

基于WAM6-GPU海浪模式的中国近海区域海浪预报精度评估

李梦蝶^{1,2}, 李响^{1,2*}, 马新野³, 王晨琦^{1,2}

(1. 卫星海洋环境监测预警全国重点实验室(国家海洋环境预报中心), 北京 100086; 2. 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100086; 3. 中科星图维天信科技股份有限公司, 北京 100094)

摘 要: 利用中国近海的浮标观测数据, 验证评估了基于WAM6-GPU海浪模式构建的西北太平洋海浪数值预报系统在中国近海的预报精度。结果表明: 系统对中国近海的有效波高具有较好的预报精度, 24 h平均绝对误差为0.25 m, 均方根误差为0.38 m; 有效波高预报误差随预报时效延长而增大, 系统在高海况条件下的预报结果存在显著高估现象; 有效波高预报误差存在时空差异, 空间上表现为黄渤海预报误差最小, 南海次之, 东海误差相对较大; 时间上表现为夏季预报误差相对较大。针对台风浪预报, 系统可以准确预报出由台风过程引发的有效波高的变化过程, 但对台风导致的有效波高数值存在明显高估, 这一偏差主要是由驱动风场中台风路径与强度存在较大误差导致的。

关键词: WAM6-GPU; 中国近海; 有效波高; 台风

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2026)03-0007-13

0 引言

中国是海岸线长达3.2万公里的海洋大国, 也是世界上海浪灾害发生最频繁的地区之一^[1], 针对复杂海况下的海浪精准预报需求十分迫切^[2]。

海浪预报方法始于19世纪蒲福风级海况表的创立^[3], 此后, 又出现了经验统计海浪预报法和半经验半理论海浪预报法。随着对波浪产生、发展的深入研究和计算机技术的发展, 海浪预报逐渐转向以数值预报方法为主, 目前已发展到第三代海浪数值预报模式^[4], 国内外诸多机构采用该模式开展相关研究与业务。国际上比较有代表性的海浪模式有美国国家海洋大气局/美国国家环境预报中心(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA/National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的WAVEWATCH III模式^[5]、荷兰代尔夫特理工大学开发并维护的SWAN(Simulating Waves Nearshore)模式^[6]、葡萄牙、丹麦等西欧国家的相关机构使用的WAM(Wave Modelling)模式^[7]。

国内诸多机构在海浪模式的研发与应用方面也取得了丰硕的成果。国家海洋环境预报中心自主研发并使用“妈祖·海浪”模式, 构建了全球区域一体化的第三代海浪谱数值模型^[8]; 中国海洋大学对WAVEWATCH III模式进行改进^[9], 在源函数项参数化方案改进等方面取得进展; 自然资源部第一海洋研究所研发的MASNUM海浪模式^[10]已耦合纳入该所研发的地球系统模式系统中。

海浪业务化预报对模式精度要求较为严格, 因此, 对预报结果进行检验评估尤为重要。Sandhya等^[11]利用法国海洋开发研究院下属卫星数据记录与服务模式的模型开展研发, 构建了混合风场驱动的WAVEWATCH III与SWAN嵌套模型, 并验证该模型在印度东海岸本地治里地区不同季节的预报表现, 发现该模型整体可以满足业务化海浪预报要求, 正常天气下嵌套模型的预报效果较好, 但对极端事件和长期模拟场景下的海浪预报存在不足。Campos等^[12]通过非气旋区风场线性回归校准、气旋区风场融合卫星散射计数据校准以及调整

收稿日期: 2025-10-27。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3008005、2025YFF0517204); 国家自然科学基金项目(42205064)。

作者简介: 李梦蝶(2001-), 女, 硕士在读, 主要从事海浪数值模拟及研究。E-mail: 3025036442@qq.com

*通信作者: 李响(1986-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事海气相互作用研究和耦合模式研发。E-mail: lixiang@nmefc.cn

WAVEWATCH III 源项参数 $\beta_{\max}$ 来改进南大西洋极端海浪数值模拟精度,发现前两种方法的效果更优,可以将极端海浪有效波高的百分比误差从 14% 降到 8%,均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 也从 0.55 m 降低到 0.35 m,降幅达 40%。Umesh 等^[13]利用 OSCAT 散射计风场驱动 WAM 和 WAVEWATCH III 模式开展全球尺度海浪后报试验,并通过浮标与卫星数据验证模式性能,发现模式后报偏差主要源于风输入-耗散参数化方案及数值传播算法的不同。周媛媛等^[14]利用 Jason-1 和 Jason-2 卫星高度计资料对 WAVEWATCH III 模式模拟的 2009—2011 年中国东部海区海浪场进行检验,发现虽然整体的模拟效果较好,但是模拟精度存在空间性和季节性差异。梁颖瑜等^[15]将 WAVEWATCH III 和 SWAN 模型嵌套在东海海区进行业务化预报,并利用观测数据对连续两个月预报的有效波高结果进行检验,结果表明采用嵌套计算的模型预报结果优于单一模型,两类模型的平均绝对误差分别降至 0.84 m 和 0.91 m,相对误差分别降至 0.21% 和 0.25%。陈雅雅等^[16]基于 SWAN 模式对 2010 年第 13 号台风“鲇鱼”进行数值模拟,发现在台风行进过程中其右侧的波高和风速都大于左侧,呈现不对称性,模式模拟风场和台风浪与实测值吻合良好。

随着海浪预报精细化需求的不断提升,近年来主流的海浪模式的分辨率普遍从 25 km 提高到 5~10 km,模式数据量提升超 6 倍^[17]。同时,随着预报需求向着更高精度不断发展,海浪模式的复杂度和计算规模呈现指数级增长,巨大的计算开销使得计算效率成为制约其业务化应用的关键瓶颈。为应对这一挑战,异构计算特别是图形处理器 (Graphics Processing Unit, GPU) 加速技术被视为极具潜力的途径。早在 2008 年,OWENS 等^[18]从概念上证实, GPU 的大规模并行架构能够高效映射并解决地球流体力学中具有高度局部性、可并行性的网格计算问题,为应对数值模式中计算规模增长带来的计算与运维成本挑战提供了全新的思路。因此,众多学者尝试将 GPU 加速技术应用于海浪模式中,孙家文等^[19]基于 CUDA C 语言和 GPU (Tesla k20) 实现模型并行运算,随着网格数增加,加速比显著提升,最大加速比达 12.72,有效解决了 Boussinesq 类波浪模型计算效率低的问题。Lou 等^[20]将 MASNUM

(Marine Science and Numerical Modeling) 海浪模式的消息传递接口 (Message Passing Interface, MPI) 多进程程序重构为 GPU 兼容算法,对比单核心 CPU, APPLE-MASNUM 的加速比分别可达 49.29 倍、62.58 倍、65.74 倍。Yuan 等^[21]开发了 WAM6 海浪模型的 GPU 加速版本 (WAM6-GPU v1.0), 可以在 GPU 上运行所有计算组件,与原始的中央处理器 (Central Processing Unit, CPU) 版本相比,可将 7 天全球海浪模拟的计算时间从 2 h 以上缩短至 7.6 min。针对传统并行编程技术门槛高、开发周期长、CPU-GPU 数据传输冗余和算力利用率低的核心难题, Wang 等^[22]提出适配普林斯顿海洋模型 (Princeton Ocean Model, POM) 模型的 OpenACC 并行化改造方案,不仅大幅降低了开发成本,还通过数据区域管理与异步传输策略显著降低了 CPU-GPU 间数据拷贝时间占比,将 GPU 计算占比提升至 90% 以上,整体加速比达 11.75~45.04 倍。Ikuyajolu 等^[23]针对 WAVEWATCH III (v6.07) 模式波作用源项计算耗时高、效率低的瓶颈,开展了将源项向 GPU 平台移植与优化的研究。移植优化后的源项使整个模式的运行时间减少约 30%,在单节点全 GPU 配置下,资源使用量降低 35%~40%。

