文章编号:1000 - 4653(2026)04 - 0143 - 10

基于 WAVEWATCH Ⅲ在超强台风快速增强阶段的台风浪研究

陈 辰[1,2,3,4*], 经 荣[1], 陈浩宇[1], 刘敬贤[1,2,3,4]
(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 内河航运技术湖北重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 水路交通控制国家重点实验室, 湖北 武汉 430063)

摘 要:随着航运业的蓬勃发展,为保障船舶的安全航行以及提高船舶的运营效率,对极端海况背景下的海浪精准模拟提出了更高要求。现有第三代海浪数值模式(WW3)在超强台风快速增强阶段的适用性和最佳模拟方案等方面仍存在不足,难以有效解决台风海事预警中,对超强台风快速增强阶段的台风浪精确模拟与浪灾风险精准定级的问题。针对上述问题,采用一种多维度敏感性分析的方法。首先,基于中国气象局所提供的西北太平洋热带气旋最佳路径数据集以及广东省海事局的船舶事故调查报告,获取了台风特征以及船舶事故信息。其次,基于 WW3 模式构建了高精度的台风浪模拟试验;在源项方案方面,采用了 WW3 模式当中常用的 3 种方案(ST2/ST4/ST6);在驱动风场方面,采用天气研究与预报模式、欧洲中期天气预报中心第五代全球气候大气再分析数据以及美国国家环境预报中心最终分析资料,以探究 WW3 模式的适用性与最佳模拟方案。并结合国家海洋局观测浮标及统计检验指标,形成完整的技术方案。在超强台风快速增强阶段的背景下,通过采用不同的源项方案与驱动风场进行 WW3 试验,并与观测浮标进行对比分析。结果表明:以天气预报模式(WRF)风场驱动,并采用 ST2 方案的试验在台风中心位置处的模拟效果更佳,其余区域 ST4 和 ST6 方案表现更佳。

关键词:航行安全;WAVEWATCH III;敏感性分析;台风浪;台风快速加强
中图分类号:U698.91 **文献标志码**:A **DOI**:10.3969/j.issn.1000 - 4653.2026.04.016

Typhoon-wave modeling during the rapid intensification stage of super typhoons using WAVEWATCH Ⅲ

Chen Chen[1,2,3,4*], *Jing Rong*[1], *Chen Haoyu*[1], *Liu Jingxian*[1,2,3,4]
(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center of Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 4. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: With the vigorous growth of the shipping industry, ensuring navigational safety and improving operational efficiency have imposed higher demands on accurate wave simulations under extreme sea states. However, the applicability of the third-generation spectral wave model WAVEWATCH III (WW3) and the identification of optimal simulation configurations during the rapid intensification stage of super typhoons remain insufficient, limiting its ability to address two

收稿日期:2025-07-09
基金项目:国家自然科学基金项目(52201416)资助
第一作者(*通信作者):陈 辰(1988—),男,副研究员,博士,研究方向为船舶气象导航、绿色智能船舶,(E-mail)cc198895@whut.edu.cn
引用格式:陈辰,经荣,陈浩宇,等. 基于 WAVEWATCH Ⅲ在超强台风快速增强阶段的台风浪研究[J]. 中国航海,2026,49(4):143 - 152.
Chen C, Jing R, Chen H Y, et al. Typhoon-wave modeling during the rapid intensification stage of super typhoons using WAVEWATCH Ⅲ[J]. Navigation of China,2026,49(4):143 - 152. (in Chinese)

key challenges in typhoon-related maritime early warning: accurate simulation of typhoon-generated waves during the rapid intensification stage and precise classification of wave-induced disaster risk. To tackle these issues, a multi-dimensional sensitivity analysis framework is employed. First, typhoon characteristics and ship-accident information are compiled using the Northwest Pacific tropical cyclone best-track dataset provided by the China Meteorological Administration (CMA) and vessel accident investigation reports from the Guangdong Maritime Safety Administration. Second, high-resolution typhoon-wave simulation experiments are established using WW3. For source-term parameterizations, three widely used WW3 schemes (ST2, ST4, and ST6) are adopted. For atmospheric forcing, wind fields from the Weather Research and Forecasting (WRF) model, the fifth-generation ECMWF global atmospheric reanalysis (ERA5), and the NCEP Final Analysis (NCEP-FNL) are used to examine WW3 performance and to determine the optimal simulation configuration. Combined with observations from National Oceanic Administration buoys and standard statistical validation metrics, a complete technical workflow is developed. Under rapid intensification conditions of super typhoons, WW3 experiments with different source-term schemes and wind forcing fields are conducted and evaluated against buoy measurements. The results indicate that simulations driven by WRF winds and using the ST2 scheme achieve superior performance near the typhoon center, whereas the ST4 and ST6 schemes perform better in other regions.

Key words: navigation safety; wavewatch iii; sensitivity analysis; typhoon waves; rapid intensification of typhoons

随着我国“21世纪海上丝绸之路”、海洋强国战略和交通强国战略的实施,海洋资源的开发与利用日益受到学界重视。海上船舶安全航行是保障海洋经济活动的重要前提。目前,已有众多专家学者在这方面开展了研究。毕修颖等[1]为船舶驾驶员提供近距离船舶碰撞危险预测和船舶碰撞决策支持。王宏刚等[2]在考虑气象环境要素等基础上,提出船舶吃水提升方案。王凤武等[3]对海上风电场周边海域船舶通航安全进行评估。此外,船舶在航期间受自然环境影响显著,恶劣气象条件不仅影响航速、燃油消耗和航行时间,极端情况下甚至可能导致船舶倾覆、船体断裂和人员伤亡。据统计,全球30%的船舶事故由恶劣的气象因素引发[4]。因此,实施有效的气象导航对海上船舶航行至关重要。我国的南海地区位于西北太平洋,而西北太平洋是全球台风活动最为频繁的地区之一[5]。研究台风期间风浪演变规律并应用于船舶气象导航,是保障航行安全的关键措施。然而,卫星和浮标等观测手段在时空分辨率和覆盖范围上存在局限。在此背景下,高分辨率海浪数值模拟为准确再现海况、特别是恶劣海况提供了有效的解决方案。

