

# 海南岛历史台风浪模拟和评估

杨志衡<sup>1,2,3</sup>, 牛小静<sup>1,2,3\*</sup>

(1.清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室,北京 100084;2.清华大学水利部水圈科学重点实验室,北京 100084;3.清华大学水利水电工程系,北京 100084)

**摘要:** 采用历史情景数值再现的方法研究了海南岛附近海域的台风浪灾害。基于中国国家气象局热带气旋中心的1959—2021年的热带气旋最佳路径数据集,通过模型风场与欧洲中尺度气象中心的再分析背景风场叠加构造热带气旋风场,结合第三代波浪模型模拟台风浪过程。将数值结果与2016年台风“萨莉嘉”和2022年台风“暹芭”期间波浪台站的测波数据进行了对比,证明了模型模拟精度良好。本文模拟再现了682场热带气旋过程中的风浪,基于模拟结果统计绘制了海南岛周边海域不同重现期波高的空间分布,并初步对海南岛沿岸台风浪的波高、波向和波周期特点进行评估。

**关键词:** 海南岛;南海;台风浪;SWAN模型;数值再现

**中图分类号:** P731.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2024)05-0026-08

## 0 引言

海南岛位于南海北部,作为我国自由贸易试验区,具有重要的经济地位,越来越多的海上工程立足海南,并向着深远海如火如荼地推进。但是,该海域夏秋季台风多发,由其引发的台风浪成为海岸与海上工程的主要致灾因子之一,因此对海南岛周边海域开展台风浪研究十分必要。在常规的海洋工程水文设计方法中,数值模拟作为扩充观测数据集的手段,尤其是作为重现海洋灾害要素的重要方法,很好地弥补了观测资料时空分布不均的问题。AMAROUCHE等<sup>[1]</sup>基于气候预测系统再分析(Climat Forecast System Reanalysis, CFSR)风场建立了地中海西部海域的高精度波浪后报模型。王一心等<sup>[2]</sup>将典型台风类型分为4类,采用近岸海浪模拟(Simulating Waves Nearshore, SWAN)计算研究了不同类型台风引起的台风浪波高在江苏海域的时空分布特征。针对海南岛海域的台风浪,尹超<sup>[3]</sup>研究了海南岛后水湾地区的台风浪特征;石洪源

等<sup>[4]</sup>探讨了台风“山神”期间海南岛周围台风浪波高、波龄以及波浪方向谱的分布特征。此外众多研究人员还针对不同台风情况下台风浪的波高特征变化开展了广泛研究<sup>[5-7]</sup>。

本文收集了1959—2021年的历史热带气旋资料,通过数值模型再现的方法对海南岛周边历史台风浪的波高等特征进行了统计,该长期分析结果可用于海南岛海域台风浪灾害的初步评估工作,相关数据可以服务于海南岛周边的海上工程规划和设计。

## 1 研究方法和模型设置

### 1.1 热带气旋数据统计

中国气象局热带气旋资料中心提供了1949年以来西北太平洋(赤道以北,东经180°以西,含南海)海域热带气旋每6 h的位置和强度作为最佳路径数据集。该数据集包括了热带气旋中心经纬度、中心最低气压、近中心最大风速和平均风速等参数<sup>[8-9]</sup>。

本文基于以上气旋数据,考察距离海南岛700 km

收稿日期: 2023-12-22。

基金项目: 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室自主项目(2022-KY-05);水电水利规划设计总院有限公司科技项目(ZS-KJSD-20230005);清华大学自主科研计划资助(20233080025)。

作者简介: 杨志衡(1999-),男,博士在读,主要从事海洋工程研究。E-mail: yzh22@mails.tsinghua.edu.cn

\*通信作者: 牛小静(1981-),女,副教授,博士,主要从事海洋动力学研究。E-mail: nxj@tsinghua.edu.cn

以内的气旋过程,从1959—2021年共筛选出682场事件,并对每场气旋的最大风速、持续时间等要素做统计。图1a是海南岛海域热带气旋最大风速的风力等级分布,按照中国气象局热带气旋中心的蒲福风力等级表可划分为18个等级。图1b表明热带气旋从生成—消散的过程普遍在240 h以内。历史上持续时间最长的热带气旋为1986年的强台风“韦恩”,在东沙群岛徘徊了22天后经琼州海峡登陆越南。