如何高效地开展高精度的海浪预报是海浪业务数值预报关注的焦点, GPU 加速技术可以有效提高海浪数值模式计算效率,但搭载该技术的预报系统在目标海域的预报精度能否满足业务需求,是其能否实现业务化应用的关键。本文利用 WAM6-GPU v1.0 版本海浪模式,构建了西北太平洋区域的高分辨率海浪数值预报系统,并开展了 2023 年全年的历史回报试验。在此基础上,利用中国近海的浮标观测数据对模式预报结果进行检验评估,以期获取该系统对中国近海的海浪预报精度,为该系统后续改进及业务化应用提供支撑。

1 模式、数据和方法

1.1 WAM6-GPU 海浪模式简介

WAM6-GPU 海浪模式是基于 WAM6 发展的 GPU 版本海浪模式^[21]。WAM 模式^[24]起源于 20 世纪 80 年代欧洲“海浪模式开发计划”(WAMDI Group),首次将波-波非线性相互作用纳入核心物

理过程,摆脱了对预设谱形的依赖;通过嵌套技术实现全球到近岸的跨尺度海浪模拟。1988年首个WAM业务化版本发布后,迅速成为全球海洋预报和气候研究领域的标准工具。模式控制方程为海浪方向谱输运方程,表达式为:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \nabla \cdot (C_g N) + \frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{\partial}{\partial t} N \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial t} N \right) = S \quad (1)$$

式中: $N(\sigma, \theta)$ 为海浪方向谱密度(单位: $\text{rad}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$); C_g 为群速度矢量,表征波能在水平空间的传播特征; S 是源汇项总和,包含风能输入项、白冠耗散项、非线性相互作用项、底摩擦耗散项和波浪破碎项。其中,风能输入项用于描述风场向海浪的能量传递过程,是海浪生成和发展的核心机制;白冠耗散项通过模拟波浪破碎(白冠)导致的能量损失,是限制波高无限增长的关键过程;非线性波-

波相互作用项描述了不同频率和传播方向的波浪间复杂的四波非线性共振作用,主导海浪谱形演变,实现谱内能量重新分配;底摩擦耗散项模拟海浪传播至浅水区后,受海底摩擦作用导致的能量损失;水深引起的波浪破碎项表征海浪传播至水深急剧变浅的区域发生的波浪破碎过程。Yuan 等^[21]通过 Open ACC 技术开发得到 GPU 加速版 WAM6 海浪模型(WAM6-GPU v1.0)。该版本在保证物理过程刻画、数值计算精度与原有 CPU 版本一致的前提下,仅完成计算架构的 GPU 移植与优化,未改动 WAM6 原有物理过程和核心数值算法,大大提升了计算效率。本文基于 WAM6-GPU v1.0 海浪模式构建了西北太平洋区域海浪数值预报系统,模拟区域覆盖西北太平洋海域($95^\circ \sim 160^\circ \text{E}$, $10^\circ \text{S} \sim 55^\circ \text{N}$, 见图 1)。模式水平分辨率为 0.03° ,地形文件采用 ETOPO 2022 地形水深数据^[25]制作。模式采用

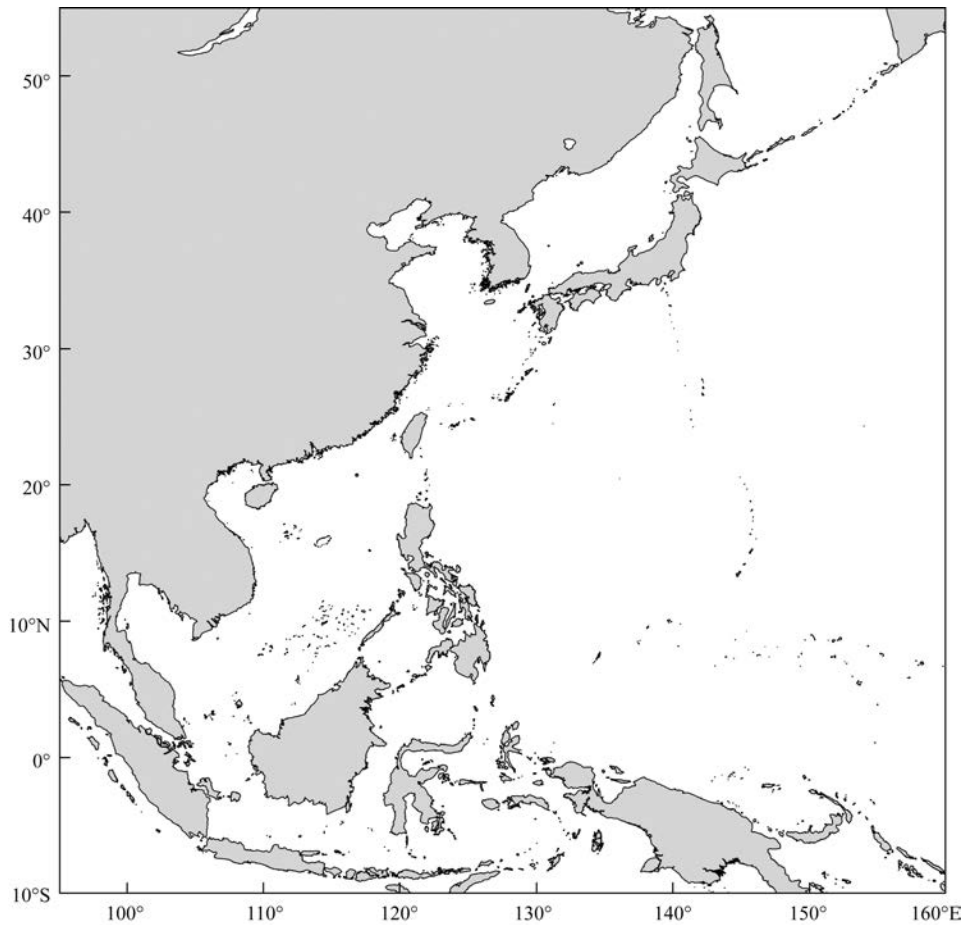


图1 模式地形图

Fig.1 Schematic topographic map

NCEP 全球预报系统 (Global Forecasting System, GFS) 的 10 m 风场作为外强迫风场,开展 2023 年历史回报试验。试验时段为 2023 年 1 月 1 日—12 月 31 日,每日 00 时(世界时,下同)和 12 时各起报一次,预报时长为未来 7 天。

1.2 数据

本研究中使用的数据包括 NCEP-GFS 的 10 m 风场预报数据、欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts, ECMWF) 发布的第五代全球气候再分析数据集 (ECMWF fifth-generation global atmospheric reanalysis, ERA5) 的 10 m 风场数据以及中国近海浮标观测数据。

NCEP-GFS 每日 00 时预报未来 7 天的 10 m 风场数据^[26],预报时段为 2023 年 1 月 1 日—12 月 31 日,所有预报结果均用于后续的评估与对比分析。该数据集水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为逐 6 h,作为海浪模式业务预报的外强迫风场。

ERA5 再分析 10 m 风场数据^[27],其水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,时间分辨率为 1 h。本文所用数据时段为 2022 年 12 月 15 日—2023 年 1 月 1 日,用于构建海浪模式热启动所需的预报初始场。

近海业务化浮标观测数据包括海表温度、海表盐度、气温、气压、相对湿度、风速、风向、最大风速、有效波高、波周期、波向、流向等观测要素,时间分辨率为逐小时。本文选用中国近海 30 个浮标的观测数据(见图 2),其中黄渤海布设 12 个浮标点,东海布设 8 个浮标点,南海布设 10 个浮标点。数据时段为 2023 年 1 月 1 日—12 月 31 日,用于评估预报系统对中国近海有效波高的预报精度。