目前,广泛应用的第三代海浪模式主要包括WW3(WAVEWATCH III)和SWAN(Simulating Waves Nearshore),这两种海浪数值模式也是国际上采用的主要海浪业务模式。为验证第三代海浪模式的可靠性,江丽芳等[6]指出WW3和SWAN在南海北部对有义波高的模拟效果均较好。Montoya等[7]基于墨西哥湾卡特丽娜飓风数据发现WW3在高能区域的波浪参数空间表现可靠。徐丽丽等[8]结合WW3及其他模式构建东海及上海近海的海浪预报系统。张俊明等[9]采用天气预报模式(Weather Research and Foresting Model,WRF)生成中国沿海高分辨率风场,驱动WW3和SWAN嵌套模拟南海波浪场。Abdolali等[10]采用WW3模拟大尺度飓风波浪演化过程。白珍胜等[11]利用WW3模拟西太平洋岛礁波浪。王娟娟等[12]通过2次台风浪模拟验证WW3再现海面浪场有效波高和最大波高的可靠性。这些研究均表明,高精度数值模拟能准确再现海面浪场,即便对台风等剧烈变化的灾害亦然。为探究输入场差异对海浪模式的影响,Chen等[13]提出针对恶劣天气情况,建议高分辨率WRF生成海面风场,结合WW3模式进行海浪模拟,可获得最优的气象数据精度。胡正元等[14]使用盘古模型预报风场驱动SWAN模拟台风浪时,有效波高会出现明显低估。为探究不同源项方案对海浪模式的影响,Seemanth等[15]指出WW3的ST2源项方案对热带气旋引发的波浪模拟效果最优。在中国南海台风浪研究中,文献[16]和文献[17]分别测试WW3中的多种源项方案,结果显示ST2源项方案的模拟精度最高。Sheng等[18]对台风灿鸿影响下舟山群岛近岸波浪进行数值模拟,证实ST2源项方案最适应该区域地形特征。Liu等[19]采用ST6源项方案的WW3能准确模拟多数波浪参数。Umesh等[20]指出在印度洋ST2源项方案模拟恶劣海况更具优势。Foli等[21]在西非海域的研究发现,ST2STAB模拟有义波高效果最佳。上述相关研究主要关注WW3再现实际海况的能力、输入场和源项方案不同对试验结果的影响这3个方面,现有研究较少将WW3应用于船舶气象导航实践,仅文献[13]关注WRF和WW3模式在航海实际当中的应用表现。然而,针对超强台风快速加强过程在航海应用当中的研究并未引起关注。基于第三代海浪模式,针对超强台风快速增强阶段

的台风浪相关研究并未获得足够的重视。

准确的海浪预报对船舶航行的安全、经济和环保效益至关重要。本研究基于上述相关研究,采用多种风场输入和源项方案,同时增加洋流和水位输入数据,以尽可能地再现真实的海浪场,使用的观测浮标数据来源于国家海洋局,对 1713 号台风天鸽引发的台风浪开展全面的高精度数值模拟,评估 WW3 模式在模拟超强台风快速加强过程中的适用性和可靠性,并获得最佳的模拟方案,以期对船舶气象导航实践提供参考依据。

1　台风天鸽及船舶事故简介

1.1　台风天鸽简介

1713 号台风天鸽是近年来对中国南海造成严重破坏的台风之一。受海温异常偏高、环境风垂直切变小、热带东风急流和副热带西风带急流增强等因素影响[22],该台风呈现快速增强和移动迅速等特征。此类快速增强型台风对船舶航行安全的威胁显著大于非快速增强型台风。根据广东省海事局发布的船舶事故调查报告,天鸽在快速增强阶段导致珠江口水域发生多起船舶事故。从船舶气象导航角度而言,研究此类台风的台风浪场演变特征,对实际航海中的台风避离具有重要意义。

2017 年 8 月 20 日(UTC 时间),台风天鸽在西北太平洋生成,22 日穿过吕宋海峡进入南海,并增强至台风级。23 日凌晨,其强度进一步提升为强台风级,并于 04:50 以 14 级风速(45 m/s)登陆广东珠海市。该台风是 2017 年登陆我国的最强热带气旋,具有近海快速增强、鼎盛期登陆、正面袭击珠江口、强风和风暴潮破坏力大等特点。尤其在逼近广东沿海时,其强度急剧上升,近中心最大风速从 22 日 03:00 的 25 m/s 增至 23 日 03:00 的 48 m/s,中心气压由 985 hPa 骤降至 940 hPa。24 h 内风速增幅达 23 m/s,气压降幅达 45 hPa,其中 22 日 15:00—23 日 03:00 的 12 h 内风速增强 13m/s,符合国际公认的台风快速增强标准[23]。

本研究采用的台风天鸽数据来自 CMA(China Meteorological Association)最佳路径数据集,台风天鸽的基本信息见表 1。台风天鸽轨迹及浮标位置分布见图 1,其展示了研究使用的波浪浮标分布信息。

1.2　船舶事故简介

根据广东省海事局发布的船舶事故调查报告统计,台风天鸽过境期间在珠江口水域共引发 16 起船舶事故。事故分析表明:其中 10 起事故的直接诱因为强风浪导致的船舶走锚,进而引发触礁、搁浅等次

表 1　台风天鸽的基本信息

Tab. 1　Basic information about typhoon Hato

UTC 时间	纬度/(°)	经度/(°)	风速/kn	移动速度/kn
2017/8/22 00:00	20° 24′.000″	120° 06′.000″	48	12
2017/8/22 03:00	20° 27′.972″	119° 29′.384″	53	12
2017/8/22 06:00	20° 30′.000″	118° 48′.000″	58	13
2017/8/22 09:00	20° 30′.000″	117° 54′.000″	64	13
2017/8/22 12:00	20° 36′.000″	117° 18′.000″	64	13
2017/8/22 15:00	20° 48′.000″	116° 42′.000″	68	14
2017/8/22 18:00	21° 06′.000″	116° 00′.000″	68	14
2017/8/22 21:00	21° 18′.000″	115° 12′.000″	77	15
2017/8/23 00:00	21° 30′.000″	114° 30′.000″	87	16
2017/8/23 03:00	21° 48′.000″	113° 48′.000″	101	16
2017/8/23 06:00	22° 06′.000″	112° 54′.000″	81	17
2017/8/23 09:00	22° 22′.264″	111° 54′.000″	64	18
2017/8/23 12:00	22° 36′.000″	110° 54′.000″	48	18

