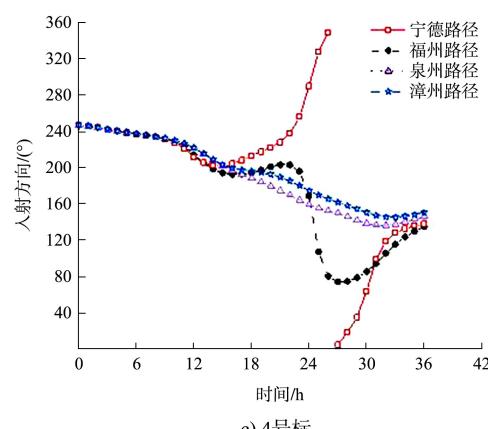
不同特征点下各条路径波向的变化见图 9。由图 9 可知，在“玛莉亚”台风过境前，福建海域各特征点的不同路径对于波浪入射角度基本没有影响，即在相同特征点下，台风过境前不同路径的波浪入射角度大致相同。从福建省南侧登陆的漳州路径和泉州路径，将闽北海域 4、5 号标波向由 SSW 沿顺时针转向 WNW 方向；相比之下，从福建省北侧登陆的福州路径及宁德路径影响闽南海域的波向变化幅度更大，且台风中心距离福建省沿岸越近，波向变化的速率越快，1、2 号浮标的波向大致由 SSW 方向沿逆时针转向 NNE 方向。



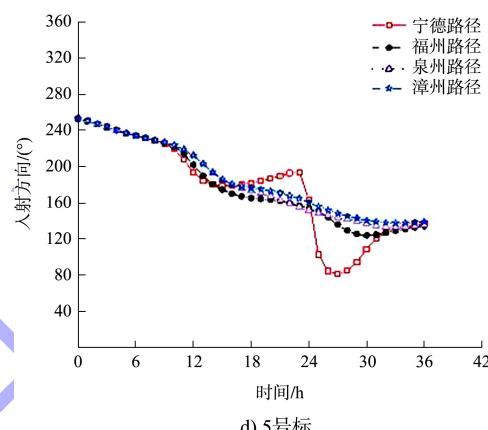
a) 1号标



b) 2号标



c) 4号标



d) 5号标

图 9 “玛莉亚”不同特征点下各路径波向变化

5 结论

1) 由 SWAN 模型得出的“玛莉亚”台风模拟的有效波高值与卫星观测数据较为吻合、模拟结果较好。由风场矢量图及有效波高等值图发现，有效波高的分布与风场分布基本保持一致，风向沿台风中心呈逆时针分布，并呈现“左侧风速小右侧风速大”的风场现象。

2) “玛莉亚”台风影响福建省的风向主要为西北方向，波高由台风中心向沿岸递减，台风中心移动方向左右两侧有效波高也呈现明显的不对称。4 号标有效波高值与实测数据变化趋势基本吻合；北礁标有效波高与实测值相比偏大，但总体上趋势相符。模拟最大风速与实测最大风速基本保持一致，误差较小。

3) 随着台风中心由太平洋靠近福建省沿岸，各特征点附近海域产生的有效波高先增大再减小。在各台风路径下，路径左侧海域波向呈逆时针变化，而路径右侧海域波向呈顺时针变化。

4) 闽南海域以漳州路径过境时危害最大, 2号标最大有效波高为 7.1 m, 且受到台风影响的时间相对滞后; 闽北海域以福州路径过境时危害最大, 5号标最大有效波高为 11.3 m。本文中台风浪的计算结果对于福建省近海的航道建设及防灾减灾具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] KIM T R, LEE J H. Comparison of high wave hindcasts during typhoon Bolaven(1215) using SWAN and WAVEWATCH III Model[J]. Journal of coastal research, 2018, 85(S1): 1096-1100.
- [3] 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, 28(3): 128-134.
- [4] 陈橙, 李焱. 基于 SWAN 模型的南中国海“莫拉菲”台风浪研究[J]. 海洋学研究, 2017, 35(4): 14-19.
- [5] 唐艳平, 林祥. 福建沿海台风浪数值模拟及特性分析[J]. 水运工程, 2017(4): 53-59, 93.
- [6] 陈剑桥. 三种典型路径下的台湾海峡台风浪特征研究[J]. 海洋预报, 2018, 35(6): 1-12.
- [7] 吴亚男. 不同台风路径下杭州湾风暴潮增水数值分析[D]. 南京: 河海大学, 2018.

- [8] 沈旭伟. 南海台风浪的数值模拟研究[D]. 南京: 河海大学, 2017.
- [9] YIN B S, WANG T. A third generation shallow water wave numerical model-ye-wam[J]. Chinese journal of oceanology and limnology, 1996, 14(2): 106-112.
- [10] 唐建, 史剑, 李训强, 等. 基于台风风场模型的台风浪数值模拟[J]. 海洋湖沼通报, 2013(2): 24-30.
- [11] XU F M, YAN Y X, ZHANG C K. Wave numerical model for shallow water[J]. China ocean engineering, 2000(2): 193-202.
- [12] HUBBERT G D, HOLLAND G J, LESLIE L M, et al. A real-time system for forecasting tropical cyclone storm surges[J]. Weather and forecasting, 1991, 6(1): 86-97.
- [13] GRAHAM H E. Meteorological considerations pertinent to standard project hurricane, Atlantic and Gulf Coasts of the United States [M]. Washington: US Department of Commerce, Weather Bureau, 1959.
- [14] 张志旭, 齐义泉, 施平, 等. 最优化插值同化方法在预报南海台风浪中的应用[J]. 热带海洋学报, 2003(4): 34-41.
- [15] 朱贞锦, 李瑞杰, 陈鹏超, 等. 台风浪数值模拟中风场权重系数分析[J]. 水道港口, 2018, 39(1): 31-37.
- [16] 王娟娟, 高志一, 王久珂, 等. Jason-2 有效波高产品在中国海域的准确性评估[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(3): 509-517.

(本文编辑 武亚庆)

· 消息 ·

世界最大跨度悬索桥正式开工建设

6月28日, 由公规院主持设计, 二航局、中交路建、一公局集团参建的世界最大跨度悬索桥——江苏张靖皋长江大桥开工动员会在大桥施工现场举行。

张靖皋长江大桥是国家“十四五”期间重点推动建设的过江通道项目, 直接连通G40沪陕、G4221沪武两条国家高速路网大通道, 贯通苏州张家港市、泰州靖江市和南通如皋市, 全长29.85 km。其中, 跨江段全长7.9 km, 包括2座航道桥, 分别为主跨2300 m的世界最大跨度悬索桥主江航道和主跨1208 m的中汊航道桥。跨江段采用双向8车道, 设计行车时速100 km/h; 南北接线段采用双向6车道, 设计时速120 km/h。

大桥建成后, 将对落实长三角区域一体化发展和长江经济带发展国家战略, 优化长江干线过江通道布局, 完善区域路网布局, 推进扬子江城市群建设和跨江融合发展具有重要意义。