1.3 检验方法

本文采用 RMSE^[28]、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、平均偏差 (Bias) 和皮尔逊相关系数 (Pearson's Linear Correlation Coefficients, R) 4 种误差统计量对有效波高的预报结果进行评估^[15]。

均方根误差 (RMSE) 反映了预报偏离观测的离散程度,计算公式为:

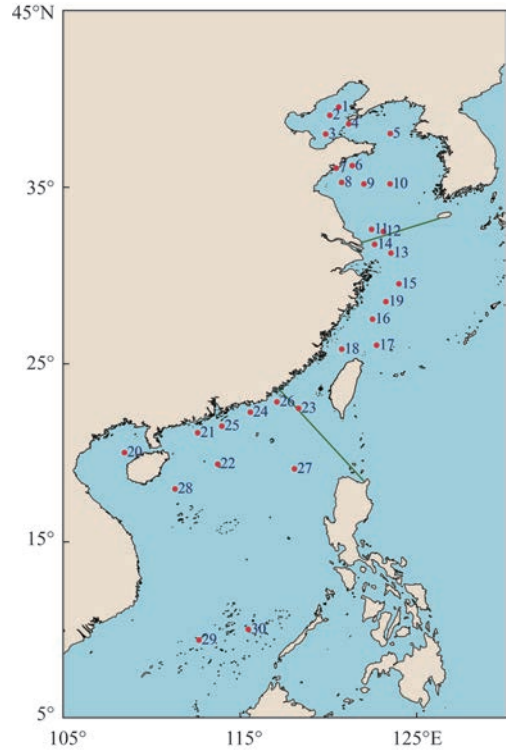


图2 文中所用的中国近海浮标及海域划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of buoy distribution and sea area zoning in China's coastal waters used in this study

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_f^i - x_o^i)^2}{N}} \quad (2)$$

平均绝对误差 (MAE) 反映预测值与观测值绝对误差的平均值,不受误差正负方向影响,计算公式为:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |x_f^i - x_o^i|}{N} \quad (3)$$

平均偏差 (Bias) 反映预测值相对于观测值的整体偏离程度,计算公式为:

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^N (x_f^i - x_o^i)}{N} \quad (4)$$

皮尔逊相关系数 (R) 用于衡量观测值和预测值之间的线性相关性,取值范围为 $[-1, 1]$,计算公式为:

$$R = \frac{cov(x_f, x_o)}{\sqrt{Var(x_f) Var(x_o)}} \quad (5)$$

以上各式中: x_o^i 为观测值, x_f^i 为预测值, i 为数据编

号; N 为样本总数; $\text{Var}(x_f)$ 、 $\text{Var}(x_o)$ 分别为预报值、观测值的方差; $\text{cov}(x_f, x_o)$ 表示两个变量 x_f 和 x_o 的协方差。其中方差和协方差计算公式为:

$$\text{Var}(x) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

$$\text{cov}(x_f, x_o) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{f,i} - \bar{x}_f)(x_{o,i} - \bar{x}_o) \quad (7)$$

MAE和RMSE数值越小,表示有效波高预报结果与观测值越接近,预报精度越高;Bias结果可正可负,正值表示模型整体高估波高,负值表示低估; R 值越接近1,代表预报波高与观测波高越一致。

2 结果分析

2.1 误差总体分析

图3为2023年中国近海海域内,不同预报时效下的有效波高预报值和浮标观测值的均方根误差、平均绝对误差、平均偏差和相关系数的箱线图。从

图中可以看出,不同预报时效下,WAM6-GPU v1.0海浪模式在中国近海的预报表现相较于其他海浪模式具备一定优势。基于30个浮标点24 h预报样本的误差结果显示:研究区内有效波高预报的MAE为0.13~0.55 m,均值为0.25 m;RMSE为0.17~0.76 m,均值为0.38 m(见图3a、3b),预报精度优于武双全^[29]基于WAVEWATCH III模式得到的黄海、渤海和东海海域24 h海浪预报结果。随着预报时效延长,MAE与RMSE均呈增长趋势;整体偏差始终为负,说明模式预报波高整体高于观测值。当预报时效从24 h延长至168 h,相关系数由0.92逐步降至0.59,表明长时间预报过程中的误差累积效应显著(见图3c、3d)。

图4为24 h预报时效下,不同海浪等级对应的有效波高预报值和浮标观测值的均方根误差、平均绝对误差和平均偏差柱状图。参照《海浪等级标准》(GB/T 42176—2022)^[30],将浪高(H_s)划分为5个等级开展评估:1级 $H_s < 0.5$ m、2级 $0.5 \text{ m} \leq H_s < 1.25$ m、

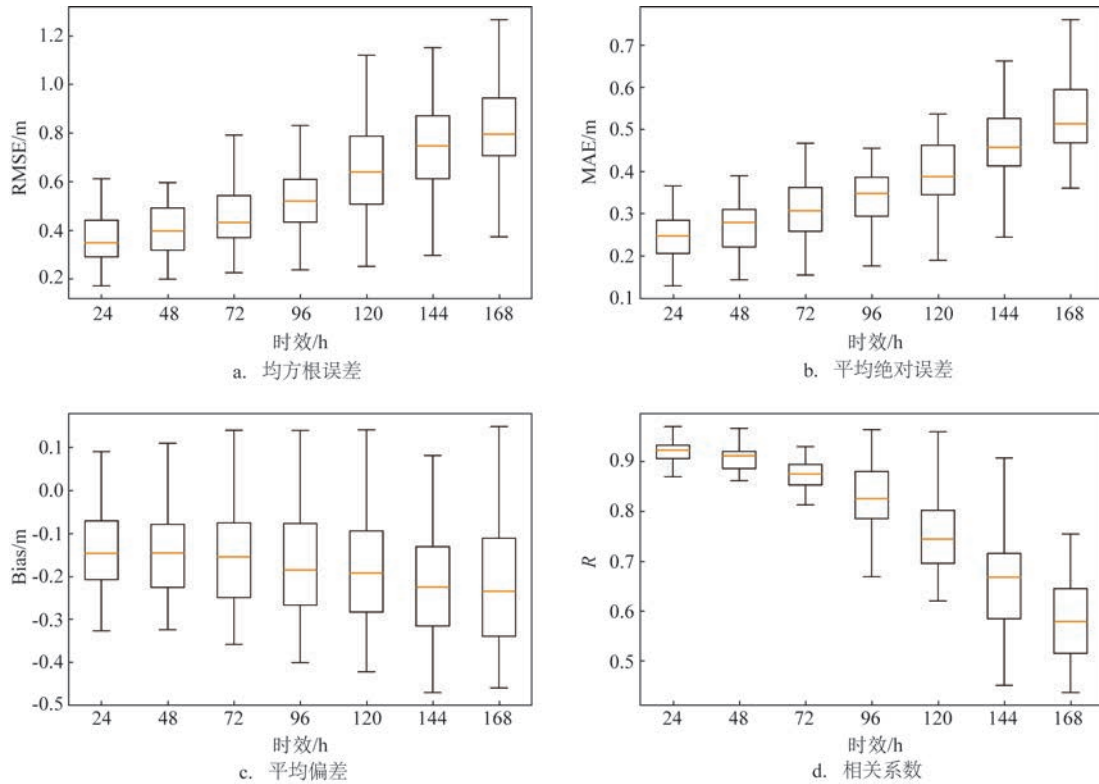


图3 不同预报时效下有效波高预报值与浮标观测值的统计参数箱线图

Fig.3 Box-and-whisker plots of statistical parameters between significant wave height forecast values and buoy observation values in different forecast lead times