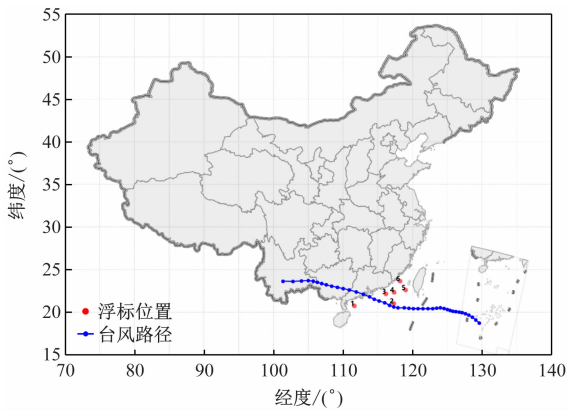


图 1　台风天鸽轨迹及浮标位置分布(审图号:GS(2023)2767)

Fig. 1　The track of typhoon Hato and the distribution of buoy positions (drawing review No. GS(2023)2767)

生事故,甚至出现船体断裂及沉没等灾难性后果;其余 6 起事故则主要归因于极端恶劣气象条件引发的船舶倾覆或沉没。

2 试验设置及数据来源

2.1 模式简介

WW3 在传播过程中考虑地形和海流的空间变化导致的波浪折射作用和浅水变形作用等;模式考虑了风成浪作用、白帽耗散作用、海底摩擦作用和波-波非线性相互作用等。WW3 在以球坐标系下波作用量密度谱平衡方程为控制方程,有

$$\frac{\partial N}{\partial t}+\frac{1}{\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}(\varphi N\cos\theta)+\frac{\partial}{\partial\lambda}(\lambda N)+\frac{\partial}{\partial k}(kN)+\frac{\partial}{\partial\theta}(\theta_g N)=\frac{S}{\sigma} \tag{1}$$

$$\varphi=\frac{C_g\cos\theta+U_\varphi}{R} \tag{2}$$

$$\lambda=\frac{C_g\sin\theta+U_\lambda}{R\cos\varphi} \tag{3}$$

$$\theta_g=\theta-\frac{C_g\tan\varphi\cos\theta}{R} \tag{4}$$

式(1)~式(4)中:N 为波作用量密度谱;φ 为经度;λ 为纬度;θ 为波向;S 为源项;σ 为波浪相对角频率;C_g 为波群速度;R 为地球半径;U_φ 为 φ 方向上海流速度分量;U_λ 为 λ 方向上的海流速度分量;k 为波数。在本研究当中源项 S 为

$$S=S_{\mathrm{ln}}+S_{\mathrm{in}}+S_{\mathrm{nl}}+S_{\mathrm{ds}}+S_{\mathrm{bot}}+S_{\mathrm{db}}+S_{\mathrm{tr}}+S_{\mathrm{ref}} \tag{5}$$

式(5):S_{ln}为线性输入项;S_{in}为大气和波浪作用项;S_{nl}为非线性波-波相互作用项;S_{ds}为波浪-海洋相互作用项(通常为耗散项);S_{bot}为波-底相互作用项,S_{db}为由水深变浅而引发的破碎项;S_{tr}为三波相互作用项;S_{ref}为海岸线或浮体反射项。

2.2 试验设置

WW3 试验嵌套网格分布见图 2,本研究采用双向嵌套方法设置 WW3 模式的双层网格:d_1 和 d_2 的网格分辨率分别为 0.1°和 0.05°。所有网格均配置 36 个方向(分辨率 10°)和 38 个离散波数,起始频率 0.034 5 Hz,后续频率按 1.1 倍递增,终止频率 1.173 1 Hz,试验结果每 10 min 输出一次。在模拟 1713 号台风天鸽前,所有案例的启动阶段均为一个月,以提供符合实际的初始波浪场。考虑到库朗-弗里德里希斯-勒维(Courant-Friendrichs-Leny,CFL)条件,d_1 和 d_2 的网格传播时间步长、空间传播时间步长、谱传播时间步长和源项积分时间步长设置各不相同,WW3 模式的时间步长设置见表 2。

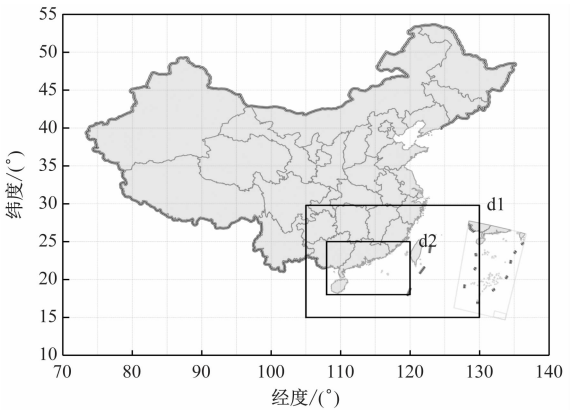


图 2 WW3 试验嵌套网格分布(审图号:GS(2023)2767)

Fig. 2 The distribution of nested grids in the WW3 experiment (drawing review No. GS(2023)2767)

表 2 WW3 模式的时间步长设置

Tab. 2 Time step configuration in the WW3 model

网格编号	网格传播步长/s	空间传播步长/s	谱传播步长/s	源项积分步长/s
d_1	1 200	300	600	15
d_2	600	150	300	10

本研究采取 WW3 当中常用的 3 种不同的风输入项和耗散项介绍见表 3。WW3 源项方案设置见表 4。试验通过控制变量法,保持其他源项方案不变,只改变风输入项和耗散项方案,来评估上述方案在中国南海的超强台风快速加强阶段波浪模拟的适用性[24]。

表 3 WW3 模式的 3 种不同的风输入和耗散项介绍

Tab. 3 A comparative of three wind input and wave dissipation schemes in the WW3 model

对比维度	ST_2 方案	ST_4 方案	ST_6 方案
风输入	Janssen 理论	强调短波对风的响应	改进对弱风和强风下的能力输入描述
耗散项	经验白浪破碎公式	综合考虑湍流耗散和白浪破碎	引入白浪饱和机制

表 4 WW3 源项方案设置

Tab. 4 Configuration of WW3 source terms

源项	源项方案
线性输入项	Cavaleri 方案
非线性波-波相互作用项	DIA 法
风输入项和耗散项	$ST_2/ST_4/ST_6$ 方案
底摩擦项	JONSWAP 方案
波浪破碎项目	Battjes and Janssen 方案
三波相互作用项	LTA 方法