## 1.2 研究方法

本文采用第三代波浪模型SWAN进行计算。SWAN是以波作用量守恒为基础的相平均模型,适用于近岸海域大尺度波浪生成和耗散过程的模拟,可高效地获得波浪特征要素。该模型在数值方法上采用隐式格式离散,具有很好的计算精度和效率<sup>[10]</sup>。控制方程为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla_{\vec{x}} \cdot [(\vec{c}_g + \vec{u})N] + \frac{\partial c_\sigma N}{\partial \sigma} + \frac{\partial c_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S_{\text{tot}}}{\sigma} \quad (1)$$

式中: $N$ 为波浪作用量; $\vec{c}_g$ 表示波群速度; $\vec{u}$ 表示海流速度; $c_\sigma$ 和 $c_\theta$ 表示波浪作用量在谱空间中频率和波向上的传播速度; $t$ 表示时间; $\vec{x}$ 代表二维空间向量; $(\sigma, \theta)$ 表示谱空间中的波频和波向; $S_{\text{tot}}$ 为源项,包含风的能量输入、三波非线性相互作用、四波非线性相互作用,以及白帽、底摩擦和波浪破碎导致的能量耗散。

风场以全球气象再分析数据(ECMWF Reanalysis v5, ERA5)的10 m风速为基础。该数据集包括了1940年至今的气象数据,大气要素的空间分辨率

为 $0.25^\circ$ 、时间分辨率为小时,具有高空间分辨率、高时间分辨率和高质量的特点,被广泛应用于气象、环境等领域的研究和应用。但是研究表明,台风期间ERA5的最大风速远低于实际最大风速<sup>[11-12]</sup>。针对再分析风场低估了台风过程中最大风速的问题,学者们提出两类解决方法:一是将ERA5风场乘以放大系数<sup>[11]</sup>,但该方法在ERA5数据集中的台风中心与最佳路径采集的台风中心相差较大时效果较差;另一种是在最大风圈半径附近用模型风场数据,在4倍风圈半径外用再分析风场数据,中间部分通过平滑的 $0 \sim 1$ 函数实现过渡<sup>[13]</sup>。本文使用第二种方法重构风场,将Sigmoid函数作为过渡函数来融合模型风场和ERA5数据集。模型风场以QI等<sup>[14]</sup>的参数化模型为基础,参考赵广生等<sup>[15]</sup>对风场的处理方式生成数据。模型风场到ERA5再分析风场数据间的过渡方式为:

$$V = \alpha(r)V_{\text{ERA5}} + [1 - \alpha(r)]V_{\text{model}} \quad (2)$$

过渡函数 $\alpha(r)$ 选为Sigmoid型函数,其函数表达为:

$$\alpha(r) = 1 / \left\{ 1 + \exp \left[ \frac{4.3944}{3R_{\text{MW}}} (r - 2.5R_{\text{MW}}) \right] \right\} \quad (3)$$

式中: $R_{\text{MW}}$ 表示最大风圈半径; $r$ 表示坐标点—气旋中心的距离。当 $r = R_{\text{MW}}$ 时, $\alpha=0.1$ ,此时由模型风场主导,占总风速的90%;当 $r = 4R_{\text{MW}}$ 时, $\alpha=0.9$ ,此时由ERA5风场主导,占总风速的90%。

本文的计算域为 $10^\circ \sim 24^\circ \text{N}$ 和 $105^\circ \sim 120^\circ \text{E}$ 。岸线数据采用美国国家海洋和大气管理局