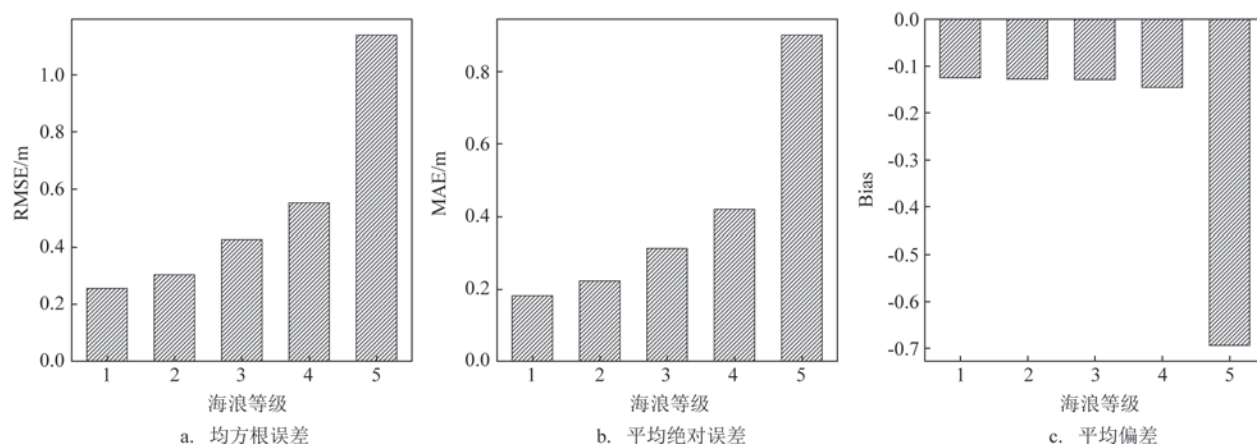


图4 24 h预报时效下不同浪高等级有效波高预报误差柱状图

Fig.4 Bar charts of statistical parameters between significant wave height forecast values and buoy observation values under different wave height grades at 24-hour forecast lead time

3级 $1.25 \text{ m} \leq H_s < 2.5 \text{ m}$ 、4级 $2.5 \text{ m} \leq H_s < 4 \text{ m}$ 、5级 $H_s \geq 4 \text{ m}$ 。从图4可以看出,不同浪高等级对应的预报误差差异明显。随着浪高等级增加,有效波高预报的RMSE、MAE和Bias都逐渐增大,当浪高达到5级时,各项误差较4级浪高呈倍数增加;浪高等级为2级时,RMSE为0.3 m,MAE为0.22 m,Bias为-0.12 m。李文博等^[31]评估了自然资源部北海预报减灾中心海浪预报产品、ECMWF海浪预报产品和GFS产品在黄渤海海域的海浪预报效果,结果表明随着浪高增加,3种预报产品的误差均增加,24 h预报时效下1~2 m有效波高内3种产品的RMSE分别为0.470 m、0.427 m和0.587 m。由此可见模式的预报误差虽然随着有效波高的增加而增大,但整体预报效果仍处于较好水平。

图5为不同预报时效下有效波高预报值与浮标观测值的散点分布图,图中红线为基于最小二乘法拟合的曲线(LSF线),能够有效反映预报数据与实测数据的整体趋势关系。WAM6-GPU模式对中国近海的海浪有效波高总体预报效果较好。从图5a可以清晰看出,LSF线的整体走势表明模式存在波高高估现象,且高估幅度随着有效波高的增大而增加。在24 h、48 h、72 h和96 h的预报结果中,3 m以内有效波高的预报结果整体偏大0.02~0.30 m;当有效波超过5 m时,预报偏大接近1 m。然而在144 h预报中,当有效波高超过4 m以及168 h预报中,有效波高超过2.5 m时(见图5g),预报值开始小于观测值,出现波高低估现象。总体来看,模式整

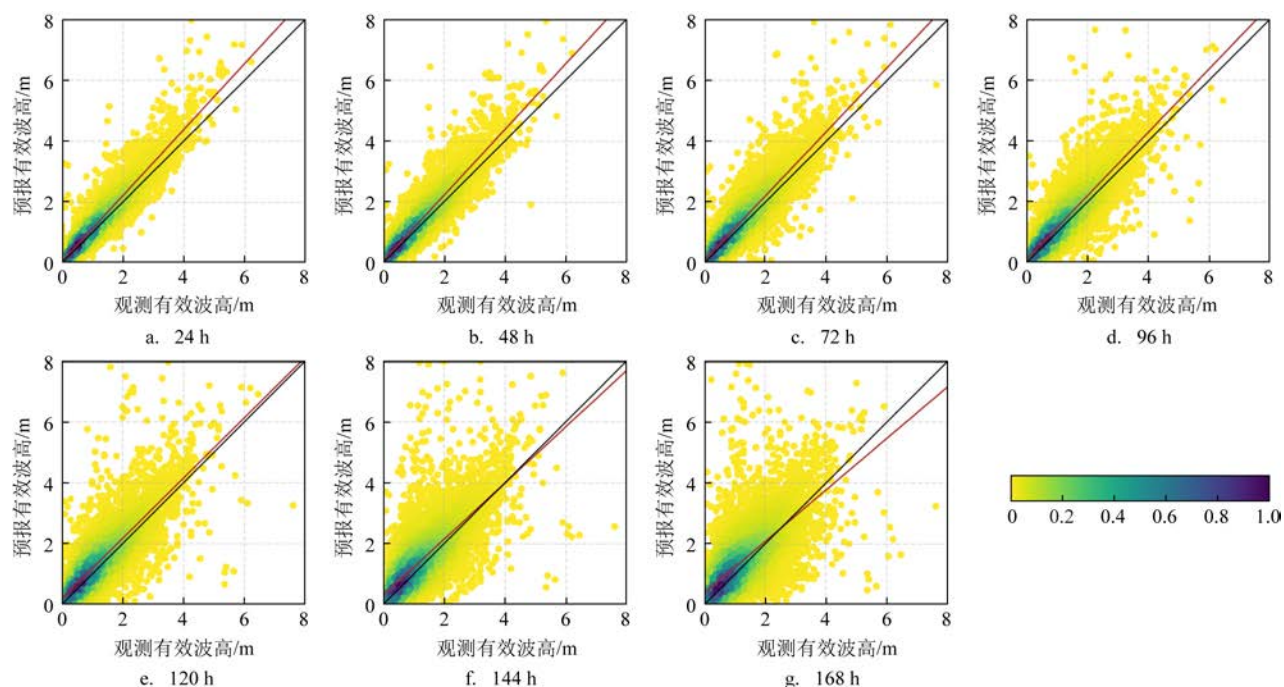
体预报值高于观测值。

2.2 误差空间分布

在总体评估的基础上,进一步开展系统对不同海区有效波高的预报精度评估。图6为黄渤海、东海和南海3个海区有效波高预报结果的误差统计分析。

WAM6-GPU海浪模式在黄渤海海区的预报表现较好,不同预报时刻有效波高预报的RMSE始终维持在0.3~0.6 m,MAE稳定在0.2~0.4 m,Bias为-0.08~-0.12 m,且R值均高于0.6。这一优异表现可能与该海区独特的地理特征^[28]及风场预报准确性较高^[32]有关。随着预报时效的延长,该海区预报的RMSE与MAE呈显著上升趋势,R值同步下降。东海海区的预报误差则明显偏高,其有效波高的RMSE波动于0.5~1.0 m,MAE为0.3~0.6 m,Bias为-0.23~-0.32 m,尽管R值仍保持在0.6以上,但整体误差水平显著高于黄渤海海区。模式在南海海区的预报性能介于黄渤海与东海之间,其有效波高的RMSE为0.38~0.82 m,MAE为0.27~0.52 m,Bias为-0.16~-0.23 m,R值稳定在0.65以上。