2.3　输入场及验证数据简介

为确保 WW3 模式的精确运行,风速和风向数据的准确性至关重要。在海浪模拟中,风场误差往往是主要的不确定性来源[25]。本研究采用 3 种风场数据:美国国家环境预报中心与大气研究中心联合发布的 NCEP-FNL 数据集(1°×1°分辨率,每 6 h 更新)、欧洲中期天气预报中心的 ERA5 再分析数据(0.25°×0.25°分辨率,每小时更新)和通过 WRF 模式生成的高分辨率近地面风场数据。WRF 作为新一代中尺度数值天气预报系统,在台风模拟和实时预报中应用广泛[26]。本研究中,WRF 以 NCEP-FNL 为初始和边界条件,生成 3 km 分辨率风场(每 6 h 输出一次)。此外,本研究还使用 Copernicus 提供的流场(0.25°×0.25°分辨率,每小时更新)和水位场数据(0.125°×0.125°分辨率,每日更新),经插值处理到相同的分辨率后输入 WW3。

本研究采用的 6 个波浪浮标数据来自国家海洋局观测浮标,该数据以 10 min 为采样间隔记录了波浪参数,用于验证数值模拟试验结果的可靠性。

3　试验结果及讨论

3.1　验证方法

在本研究中采用偏差(Bias,B)以及均方根误差(Root Mean Squared Error,R_{MSE})来评价 WW3 模式输出波浪数据的可靠性,有

$$B = \frac{\sum (X_i - Y_i)}{N} \tag{6}$$

$$R_{\mathrm{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{N}} \tag{7}$$

式(6)和式(7)中:B 和 R_{MSE} 分别为偏差和均方根误差,越接近零表明模拟能力越强;X_i 和 Y_i 分别为模拟值和观测值;$\overline{X}$ 和 $\overline{Y}$ 分别为模拟值和观测值的平均值;N 为模拟的时间周期。

3.2　风场验证

在台风浪数值模拟中,海浪模拟精度主要取决于海面风场数据的准确性。由于缺少台风快速加强阶段的浮标风速观测数据,本研究采用 CMA 提供的台风最大风速作为验证数据,对 WRF、ERA5 和 NCEP-FNL 3 种风场的最大风速进行对比分析见图 3。由图 3 可知:ERA5 和 NCEP-FNL 的最大风速值相对偏低,ERA5 风场的低估现象尤为显著,这与文献[27]的研究结论相符;WRF 风场能更准确地反映台风风场的实际状况。

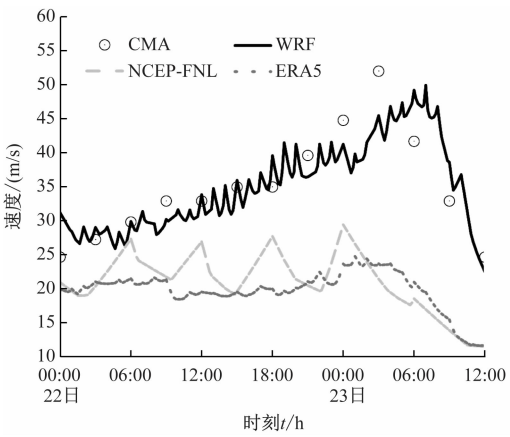


图 3　CMA 及各驱动风场最大风速对比

Fig. 3　Comparison of maximum wind speeds from CMA and various driving wind fields

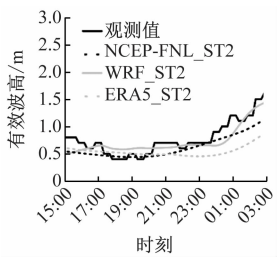
3.3　波浪验证

因 d_2 网格具有更高的分辨率,故采用 d_2 网格的试验结果进行分析。台风快速加强阶段(22 日 15:00—23 日 03:00 UTC)各浮标有效波高的实测值与不同源项方案、3 种风场的模拟结果对比见图 4~图 6。各浮标不同风场及源项方案的有效波高偏差和均方根误差见图 7 和图 8。为便于表述,将 WRF 风场驱动、ST2 源项方案的 WW3 试验简称为 WRF-ST2 方案;WRF 风场驱动的 WW3 试验简称为 WRF-WW3,其他试验采用相同命名规则。

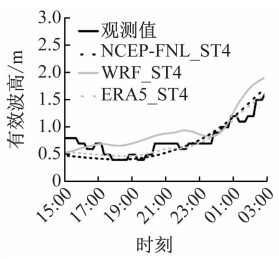
1)浮标 1 距离台风天鸽相对较远,故在台风快速加强阶段时,有效波高从较低值开始上升。浮标 1 处的 WW3 试验结果能较好地反映有效波高的变化趋势,特别是 NCEP-FNL-ST4 和 ERA5-ST4 方案如图 4a~图 4c 所示。采用 ERA5-ST4 和 ERA5-ST6 方案的试验结果偏差和均方根误差最接近于 0,偏差分别为 -0.027 和 -0.030,而均方根误差分别为 0.123 和 0.139 如图 7a 和图 8a 所示。

2)浮标 2 距离台风天鸽最近,随着天鸽向西北方向继续移动,浮标 2 所记录的有效波高逐渐下降。由图 4d~图 4f 可知:不论采用何种源项方案,WRF-WW3 存在高估现象,ERA5-WW3 则相反。NCEP-FNL-ST2 方案低估了有效波高,NCEP-FNL 风场驱动的其他源项方案则相对不稳定。然而,WRF-WW3 更能反映浪场的变化趋势。由图 7b 和图 8b 可知:NCEP-FNL-ST4 和 NCEP-FNL-ST6 方案具有最接近于 0 的偏差,分别为 0.100 和 0.055,而 ERA5-ST6 方案则具有最低的均方根误差(0.669)。

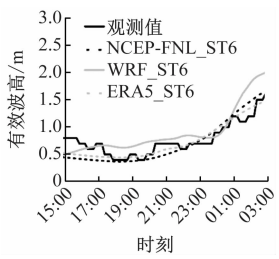
3)浮标 3 距离天鸽第二近。由图 5a~图 5c 可知:ERA5-ST4 和 ERA5-ST6 方案表现更佳。由图 7c 和图 8c 可知:ERA5-ST4 和 ERA5-ST6 方案的偏差



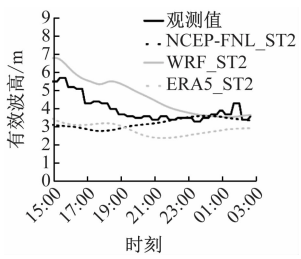
(a) 浮标 1 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