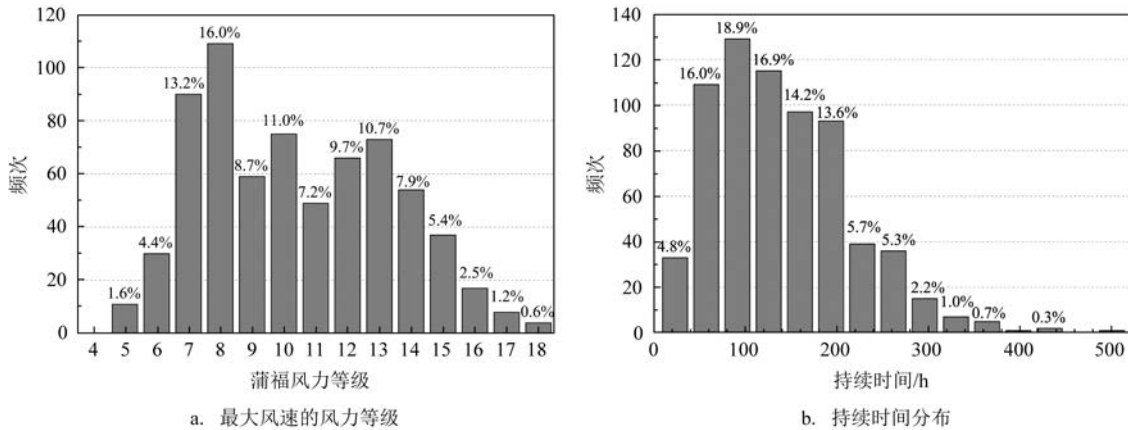


图1 热带气旋要素统计

Fig.1 Statistics on tropical cyclones

(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)的全球高分辨率海岸线数据(Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography Database, GSHHG)。水深地形数据采用全球海洋通用水深数据(General Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO)结合琼州海峡和海南岛沿岸的电子海图数据<sup>[15]</sup>。本文在计算中使用非结构化网格,由于南海大陆坡的梯度大、岛屿多,因此对东沙群岛—永兴岛的大陆坡以及永兴岛、西沙群岛和中沙群岛的网格做了局部加密,网格最小尺度约为500 m。

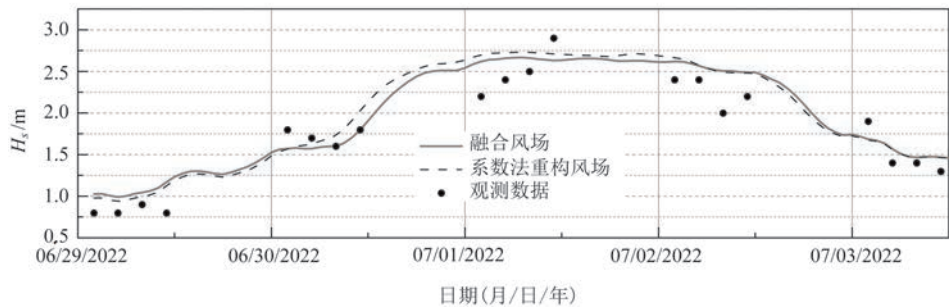
### 1.3 数值有效性验证

以2016年21号超强台风“萨莉嘉”和2022年3

号台风“暹芭”为例验证模型的有效性。台风“萨莉嘉”的中心最低气压为930 hPa,最大风速为55 m/s,海南省万宁市和东镇沿海为其登陆点之一,因此它可以作为经过海南岛的一场典型台风。观测数据取自浮标(111.64°E, 20.73°N)。台风“暹芭”的中心最低气压为965 hPa,最大风速为35 m/s,其登陆位置为广东省茂名市,台风路径与海南岛的最短距离为100 km。观测数据来源于台风路径附近遮浪(Zhe Lang)台站(115.6°E, 22.7°N)的公开资料。分别采用LI等<sup>[11]</sup>的系数法重构风场,采用1.2节中的过渡法重构风场驱动波浪模型。波高的时序过程见图2,结果表明融合风场模拟结果总体与观测数据吻合良好,不同风场融合方式对波高影响有限,误差见表1。



a. 201621“萨莉嘉”台风浪过程



b. 202203“暹芭”台风浪过程

图2 台风浪波高验证

Fig.2 Validation of significant wave height during typhoons

表1 误差分析

Tab.1 Error analysis

台风名称	方法	最大正误差/m	最大负误差/m	平均绝对误差/m	平均相对误差/%
201621“萨莉嘉”	系数法	0.48	-1.15	-0.297	-12.3
	过渡法	1.26	-1.06	-0.154	-8.7
202203台风“暹芭”	系数法	0.50	-0.23	0.151	10.3
	过渡法	0.51	-0.27	0.125	9.7