图7为不同海浪等级下黄渤海、东海和南海24 h有效波高预报值与观测值的误差统计分析。模式在黄渤海海区的预报表现依旧较好,有效波高的RMSE、MAE和Bias虽然随着浪高等级的增大而增加,但增幅始终保持在0.3 m内;东海在浪高较小时的预报效果较好,当浪高大于3级时误差显著增加;南海海域预报效果介于二者之间。



注:黑线为对角线,红线是最佳拟合线(LSF线),散点反映样本点的分布密度

图5 不同预报时效下有效波高预报值与浮标观测值的散点图

Fig.5 Scatter plots of significant wave height forecast values versus buoy observation values in different forecast lead times

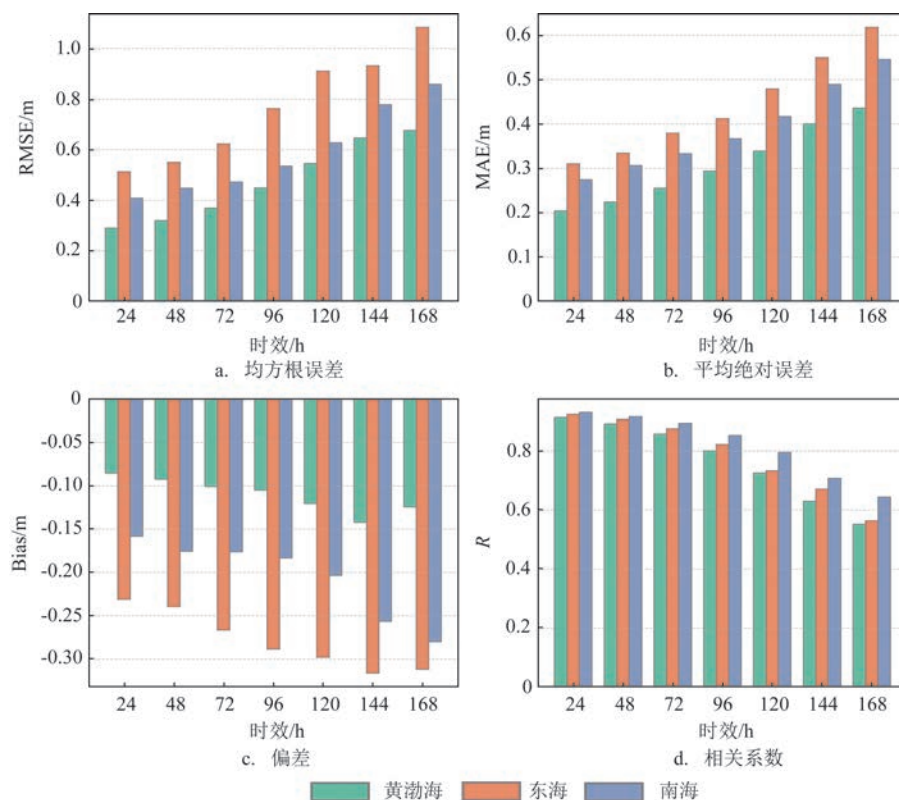


图6 不同时效下黄渤海、东海和南海预报值与观测有效波高的误差统计

Fig.6 Statistical parameters between different forecast values and observed significant wave heights in the Yellow and Bohai Sea, East China Sea, and South China Sea

2.3 误差时间分布

图 8 为不同月份 WAM6-GPU 海浪模式有效波高预报误差统计结果。模式对中国近海有效波高的预报误差存在较为显著的季节性差异,夏季,预报误差远大于其他季节。RMSE、MAE 和 Bias 随月份的变化趋势较为一致,三者均在 6—10 月出现

明显峰值,其中夏季 24 h 预报的 RMSE 均值为 0.47 m,MAE 均值为 0.28 m,Bias 均值为 0.22 m,显著高于其他季节。在预报误差较小的月份(如 3 月、9 月),24 h 预报结果的 $RMSE \leq 0.4$ m, $MAE \leq 0.2$ m, $Bias \leq 0.05$ m。这可能是由于夏季台风高发,模式对高风速条件下极端海浪的预报准确度存在较大误差导致的。此外,模式 72 h 有效波高预报的效果较

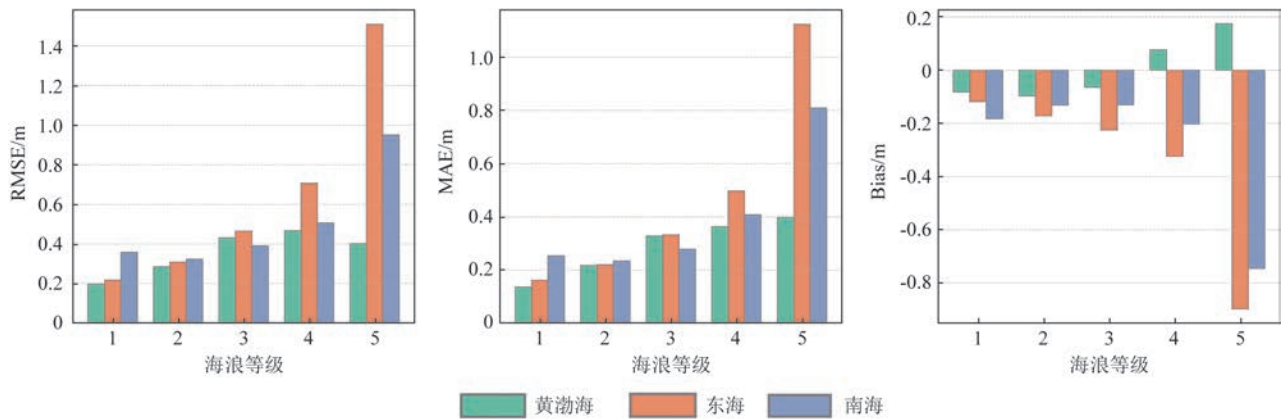


图 7 不同海浪等级下黄渤海、东海和南海 24 h 有效波高预报值与观测值误差统计

Fig.7 Statistical parameters between 24-hour forecast values of significant wave heights and observed significant wave heights under different wave height grades in the Yellow Bohai Sea, East China Sea, and South China Sea

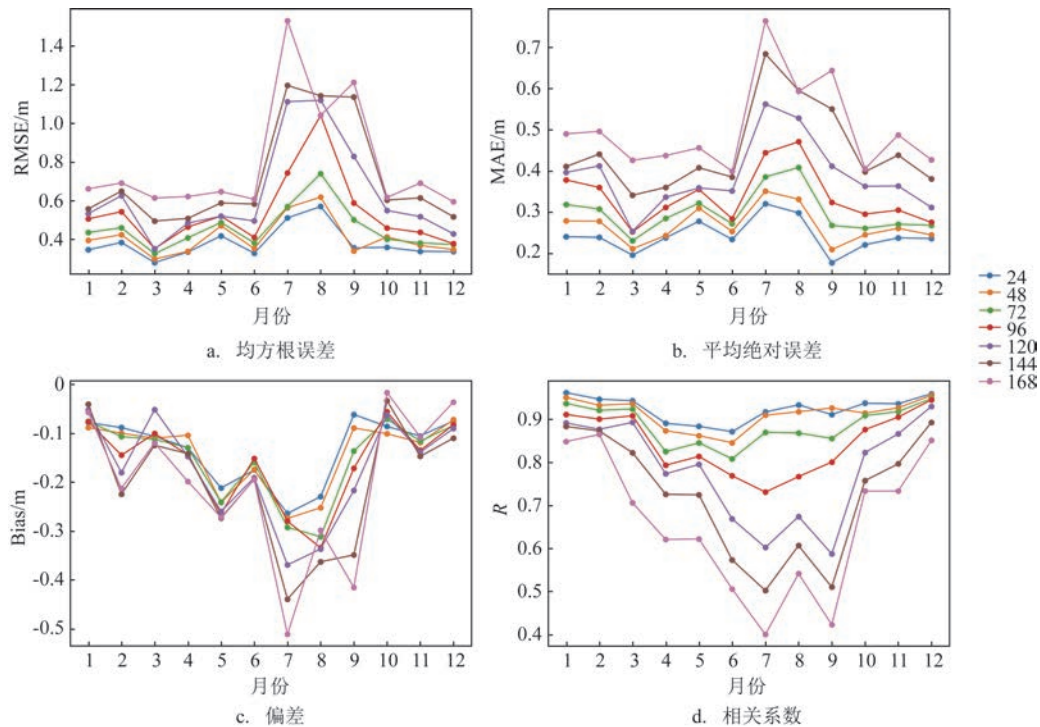


图 8 不同月份下不同预报时效的有效波高误差统计

Fig.8 Statistical parameters between different forecast values and observed significant wave heights in each month