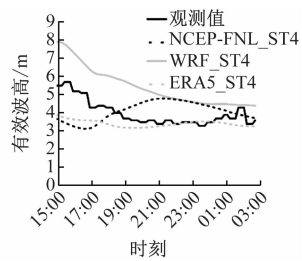
(b) 浮标 1 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



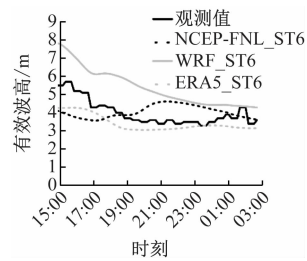
(c) 浮标 1 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较



(d) 浮标 2 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



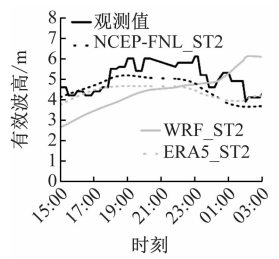
(e) 浮标 2 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



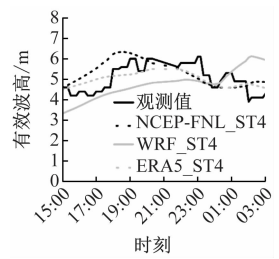
(f) 浮标 2 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较

图 4 浮标 1 和浮标 2 各试验方案的有效波高对比

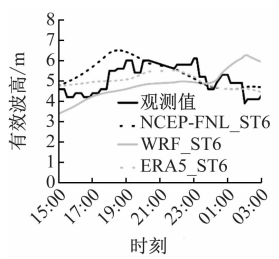
Fig. 4 The comparison of significant wave heights for Buoy 1 and Buoy 2 across different experimental schemes



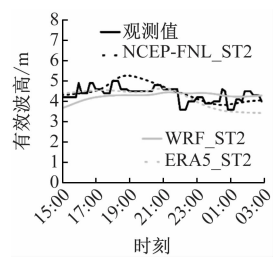
(a) 浮标 3 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



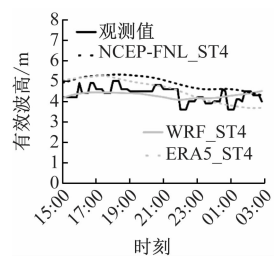
(b) 浮标 3 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



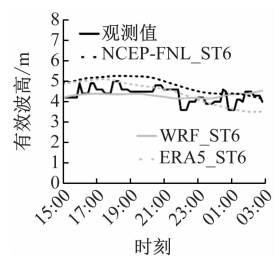
(c) 浮标 3 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较



(d) 浮标 4 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



(e) 浮标 4 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



(f) 浮标 4 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较

图 5 浮标 3 和浮标 4 各试验方案的有效波高对比

Fig. 5 The comparison of significant wave heights for Buoy 3 and Buoy 4 across different experimental schemes

最接近于 0,分别为 -0.045 和 -0.076,而 ERA5-ST4 方案的均方根误差最低(0.496),其次是 ERA5-ST6 方案(0.508)。

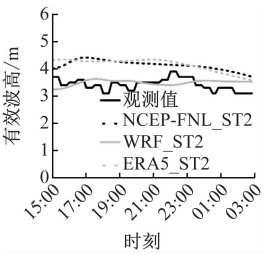
4) 浮标 4 与浮标 2-浮标 3 相比距离天鸽较远。由图 5d ~ 图 5f 可知:WRF-WW3 更能反映浮标 4 的有效波高实际变化情况,而 NCEP-FNL-ST4 和 NCEP-FNL-ST6 方案始终高估了有效波高。由图 7d 和图 8d 可知:WRF-WW3 均具有较小的偏差和均方根误差,WRF-ST4 和 WRF-ST6 方案的偏差最接近于 0,分别为 -0.038 和 -0.048,而 WRF-ST4 方案的均方根误差最小,WRF-ST6 方案(0.341)略高于 WRF-ST4 方案(0.324)。

5) 浮标 5 距离台风天鸽较远。由图 6a ~ 图 6c 可知:WRF-WW3 更能反映浮标 5 的有效波高实际变化情况。NCEP-FNL-WW3 和 ERA5-WW3 均存在高估有效波高的现象。由图 7e 和图 8e 可知:WRF-WW3 均具有较低的偏差和均方根误差,其中 WRF-ST2 和 WRF-ST6 方案的偏差接近于 0,分别为0.073 和 0.043,而均方根误差最接近于 0 的方案则是 WRF-ST6(0.229)和 WRF-ST4(0.261)。

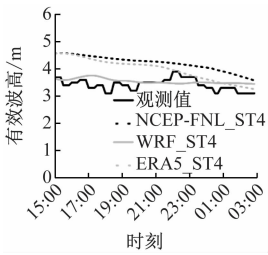
6) 浮标 6 距离台风天鸽较远。由图 6d ~ 图 6f 可知:所有方案得到的有效波高均存在高估现象,WRF-WW3 结果更符合实际的有效波高。由图 7f 和图 8f 可知:WRF-WW3 试验均具有较低的偏差和均方根误差,其中 WRF-ST6 方案的偏差(0.298)和均方根误差最小(0.393)。

3.4 讨论与分析

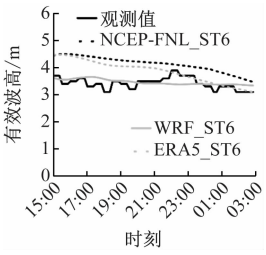
综上所述,WW3 模式的精确运行对于风场数据的准确性具有一定的要求。由于本研究缺乏实际风速观测数据,故采用 CMA 提供的最大风速与 3 种输



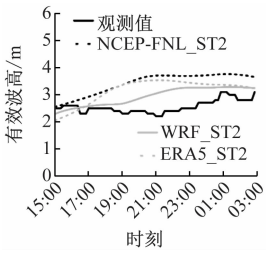
(a) 浮标 5 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



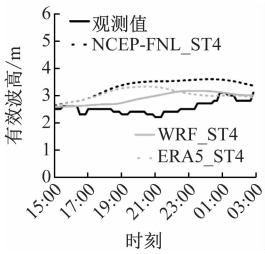
(b) 浮标 5 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



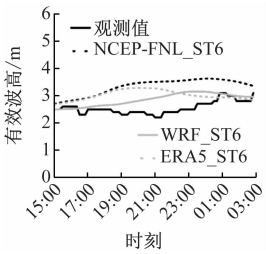
(c) 浮标 5 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较