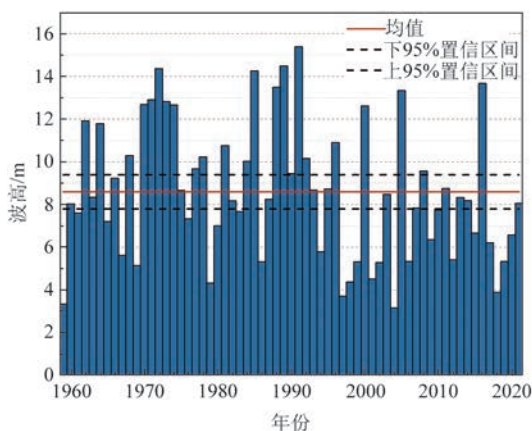


从各风场重构方法导致的计算误差(见表1)可以看出,不同方法的误差表现各有千秋,但考虑到台风中心的识别定位难度,系数法可能由于背景风核心和最佳路径不一致而导致非核心范围被“错误”地放大,因此采用过渡法对模型风进行重构。

## 2 历史台风浪特征参数统计

### 2.1 统计方法

以海南岛东部万宁市附近海域为例讨论台风浪



要素的分析方法。一般认为极端海况出现在热带气旋影响期间,因此将每年热带气旋过程中的最大有效波高作为当地年极值波高(见图3a)。从图中可以看到海南东部万宁海域的最大波高发生在1991年,约为15.38 m,平均年极值波高为8.93 m。采用不同概率分布函数对年极值波高进行拟合(见图3b),比较结果表明Pearson-Ⅲ型曲线的拟合效果与资料适配最佳,因此重现期波高采用Pearson-Ⅲ型分布进行推算。

将《GB/T 42176—2022 海浪等级》作为波高分

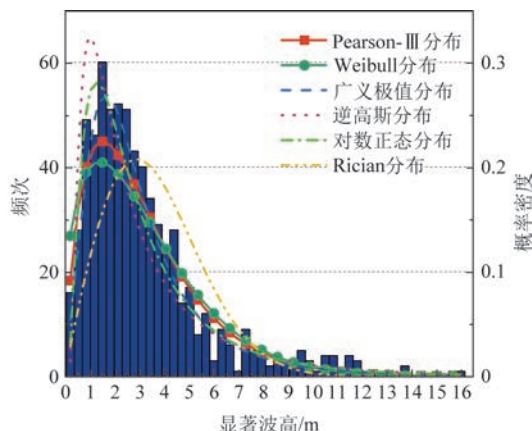


图3 万宁市东部海域年最大波高(a)和极值分布(b)

Fig.3 Annual maximum wave height (a) and extreme value distribution (b) in the eastern sea area of Wanning City

级依据,以7级以上大波(波高>6 m)为例讨论波向特征的统计方法。万宁当地的波高-波向玫瑰图见图4,图中方位表示波浪的去向。该图表明万宁市海域的波向以东部入射为主,发生14 m以上大波的概率约为4‰。由于波向取决于风的作用时间和范围,受路径影响较大,因此使用平均值做分析,并进行波向统计。

### 2.2 海域台风浪的波高和波向分布特征

参考《GB/T 42176—2022 海浪等级》绘制了历史最大显著波高的等级空间分布。从图5a中可以看出,海南岛周边海域主要台风浪隐患来源于东南方向;海南岛文昌市—陵水黎族自治县为台风登陆事件的高发区域,该海域的海浪等级达到最大的9级;琼州海峡的台风浪受地形水深的影响发生破碎,因此显著波高不大。对海南岛海域重现期显著波高进行统计分析,结果见图5b—d,从图中可以看

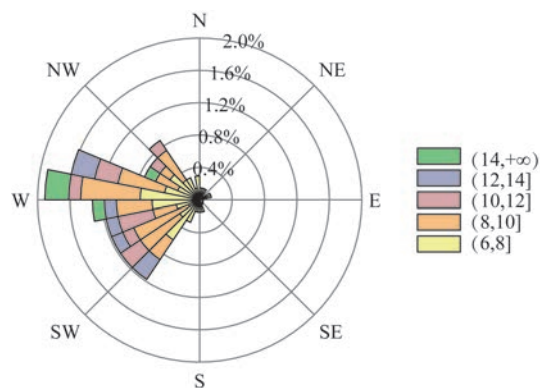


图4 万宁海域波高、波向分布

Fig.4 Wave height and wave direction distribution in the sea area of Wanning City