好,该时效范围内各月份预报值与观测值的 R 都在0.82以上。结合图8可以看出,模型前72 h的预报效果较好,预报结果的 $MAE < 0.31$ m, $RMSE < 0.47$ m, R 为0.87。

2.4 台风浪预报评估

中国近海是受台风浪影响最严重的区域之一,每年由台风引发的灾害性海浪事件占全年总数的35%左右,台风浪的准确预报是评估海浪预报系统的重要依据。2023年西北太平洋共生成17个台风,其中6个影响我国近海,影响区域主要为南海,本文选取台风“苏拉”(Saola)作为典型个例,基于不同起报时刻的海浪预报数据,结合浮标观测数据与台风最佳路径数据集,系统评估该台风过程中模式对海浪的预报能力,并分析导致台风浪预报误差的可能原因。图9展示了台风“苏拉”期间,受台风直接影响最大的24号浮标点处(见图2),不同起报时刻模式预报的有效波高、驱动风场风速与观测有效波高、风速的对比结果。总体而言,WAM6-GPU模式的台风浪预报精度主要受驱动风场精度影响,两者具有较高的一致性。8月27日00时的有效波高起报结果对于台风影响前期的预报效果较好,但未能预报出台风影响最大时(9月1日06时)接近8 m的有效波高,主要原因是驱动风场风速偏小,未能表征台风影响下的强风特征。8月28日00时及之后起报的台风浪预报结果,其时序演变规律均与观测

结果较为一致:模式预报的有效波高逐渐增大,在9月1日06时左右达到峰值,之后有效波高衰减。值得注意的是,不同起报时刻预报的台风浪峰值出现时段,与驱动风场风速达到峰值的时刻较为一致(见图9b),且有效波高随时间的变化趋势与驱动风场的风速变化趋势一致,即驱动风场风速增强,台风浪有效波高增大;风速衰减后,有效波高也迅速降低。这一特征进一步说明,驱动风场的预报准确性会影响台风浪有效波高的预报效果。此外,依据《海浪等级》标准,将5级有效波高作为划分界限统计MAE,统计结果显示:5级及以下波高的MAE为0.78 m,最大误差为5.03 m,最小误差为0.01 m, RMSE为0.85 m;5级及以上波高的MAE达2.82 m,最大误差为4.66 m,最小误差为1.31 m, RMSE为1.23 m。从误差特征来看,低风速、小波高条件下模式预报误差相对较小;高风速、大波高条件下不仅预报误差数值显著增大,且波动更剧烈。尽管模式能预报出台风过境时的强浪过程,但预报的有效波高明显高于观测值,两者最大差值可达6 m。

图10为台风“苏拉”期间观测台风路径与不同起报时刻(8月27日—9月1日)模式驱动风场模拟路径的对比结果。从图中可以看出,台风“苏拉”呈现先西北行、后行至南海东北部近海的移动特征。相较于台风观测路径,不同起报时刻驱动风场的模拟台风路径存在显著偏差:8月27日起报的模拟路径误差最大,整体向东北方向偏移;随着起报时刻

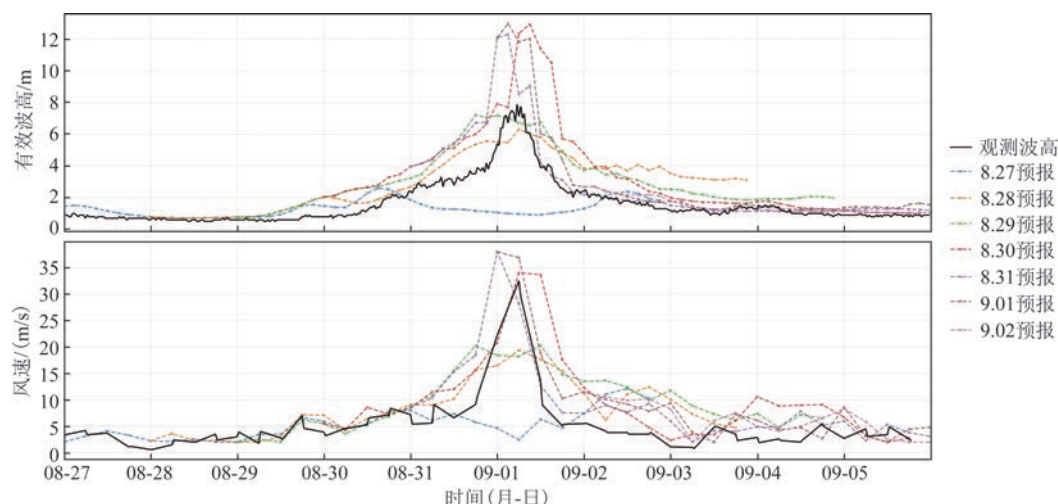


图9 台风“苏拉”期间不同起报时刻WAM6-GPU模式预报有效波高、驱动风场风速与24号浮标观测值对比

Fig.9 Comparison of significant wave height and wind speed between WAM6-GPU model forecasts with different initial times and in-situ observations at Buoy 25 during Typhoon 'Saola'