(d) 浮标 6 处 WRF-ST2/ERA5-ST2/NCEP-FNL-ST2 试验结果比较



(e) 浮标 6 处 WRF-ST4/ERA5-ST4/NCEP-FNL-ST4 试验结果比较



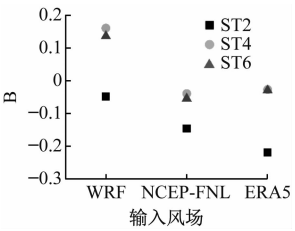
(f) 浮标 6 处 WRF-ST6/ERA5-ST6/NCEP-FNL-ST6 试验结果比较

图 6　浮标 5 和浮标 6 各试验方案的有效波高对比

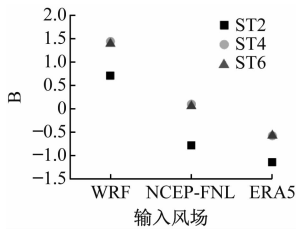
Fig. 6　The comparison of significant wave heights for Buoy 5 and Buoy 6 across different experimental schemes

入风向的最大风速进行对电验证如图 3 所示。但这可能导致一个问题:6 个波浪浮标位置的实际风场与试验中使用的 3 种风场之间的对应关系无法准确确定。因此可能出现 WRF 风场的最大风速大于 NCEP-FNL 和 ERA5 风场,但浮标位置的风速反而较小的情况,导致 WRF 风场驱动的试验结果低于 NCEP-FNL 和 ERA5 风场驱动的结果(如浮标 3 ~ 浮标 6)。

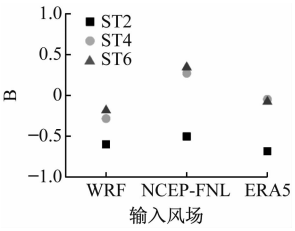
第 3.3 节通过 6 个波浪浮标验证了 WW3 对超强台风快速加强过程中台风浪的模拟能力。具体而言,浮标 1 距离台风中心位置较远,所有试验方案均能较好地反映台风浪的实际变化情况。浮标 2 和浮标 3 距离台风中心相较于其他浮标更近,尽管部分试验方案的结果相对不理想,但在浮标 2 处 NCEP-FNL-ST6 方案的偏差仅有 0.055,而 ERA5-ST6 方案的均方根误差为0.669,且WRF-ST2方案较好地反



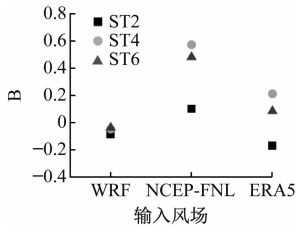
(a) 浮标 1



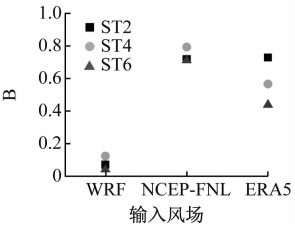
(b) 浮标 2



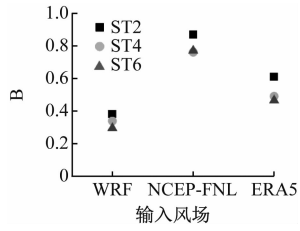
(c) 浮标 3



(d) 浮标 4



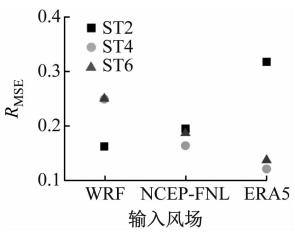
(e) 浮标 5



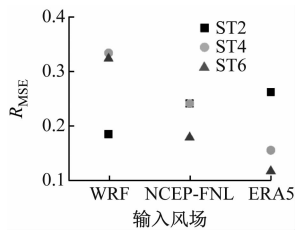
(f) 浮标 6

图 7　各浮标所有试验方案的有效波高偏差分析

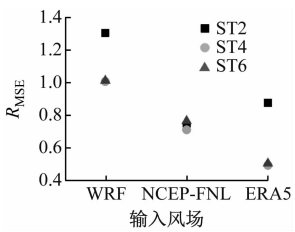
Fig. 7　Bias of significant wave height analysis of all experimental schemes for each buoy



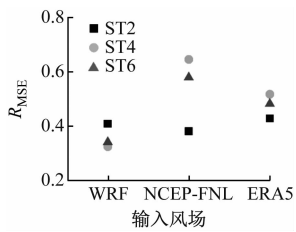
(a) 浮标 1



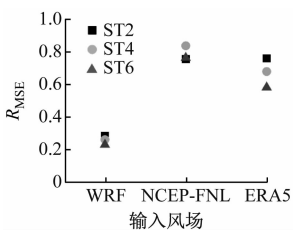
(b) 浮标 2



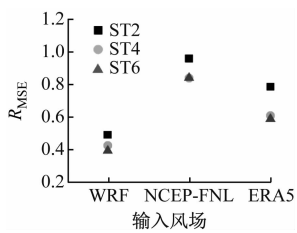
(c) 浮标 3



(d) 浮标 4



(e) 浮标 5



(f) 浮标 6

图 8　各浮标所有试验方案的有效波高均方根误差分析

Fig. 8　RMSE of significant wave height analysis of all experimental schemes for each buoy

映了台风浪的变化趋势;而在浮标3处的ERA5-ST4入风场的最大风速进行对比验证如图3所示。但这方案的偏差和均方根误差分别为-0.045和0.496,并且能较好地反映台风浪的变化趋势。浮标4~浮标6处距离台风中心较远,与浮标2和浮标3类似,WRF-WW3表现较佳。结果表明,虽然部分风场及源项方案的模拟效果欠佳,但仍存在具有较低偏差和均方根误差,并能反映台风浪变化趋势的可行方案。

图3表明在台风天鸽快速增强阶段WRF风场更能准确描述台风的实际变化趋势。图4~图8表明WRF-WW3均能较好地反映实际海况,具有较小的偏差和均方根误差,这在浮标4~浮标6处表现尤为明显。在浮标2处,WRF-WW3相较于其他风场及浮标观测数据存在一定的高估现象,这可能是因为在该处WRF风场存在高估现象,从航海实践的安全性角度考虑,对于台风浪一定程度上的高估是可以接受的。在浮标3处,NCEP-FNL-WW3和WRF-WW3反映有效波高的变化趋势的能力相对较差如图5a~图5c所示,这可能与源项方案和该处风场的变化趋势有关。此外,文献[13]的研究结论同样表明,WRF风场驱动的WW3试验结果反映恶劣海况的能力最佳,结合增强型统一理论(The Enhanced Unified Theory,EUT)模型能较好地反映船舶在恶劣气象条件下的运动响应。李江夏等[27]的研究表明ERA5风场对于高风速情况存在低估现象。基于本研究的试验结论和相关研究,本研究认为WRF风场驱动的WW3模式能较好地再现超强台风快速增强期间的台风浪,靠近台风中心处最佳的方案为WRF-ST2方案,其他位置则是WRF-ST4和WRF-ST6方案表现更佳。