出不同重现期下的波高水平,海口市、临高市和东方市等西北区域受台风浪的危害相对较小。

7级以上和9级以上波浪的平均波向图见图6。海南岛东部沿岸7级以上台风浪为自东向西传播,西

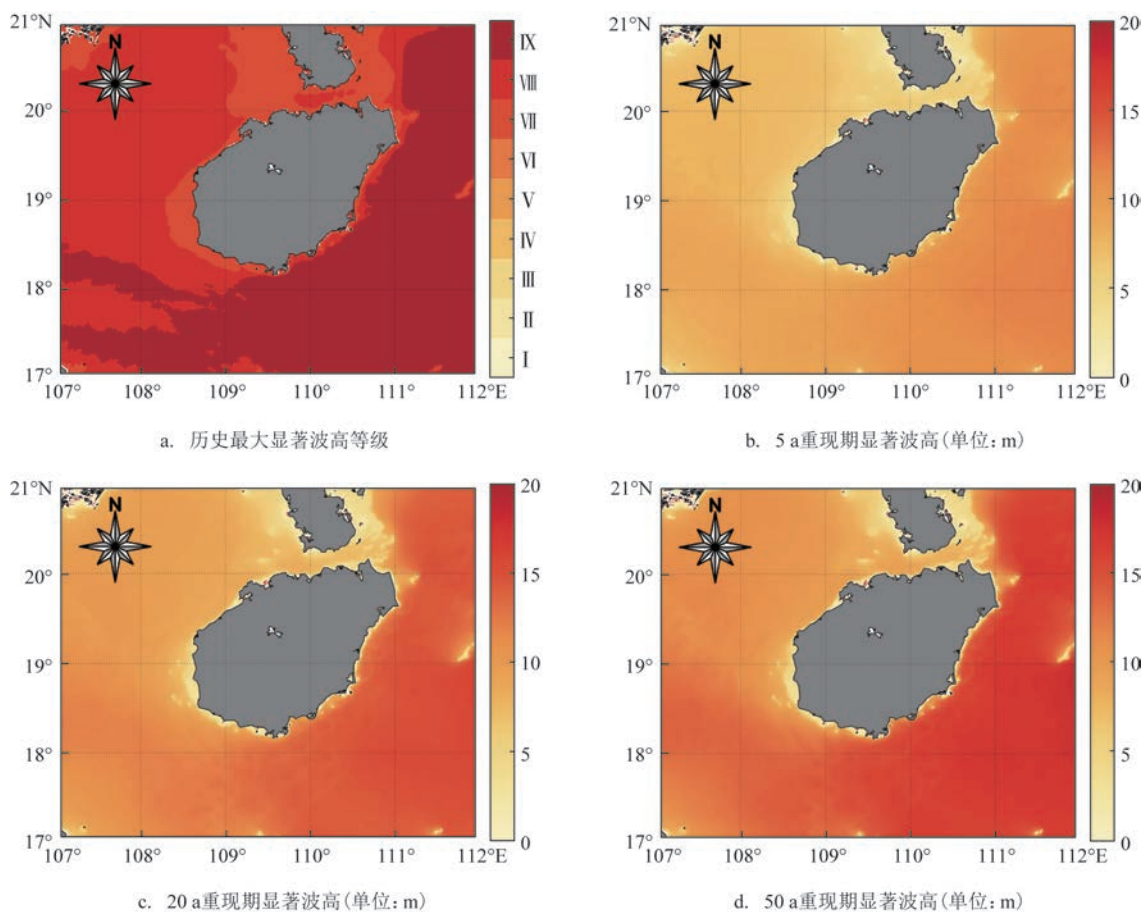


图5 研究区海域波高要素分布

Fig.5 Distribution of wave height around the research sea area

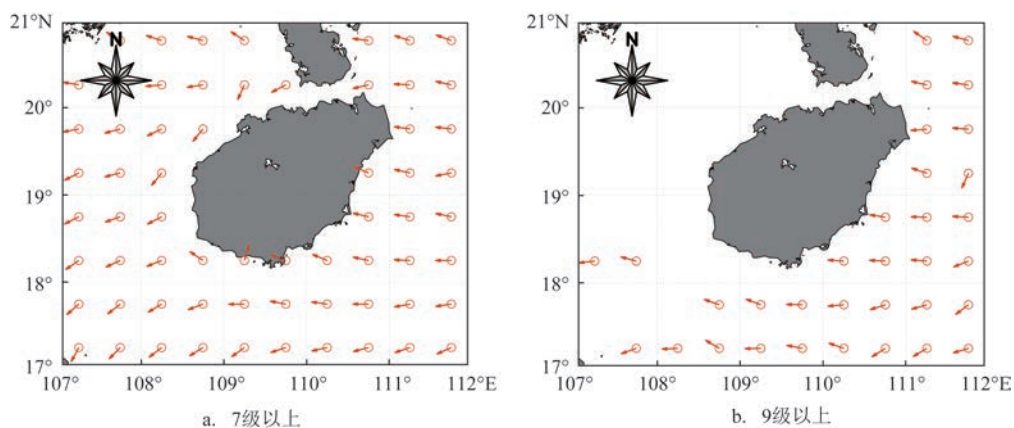


图6 研究区海域大波波向分布

Fig.6 Distribution of large wave direction around the research sea area

部沿岸的风浪为由东北向西南传播。进入北部湾的风浪沿越南沿岸向南深入传播;经琼州海峡的风浪分别向西南和西北沿岸传播。从图6b可以看

出北部湾和琼州海峡区域几乎没有9级以上(14 m以上)的波浪,海南岛东部和南部的大波为东西方向。