推移,驱动风场的模拟台风路径逐步向观测路径偏移,8月31日、9月1日起报的模拟路径已与观测路径基本一致,台风位置偏差较小。与之对应,起

报时间越临近台风影响时段,WAM6-GPU模式对台风过程有效波高演变趋势的预报效果越好。图11为不同起报时刻预报的台风影响最大时刻(9月1日

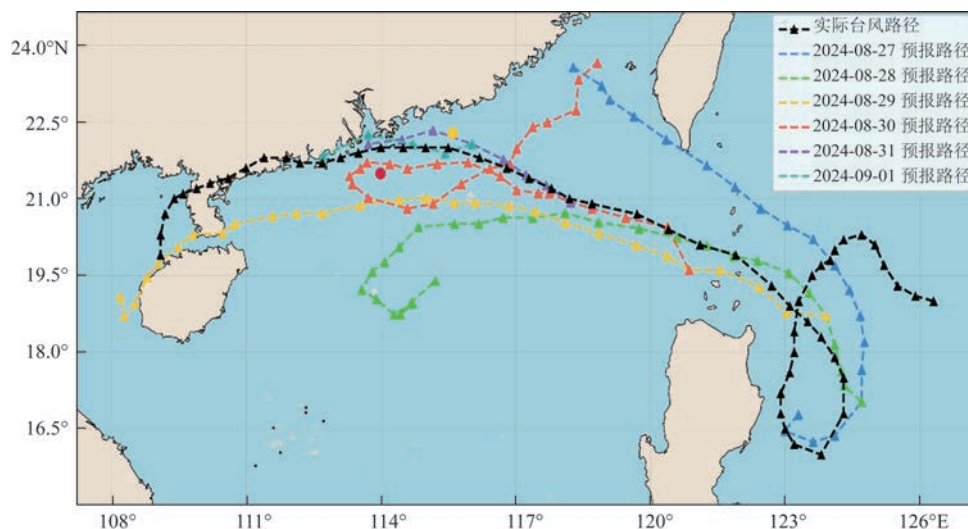
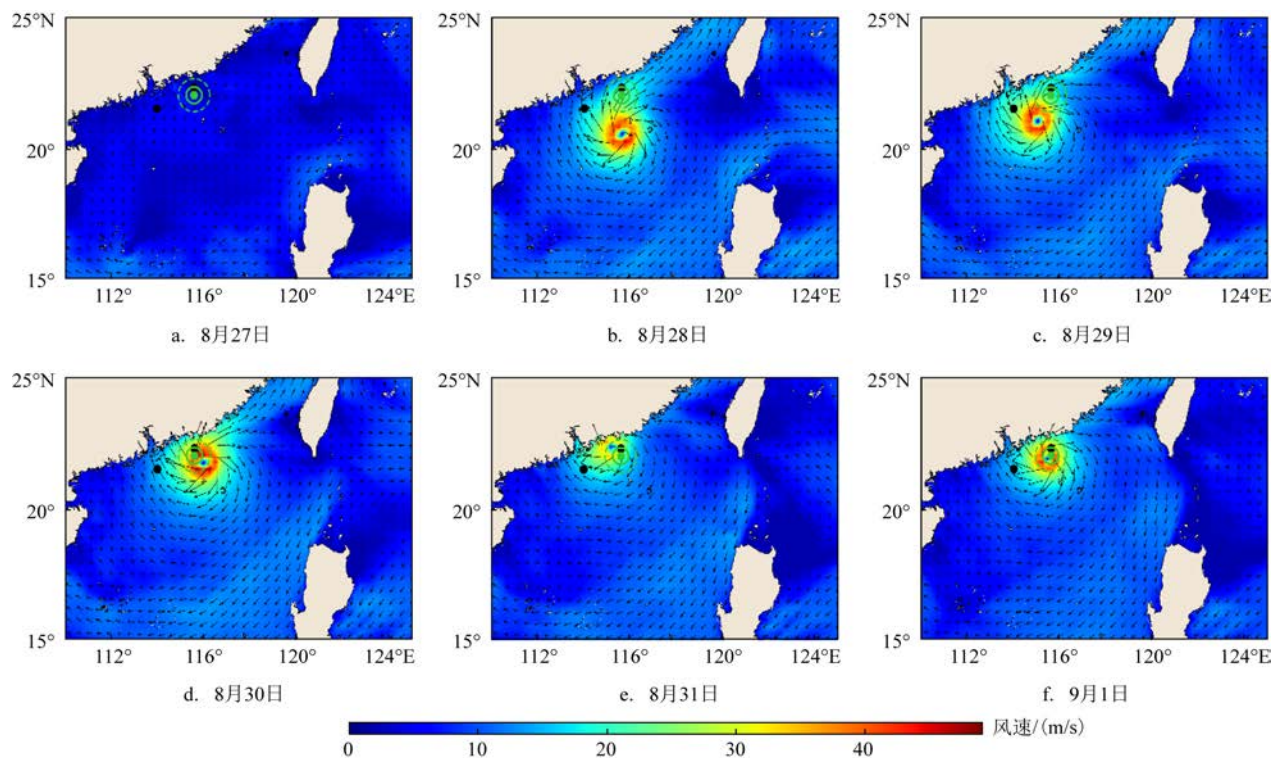


图10 台风“苏拉”观测路径和6个不同起报时刻驱动风场模拟台风路径对比

Fig.10 Comparison between the observed track of Typhoon 'Saola' and typhoon tracks from the wind forcing with six different initial times



注:绿色实/虚线圆形表示1倍/2倍最大风速半径,绿色点为台风中心,黑色箭头为风向

图11 不同预报时刻预报的风场06时空间分布

Fig.11 Spatial distributions of wind fields forecast at different initial times valid at 0600 UTC

06时)的风场空间分布。结果表明,不同起报时刻对应的驱动风场差异显著,这也是8月27日起报结果中未能预报出有效波高显著增加的原因。以上分析表明,驱动风场台风路径预报偏差是导致海浪模式台风浪有效波高预报误差的主要因素。

3 结果与讨论

本文基于WAM6-GPU v1.0海浪模式,构建了西北太平洋海浪数值预报系统,开展了2023年西北太平洋海域海浪回报试验,并利用中国近海浮标观测数据对海浪预报结果开展系统性检验评估。主要结论如下:

①该预报系统对中国近海有效波高具备较好的预报能力,24 h预报结果的MAE为0.25 m, RMSE为0.38 m。各预报时效下系统均存在有效波高预报偏高现象,预报误差随预报时效的延长而增加,且当有效波高等级高于4级时,预报误差迅速增大。

②该系统的预报精度在不同海区(黄渤海、东海、南海)存在一定的差异,总体而言,黄渤海有效波高的预报误差最小,南海海域次之,东海海域预报误差相对较大。

③该系统对中国近海有效波高的预报精度存在明显的季节差异,夏季预报误差(RMSE均值为0.47 m, MAE均值为0.28 m, Bias均值为0.22 m)显著高于其他季节。

④通过对“苏拉”台风海浪过程预报结果的分析表明,WAM6-GPU模式对台风浪的预报误差主要来源于驱动风场台风位置的预报偏差,模拟台风位置偏差越大,有效波高预报误差越突出;当驱动风场预报的台风路径与观测值较为一致时,台风风速的快速增加会促进台风浪的增长,进而导致大浪区间有效波高出现预报误差。

本文仅针对2023年数据开展有效波高预报性能初步研究,未来将对多年预报结果进行更系统性的评估,使其更好地应用于日常业务化预报。同时,本文仅聚焦有效波高开展评估检验,尚未针对最大波高、波向等预报参数开展系统性评估。此外,本文仅梳理有效波高预报误差,未进一步开展误差来源分析,后续需要进一步探讨海面风场外强迫以及模式误差对有效波高预报误差的影响机制,

为进一步改进WAM6-GPU海浪模式预报精度、开展系统业务化预报筑牢基础。

参考文献:

- [1] 吕睿, 徐瑞, 王娟娟, 等. 中国近海2023年灾害性海浪分析及2024年预测[J]. 海洋预报, 2025, 42(2): 39-45.
LYU R, XU R, WANG J J, et al. Disastrous wave of China seas in 2023 and prediction for 2024[J]. Marine Forecasts, 2025, 42(2): 39-45.
- [2] 王华, 姚圣康, 龚茂珣, 等. 东海区域灾害性海浪长期预测方法研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(5): 35-42.
WANG H, YAO S K, GONG M X, et al. Study on the long-term predicting way of disastrous sea wave of East China Sea[J]. Marine Science Bulletin, 2007, 26(5): 35-42.
- [3] 刘凡, 陆小敏, 徐丹, 等. 海浪预报方法研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 387-393.
LIU F, LU X M, XU D, et al. Research progress of ocean waves forecasting method [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(5): 387-393.
- [4] 袁业立, 潘增弟, 华锋, 等. LAGFD-WAM海浪数值模式I: 基本物理模型[J]. 海洋学报, 1992, 14(5): 1-7.
YUAN Y L, PAN Z D, HUA F, et al. LAGFD-WAM ocean wave numerical model I: basic physical model[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1992, 14(5): 1-7.
- [5] TOLMAN H L, BALASUBRAMANIAN B, BURROUGHS L D, et al. Development and implementation of wind-generated ocean surface wave models at NCEP[J]. Weather and Forecasting, 2002, 17(2): 311-333.
- [6] BOOIJ N, RIS R C, HOLTHUIJSEN L H. A third-generation wave model for coastal regions: 1. Model description and validation[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1999, 104(C4): 7649-7666.
- [7] 张永垂, 陈诗尧, 王宁, 等. 全球业务化海洋预报系统进展[J]. 地球科学进展, 2022, 37(4): 344-357.
ZHANG Y C, CHEN S Y, WANG N, et al. Progress of global operational ocean forecasting systems[J]. Advances in Earth Science, 2022, 37(4): 344-357.
- [8] FENG B Y, WANG Z Y, ZHANG Y, et al. Numerical simulation of the northwest pacific based on the MaCOM[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2024, 2718(1): 012029.
- [9] 曹赛超, 高志一, 赵栋梁. WAVEWATCH III 第三代海浪数值模式在中国东海的应用和改进[J]. 中国海洋大学学报, 2023, 53(8): 8-15.
CAO S C, GAO Z Y, ZHAO D L. Application and improvement of WAVEWATCH III third generation wave numerical model in the East China Sea[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(8): 8-15.
- [10] QIAO F L, SONG Z Y, BAO Y, et al. Development and evaluation