虽然先前多数研究认为WW3模式采用ST2源项方案在恶劣天气条件下表现更优,但本研究得出的结论略有不同。这主要基于两个原因:

1)本研究聚焦于超强台风快速加强阶段(仅12 h),而非整个台风生命周期。

2)浮标2距离台风中心最近,海况最为恶劣,而WRF-ST2方案的模拟结果与浮标2记录的最大有效波高最为吻合且变化趋势一致。因此,本研究结论与已有研究并不矛盾。

4 结 语

围绕我国东南沿海台风影响下的水上交通安全保障需求,本文先简要介绍了1713号台风天鸽的基本情况,随后采用3种不同风场驱动WW3模式,结合该模式常用的3种源项方案,共设计9组试验。研究利用6个波浪浮标的观测数据作为验证数据集,评估WW3对超强台风快速加强过程中台风浪的模拟能力。主要研究结论如下:

1)在台风强度特征方面,WRF风场的最大风速较NCEP-FNL和ERA5风场更符合台风天鸽的实际观测数据。

2)WW3模式验证结果显示,不同浮标位置的最优驱动风场存在差异。针对浮标1~浮标3,ERA5或NCEP-FNL风场驱动的模拟结果偏差和均方根误差较小;其余浮标则以WRF风场表现更优。综合分析表明,WRF风场最能反映台风强度的实际变化趋势,且WRF-WW3组合对台风浪的模拟效果最优。

3)研究结果显示,WW3模式的ST4和ST6源项方案在模拟超强台风快速加强阶段的台风浪时整体表现更优,这与既往研究结论存在差异。这种差异可能源于本研究重点关注台风快速加强阶段而非完整生命周期。此外,距离台风中心最近的浮标2相关结论表明,WRF-ST2方案更适用于台风中心附近海域,而其他区域则宜采用WRF-ST4或WRF-ST6方案。

本研究结果可为热带气旋活动频发区域的航行风险评估与船舶避险路径规划提供科学支撑,对于提升极端天气条件下的海上交通安全保障能力具有重要的参考价值。但受限于详细风场数据及沿岸水域事故船舶信息的不足,本研究仅针对超强台风快速加强阶段的台风浪特征进行分析。后续研究采用多源数据融合方法,将能更准确地描述该过程中台风浪的演变特征。

参 考 文 献

[1] 毕修颖,史国友,毕家铭,等.船舶转向避让紧迫局面距离和碰撞距离数学模型的研究[J].中国航海,2025,48(1):60-68.
Bi X Y, Shi G Y, Bi J M, et al. A study of mathematical modeling of close-quarter situation distance and collision distance in altering course collision avoidance [J]. Navigation of China, 2025, 48(1): 60-68. (in Chinese)

[2] 王宏刚,马小聪.超吃水巴拿马型船舶安全进靠南京港研究[J].中国航海,2024,47(增刊1):66-73.
Wang H G, Ma X C. Research on the safety of overdraft Panamax bulk carrier entering and berthing at Nanjing Port[J]. Navigation of China, 2024, 47(Suppl. 1): 66-73. (in Chinese)

[3] 王凤武,王康顺,张志瑞.基于模糊AHP-DEMATEL

的海上风电场通航安全评价[J]. 中国航海,2024,47(4):19-27.
Wang F W, Wang K S, Zhang Z R. Navigational safety evaluation of offshore wind farms based on fuzzy AHP-DEMATEL[J]. Navigation of China, 2024,47(4):19-27. (in Chinese)

[4] Faulkner D. Shipping safety: a matter of concern[C]// Imarest Publications. Proceedings—Institute of Marine Engineering Science and Technology Part B: Journal of Marine Design and Operations. London: Imarest Publications, 2003: 37-56.

[5] 袁金南,林爱兰,刘春霞. 60 年来西北太平洋上不同强度热带气旋的变化特征[J]. 气象学报,2008(2):213-223.
Yuan J N, Lin A, Liu C X. Change characters of tropical cyclones with different intensities over the western North Pacific during the last 60 years[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008(2):213-223. (in Chinese)

[6] 江丽芳,张志旭,齐义泉,等. WAVEWATCH Ⅲ和 SWAN 模式在南海北部海域海浪模拟结果的对比分析[J]. 热带海洋学报,2011,30(5):27-37.
Jiang L F, Zhang Z X, Qi Y Q, et al. Simulations of the northern South China Sea using WAVEWATCH Ⅲ and SWAN[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2011,30(5):27-37. (in Chinese)

[7] Montoya R D, Arias A O, Royero J C O, et al. A wave parameters and directional spectrum analysis for extreme winds[J]. Ocean Engineering, 2013,67:100-118.

[8] 徐丽丽,肖文军,石少华,等. WaveWatch Ⅲ和 SWAN 模型嵌套技术在业务化海浪预报系统中的应用及检验[J]. 海洋通报,2015,34(3):283-294.
Xu L L, Xiao W J, Shi S H, et al. Application and validation of an operational wave forecast model system based on the nesting use of WaveWatch Ⅲ and SWAN model[J]. Marine Science Bulletin, 2015,34(3):283-294. (in Chinese)

[9] 张俊明,张涛,杜洋,等. 基于高分辨率嵌套模型的南海风、浪特征研究[J]. 水道港口,2021,42(5):596-602.
Zhang J M, Zhang T, Du Y, et al. A study of wind and wave characteristics in the South China Sea based on high resolution nested model[J]. Journal of Waterway and Harbor, 2021,42(5):596-602. (in Chinese)

[10] Abdolali A, Roland A, Westhuysen A, et al. Large-scale hurricane modeling using domain decomposition parallelization and implicit scheme implemented in WAVEWATCH III wave model [J]. Coastal Engineering, 2020,157:1-23.