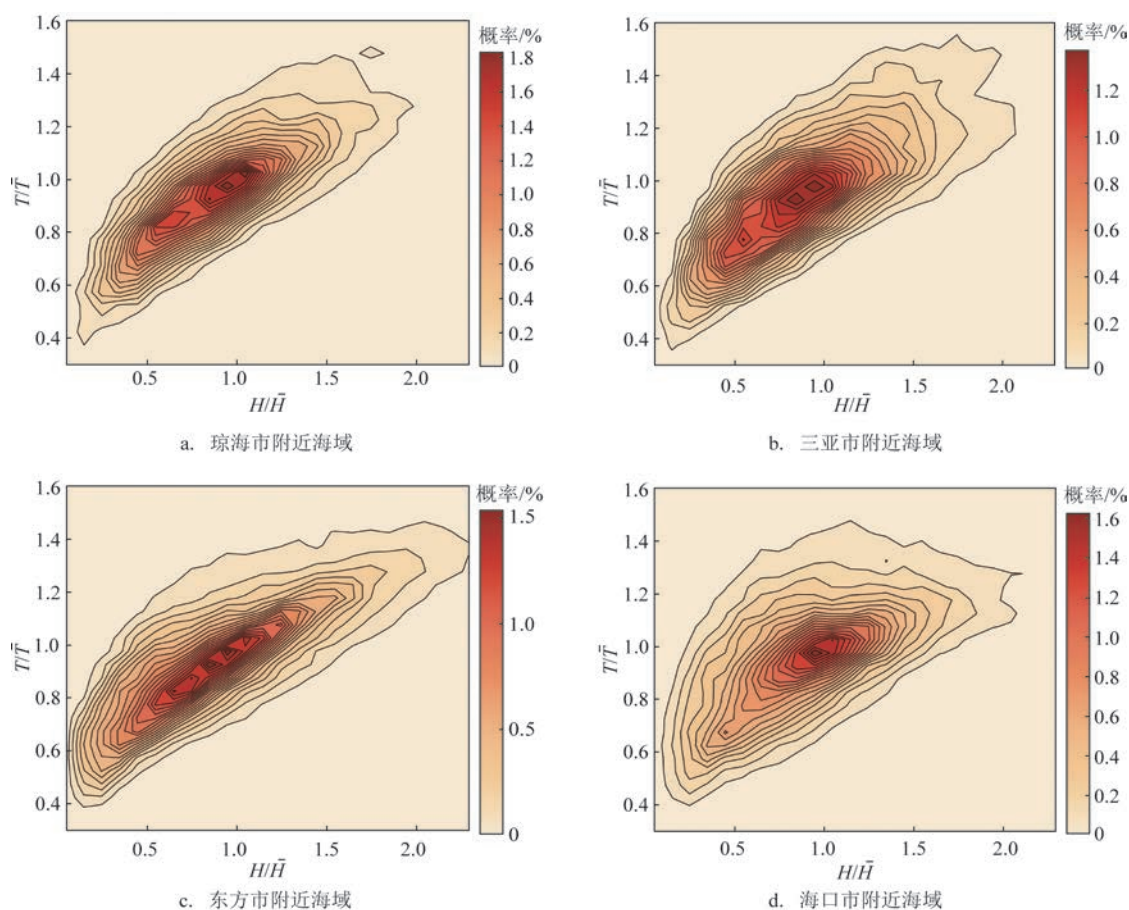


图7 研究区海域波高-周期关系

Fig.7 Relationships between significant wave height and peak period around the research sea area

在海洋工程设计中,海浪周期不容忽视,低频大波会导致结构共振,高频大波易导致结构疲劳。以琼海市、三亚市、东方市和海口市分别代表海南岛东部、南部、西部和北部海域,分析波高周期的相关关系,结果见图7。由于海浪随机性强,对环境敏感,因此采用无量纲量反映普遍特征,图中横坐标为波高比( $H/\bar{H}$ ),纵坐标为周期比( $T/\bar{T}$ )。从图中可以看出,单一台风浪过程的最大波高基本为平均波高的2倍,最大波高对应周期约为平均周期的1.4~1.5倍;在琼海、三亚等风浪直接作用的海域,海浪高度和周期的相关性较强,周期比的分布基本左右对称,与宗芳伊<sup>[6]</sup>在三亚附近海域的风浪研究结果一致;在东方、海口等主要受涌浪和波浪破碎影响的海域,波高和周期的相关性较弱,小波高也可能对应大周期,但由于波高较小,对海洋工程结构物的危害也相对较弱。

### 3 结论

本文重构了1959—2021年影响海南岛的热带气旋过程,结合SWAN波浪模型模拟再现了682场台风浪过程,基于台站和浮标数据对模式的有效性进行验证,并对海南岛沿岸的台风浪波高、波向和周期要素的分布规律进行分析。结论如下:

- ①海南岛发生狂涛的风险主要分布在东南沿海,万宁市和陵水黎族自治县附近海域尤为严重,该地区50 a重现期的波高最大可达到17 m左右。
- ②由于北部湾和琼州海峡的水深较浅,因此该地区受灾程度一般较小。
- ③台风浪以自东向西传播为主,进入北部湾后受岸线和水深影响转向西南方向沿岸传播。
- ④周期和波高的相关关系对环境和地形敏感,建立于无量纲量上的分析表明最大波高基本为单