- of an Earth System Model with surface gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2013, 118(9): 4514-4524.
- [11] SANDHYA K G, BALAKRISHNAN NAIR T M, BHASKARAN P K, et al. Wave forecasting system for operational use and its validation at coastal Puducherry, east coast of India[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 80: 64-72.
- [12] CAMPOS R M, GUEDES SOARES C. Comparison and assessment of three wave hindcasts in the North Atlantic Ocean[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2016, 9(1): 26-44.
- [13] UMESH P A, PARVATHY K G, FERNANDEZ D R, et al. Global sea state prediction using OSCAT winds: a statistical assessment of WAM and WWIII hindcasts with NDBC-NOAA buoys and satellite altimeter data[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 2023, 180(1): 509-549.
- [14] 周媛媛, 周林, 关皓, 等. 基于 Jason-1 和 Jason-2 卫星资料的中国东部海域海浪模拟结果的检验[J]. *海洋预报*, 2018, 35(6): 40-47.
- ZHOU Y Y, ZHOU L, GUAN H, et al. Verification of wave simulation results based on Jason-1 and Jason-2 data in the East China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(6): 40-47.
- [15] 梁颖瑜, 徐丽丽, 徐婷婷, 等. 常规海浪预报定量化检验评估方法研究[J]. *海洋预报*, 2024, 41(1): 10-20.
- LIANG Y Y, XU L L, XU T T, et al. Study on quantitative test and evaluation method of conventional sea wave forecasts[J]. *Marine Forecasts*, 2024, 41(1): 10-20.
- [16] 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.
- [17] 谢明炎, 魏立新, 高元勇, 等. 球面质心泰森多边形网格海浪预报的向量化检验方法[J]. *海洋预报*, 2024, 41(2): 34-43.
- XIE M Y, WEI L X, GAO Y Y, et al. Vectorized verification method for Spherical Centroid Voronoi Tessellation grid ocean wave forecasting[J]. *Marine Forecasts*, 2024, 41(2): 34-43.
- [18] OWENS J D, HOUSTON M, LUEBKE D, et al. GPU computing[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2008, 96(5): 879-899.
- [19] 孙家文, 朱桐, 房克照, 等. 基于 GPU 加速的 Boussinesq 类波浪传播变形数值模型[J]. *海洋工程*, 2020, 38(2): 111-119.
- SUN J W, ZHU T, FANG K Z, et al. A GPU accelerated Boussinesq wave propagation model[J]. *The Ocean Engineering*, 2020, 38(2): 111-119.
- [20] LOU Q, WU C M, DONG C M, et al. APPLE-MASNUM: accelerating parallel processing for lightweight expansion of MASNUM on a single multi-GPU node[J]. *Ocean Modelling*, 2025, 196: 102557.
- [21] YUAN Y, YU F J, CHEN Z, et al. Towards a real-time modeling of global ocean waves by the fully GPU-accelerated spectral wave model WAM6-GPU v1.0[J]. *Geoscientific Model Development*, 2024, 17(16): 6123-6136.
- [22] WANG Y N, LI B T, ZHOU W, et al. Parallel Princeton Ocean model based on OpenACC[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2025, 187: 106370.
- [23] IKUYAJOLU O J, VAN ROEKEL L, BRUS S R, et al. Porting the WAVEWATCH III (v6.07) wave action source terms to GPU[J]. *Geoscientific Model Development*, 2023, 16(4): 1445-1458.
- [24] GROUP T W. The WAM model—a third generation ocean wave prediction model[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1988, 18(12): 1775-1810.
- [25] MACFERRIN M, AMANTE C, CARIGNAN K, et al. The Earth Topography 2022 (ETOPO 2022) global DEM dataset[J]. *Earth System Science Data*, 2025, 17(5): 1835-1849.
- [26] 刘艳贵, 徐瑞, 侯放, 等. 福建省海浪灾害危险性评估[J]. *海洋预报*, 2024, 41(1): 21-30.
- LIU Y G, XU R, HOU F, et al. Hazard assessment of wave disasters in Fujian Province[J]. *Marine Forecasts*, 2024, 41(1): 21-30.
- [27] HERBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [28] 尹汉军, 谢波涛, 黄必桂, 等. 渤海中部海浪的同步观测与数值预报检验[J]. *海岸工程*, 2023, 42(2): 131-139.
- YIN H J, XIE B T, HUANG B G, et al. Synchronous observation and numerical forecast product test of ocean waves in the Central Bohai Sea[J]. *Coastal Engineering*, 2023, 42(2): 131-139.
- [29] 武双全. 东中国海波高分布特征研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- WU S Q. The distributional character of the wave height in the East China Sea[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [30] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. GB/T 42176-2022 海浪等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. GB/T 42176-2022 The grade of wave height[S]. Beijing: Standards Press of China, 2022.
- [31] 李文博, 李锐, 王彬, 等. 不同海浪数值预报产品在渤海和黄河的预报水平评估[J]. *海洋预报*, 2023, 40(4): 10-21.
- LI W B, LI R, WANG B, et al. Evaluation of different wave numerical forecast products in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2023, 40(4): 10-21.
- [32] CHEN S, JIANG W Z, XUE Y H, et al. A new wave-state-based drag coefficient parameterization for coastal regions[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2024, 54(3): 809-821.

Evaluation of wave forecasting accuracy over China's offshore areas based on the WAM6-GPU model

LI Mengdie^{1,2}, LI Xiang^{1,2*}, MA Xinye³, WANG Chenqi^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Satellite Ocean Environment Dynamics, National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100086, China; 2. Key Laboratory of Marine hazards Forecasting, Ministry of Natural Resources, Beijing 100086, China; 3. Geovis Environment Technology Co., Ltd, Beijing 100094, China)

Abstract: This study evaluates wave forecast accuracy over China's offshore areas from a Northwest Pacific wave numerical prediction system based on the WAM6-GPU wave model against buoy observation data. Results demonstrate that the system exhibits a good forecast performance for significant wave height (SWH) in China's coastal seas: the 24-hour forecast has a mean absolute error of 0.25 m and a root mean square error of 0.38 m. The SWH forecast error increases with the prolongation of the forecast time, and the system tends to significantly overestimate the SWH under high sea conditions. Furthermore, the SWH forecast error displays notable spatiotemporal variations. Spatially, the error is smallest in the Bohai Sea and Yellow Sea, followed by the South China Sea, and relatively larger in the East China Sea. Temporally, forecast errors are higher in summer. For the forecast of typhoon waves, the system can accurately predict the changes in effective wave height caused by the typhoon process, but with significant overestimation. This is mainly due to the considerable errors in the typhoon track and intensity in the wind forcing.

Key words: WAM6-GPU; China's offshore areas; significant wave height; typhoon