[11] 白珍胜,宗智,孙泽,等. 基于 WAVEWATCH Ⅲ的近岛礁波浪演化研究[J]. 船舶力学,2020,24(10):1261-1269.
Bai Z S, Zong Z, Sun Z, et al. Study of wave evolution near islands and reefs based on WAVEWATCH Ⅲ[J]. Journal of ship mechanics, 2020,24(10):1261-1269. (in Chinese)

[12] 王娟娟,侯放,吴淑萍,等. Wavewatch Ⅲ模拟和统计方法在最大波高预报方面的评测分析[J]. 海洋预报,2024,41(1):1-9.
Wang J J, Hou F, Wu S P, et al. Analysis of maximum wave height forecasts based on Wavewatch Ⅲ simulation and statistical relationship methods [J]. Marine Forecasts, 2024,41(1):1-9. (in Chinese)

[13] Chen C, Sasa K, Ohsawa T, et al. Comparative assessment of NCEP and ECMWF global datasets and numerical approaches on rough sea ship navigation based on numerical simulation and shipboard measurements [J]. Applied ocean research, 2020,101:1-13.

[14] 胡正元,冯曦,冯卫兵,等. 基于盘古气象大模型的台风路径及台风浪波高预报研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2026, 54(3): 28-36.
Hu Z Y, Feng X, Feng W B, et al. Research on typhoon tracks and typhoon wave height prediction based on Pangu-Weather [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2026, 54(3): 28-36. (in Chinese)

[15] Seemanth M, Bhowmick S A, Kumar R, et al. Sensitivity analysis of dissipation parameterizations in a third-generation spectral wave model, WAVEWATCH Ⅲ for Indian Ocean[J]. Ocean Engineering, 2016, 124:252-273.

[16] 孔丛颖,李泽,孙运佳. WAVEWATCH Ⅲ模式中风能输入项和耗散项函数对比分析[J]. 中国港湾建设,2017,37(12):1-6.
Kong C Y, Li Z, Sun Y J. Comparative analysis of wind energy input term and dissipation term source functions of WAVEWATCH Ⅲ model [J]. China Harbour Engineering, 2017,37(12):1-6. (in Chinese)

[17] Wang J, Zhang J, Yang J, et al. An evaluation of input/dissipation terms in WAVEWATCH Ⅲ using in situ and satellite significant wave height data in the South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2017, 36(3): 20-25.

[18] Sheng Y, Shao W, Li S, et al. Evaluation of typhoon waves simulated by WaveWatch-Ⅲ model in shallow waters around Zhoushan islands[J]. Journal of Ocean University of China, 2019,18(2):365-375.

[19] Liu Q, Rogers W E, Babanin A V, et al. Observation-based source terms in the third-generation wave model

WAVEWATCH Ⅲ: updates and verification [J]. Journal of Physical Oceanography, 2019, 49 (2): 489-517.

[20] Umesh P A, Behera M R. Performance evaluation of input-dissipation parameterizations in WAVEWATCH Ⅲ and comparison of wave hindcast with nested WAVEWATCH Ⅲ-SWAN in the Indian Seas [J]. Ocean Engineering, 2020,202: 1-29.

[21] Foli B A K, Ansong J K, Addo K A, et al. A WAVEWATCH III model approach to investigating ocean wave source terms for West Africa: input-dissipation source terms [J]. Remote Sensing in Earth Systems Sciences, 2022,5(1):95-117.

[22] 韩慎友,陈伟斌,陈见. 超强台风"天鸽"(1713)近海急剧加强特征及诊断分析[J]. 气象研究与应,2020,41(1):70-74.
Han S Y, Chen W B, Chen J. Characteristics and diagnostic analysis on rapid intensification of super typhoon "Hato" (1713) over the offshore area [J]. Journal of Meteorological Research and Application, 2020,1(1):70-74. (in Chinese)

[23] Kaplan J, Demaria M, Knaff J A. A revised tropical cyclone rapid intensification index for the Atlantic and eastern North Pacific basins [J]. Weather and forecasting, 2010,25(1):220-241.

[24] 陈依妮. 基于WAVEWATCH Ⅲ的近岛礁波浪数值模拟[D]. 大连:大连理工大学,2022.
Chen Y N. Numerical simulation of waves near islands and reefs based on WAVEWATCH Ⅲ [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2022. (in Chinese)

[25] Campos R M, Soares C G. Comparison of HIPOCAS and ERA wind and wave reanalyses in the North Atlantic Ocean[J]. Ocean Engineering, 2016,112:320-334.

[26] Cha D H, Wang Y. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model[J]. Monthly Weather Review, 2013,141(3): 964-986.

[27] 李江夏,胡玉植. ERA-Interim 和 ERA-5 再分析资料中台风模拟精度评估[J]. 水利水运工程学报,2021(1):62-69.
Li J X, Hu Y Z. Assessment of typhoons in ERA-Interim and ERA-5 reanalysis datasets[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(1):62-69. (in Chinese)

(上接第75页)

[33] Zhen L, Hu Z, Yan R, et al. Route and speed optimization for liner ships under emission control policies[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 110: 330-345.

[34] Psaraftis H N, Kontovas C A. Ship speed optimization: Concepts, models and combined speed-routing scenarios [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2014, 44: 52-69.

[35] Doudnikoff M, Lacoste R. Abating carbon dioxide and sulfur oxides emissions from container shipping [J]. Transportation Research Record, 2013, 2326: 8-15.

[36] Cariou P, Cheaitou A. The effectiveness of a European speed limit versus an international bunker-levy to reduce CO_2 emissions from container shipping [J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2012, 17(2): 116-123.

[37] Bulk S. Project Remarccable: a case study for onboard carbon capture on the MR tanker Stena Impero [R]. London: Oil and Gas Chimate Initiative, 2024: 1.

[38] Gao W, Zheng H, Zhang Y, et al. Simulation and optimization of a dual-loop organic Rankine cycle-onboard carbon capture system for LNG-powered ships [J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 486: 144512.

[39] 何书畅. 考虑碳税和EEOI的集装箱班轮运输航线配船研究[D]. 大连:大连海事大学, 2024.
He S C. Vessel allocation study for liner shipping routes considering carbon tax and EEOI [D]. Dalian: Dalian Maritime University. 2024. (in Chinese)

[40] 白宏山,赵东亚,田群宏,等. CO_2 捕集、运输、驱油与封存全流程随机优化[J]. 化工进展, 2019, 38(11): 4911-4920.
Bai H S, Zhao D Y, Tian Q H, et al. Stochastic optimization of the whole process of CO_2 capture, transportation, utilization and sequestration [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(11): 4911-4920. (in Chinese)