一过程平均波高的2倍,最大波高对应周期约为平均周期的1.4~1.5倍,东南沿海地区的海浪高度和周期表现出较强的相关关系。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王一心, 潘毅, 周凤妍, 等. 江苏海域台风浪波高时空分布特性研究[J]. *海洋预报*, 2023, 40(5): 23-34.  
WANG Y X, PAN Y, ZHOU F Y, et al. Study on the spatial and temporal distribution characteristics of typhoon wave height in Jiangsu coastal sea[J]. *Marine Forecasts*, 2023, 40(5): 23-34.
- [3] 尹超. 海南岛近海热带气旋引起的台风浪风险评估研究[D]. 青岛: 中国科学院大学(中国科学院海洋研究所), 2020.  
YIN C. Tropical cyclone induced storm wave hazard assessment in Hainan Island, China[D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [4] 石洪源, 曹雪峰, 文先华, 等. 台风“山神”过境期间南海西北部海南岛附近海区台风浪空间特征数值模拟研究[J]. *海洋环境科学*, 2016, 35(3): 366-373.  
SHI H Y, CAO X F, WEN X H, et al. Numerical model research of the spatial characteristics of typhoon waves in the northwestern of the south China sea near Hainan island during the transmit of typhoon “Son-Tink” [J]. *Marine Environmental Science*, 2016, 35(3): 366-373.
- [5] 蒋璐璐, 涂小萍, 王毅, 等. “米娜”(1918)台风浪特征及其与“利奇马”(1909)的差异[J]. *海洋预报*, 2021, 38(4): 53-60.  
JIANG L L, TU X P, WANG Y, et al. Characteristics of typhoon-induced wave by Mitag(1918) and their differences with that induced by typhoon Lekima(1909)[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(4): 53-60.
- [6] 郑祥靖. 福建宁德沿海重点工程海域可能最大台风浪分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2021, 43(4): 55-61.  
ZHENG X J. Analysis of probable maximum typhoon wave for key coastal project in the Ningde City of Fujian Province[J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2021, 43(4): 55-61.
- [7] 陈橙, 杜飞, 李焱, 等. 福建沿海台风浪模拟及其对台风路径平移的响应[J]. *水运工程*, 2022(8): 32-39.  
CHEN C, DU F, LI Y, et al. Simulation of typhoon waves along the coast of Fujian and its responses to typhoon path translation[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2022(8): 32-39.
- [8] LU X Q, YU H, YING M, et al. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, 38(4): 690-699.
- [9] YING M, ZHANG W, YU H, et al. An overview of the China meteorological administration tropical cyclone database[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2014, 31(2): 287-301.
- [10] The SWAN Team. SWAN scientific and technical documentation [M]. 2009.
- [11] LI X H, YANG J S, HAN G Q, et al. Tropical cyclone wind field reconstruction and validation using measurements from SFMR and SMAP radiometer[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(16): 3929.
- [12] SCHENKEL B A, HART R E. An examination of tropical cyclone position, intensity, and intensity life cycle within atmospheric reanalysis datasets[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(10): 3453-3475.
- [13] 陈雅雅, 邹仲水, 赵栋梁. 基于SWAN模式的台风浪数值模拟初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 2017(6): 1-10.  
CHEN Y Y, ZOU Z S, ZHAO D L. A preliminary study of typhoon wave based on numerical simulations using SWAN model [J]. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2017(6): 1-10.
- [14] QI P, WANG A M. Numerical simulation of tropical cyclone generated waves in South China Sea during winter monsoon surge [J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 22156.
- [15] 赵广生, 牛小静. 海南岛历史风暴潮模拟和灾害风险评估[J]. *水动力学研究与进展A辑*, 2022, 37(6): 831-836.  
ZHAO G S, NIU X J. Simulation of historical storm surge and hazard assessment around Hainan Island[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2022, 37(6): 831-836.
- [16] 宗芳伊. 近20年南海波浪及波浪能分布、变化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.  
ZONG F Y. Research on distributions and variations of sea wave and wave energy in South China Sea during recent 20 years[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014.

## Simulation and assessment of historical storm waves around Hainan Island

YANG Zhiheng<sup>1,2,3</sup>, NIU Xiaojing<sup>1,2,3\*</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Key Laboratory of Hydrosphere Sciences of the Ministry of Water Resources, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** This study conducts a series of numerical simulations to reconstruct storm waves around Hainan Island during historical typhoon scenarios happened in the South China Sea. Based on the best path dataset of typhoons from 1959 to 2021 provided by the Tropical Cyclone Data Center of the China Meteorological Administration, an empirical wind mode combined with the reanalysis wind field data obtained from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) has been used to drive the third-generation wave model SWAN, which is used to simulate the wave process during each typhoon event. The numerical results are compared with the observed data during the Typhoon "Sarika" in 2016 and Typhoon "Chaba" in 2022, proving the good accuracy of the model. Totally 682 typhoon events have been simulated. Based on the simulation results, the spatial distribution of wave characteristics around Hainan Island has been provided. Furthermore, the wave height, wave direction and wave period along the coast of Hainan Island have been preliminary evaluated.

**Key words:** Hainan Island; South China Sea; storm wave; SWAN; numerical reproduction