

DOI: 10.3969/j.issn.2096-8248.2026.01.005

引用格式: 孟鑫. 上海国际航运中心海浪数智预警报系统建设应用研究[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2026, 35(1): 37-45.

上海国际航运中心海浪数智预警报系统建设应用研究

孟 鑫

(上海市海洋监测预报中心, 上海 200062)

摘 要: 为了实现高时空分辨率、高精度海浪要素的预报预警与快速响应, 聚焦上海国际航运中心建设需求, 基于数值模型和人工智能方法, 构建精细化、业务化、自动化海浪数智预警报系统, 形成“数据感知—数值模拟—智能订正—展示应用”技术体系。经验证, 各站点后报 RMSE 均小于 0.25 m, MAE 小于 0.2 m; 预报性能随预报时效增加虽有小幅衰减, 但在 72 h 内仍保持较高的相关性与稳定性。在“竹节草”台风影响期间, 最大有效波高在后报和 24 h 预报 MARE 均不超过 10%, 72 h 预报 RMSE 相对 24 h 平均增幅 0.11 m。实践表明, 该系统在上海海域表现出优异的模拟能力, 其在重点区域分辨率达 100 m, 并控制预警响应时间在 3 h 以内, 已成功应用于航运服务、重大工程保障、海洋防灾减灾等核心场景, 为国际航运中心构建更安全、高效、智能的海浪预警报系统提供了实践参考。

关键词: 海浪预报; 近岸海浪模式; 人工智能; 上海国际航运中心

中图分类号: P731.22

文献标志码: A

文章编号: 2096-8248(2026)01-0037-09

Research on the construction and application of the ocean wave numerical-AI early warning and forecasting system for Shanghai International Shipping Center

MENG Xin

(Shanghai Marine Monitoring and Forecasting Center, Shanghai 200062, China)

Abstract: To develop a refined, operational, and automated ocean wave numerical-AI early warning and forecasting system, and to meet the needs of Shanghai International Shipping Center, based on the numerical model and AI method, it establishes a technical suite of “data perception—numerical modeling—AI correction—display&application”, which achieves early-warning, forecasting and rapid response of wave with high spatiotemporal resolution and high accuracy. Verification results show that the hindcast RMSE at all stations is less than 0.25 m, and the MAE is below 0.2 m; although the forecast performance degrades slightly with increasing time horizon, it maintains high correlation and stability within 72 h. During “CO-MAY”, the MARE of the maximum significant wave height was bellow 10% in both hindcast and 24 h forecast, while the RMSE of the 72 h forecast increased by an average of 0.11 m compared to 24 h results. Practice has shown that the system demonstrates excellent prediction capability in Shanghai coastal waters, with a resolution reaching 100 m in key areas and the early warning response

收稿日期: 2025-12-31; 修订日期: 2026-01-21

基金项目: 上海市地方标准制修订项目(沪市监标技[2020]560号); 上海市海洋灾害综合防治体系建设工程项目(沪发改环资[2024]23号); 上海市第一次海洋灾害风险普查项目(沪水务[2020]1072号); 上海市海洋局科研项目(沪海科2023-06)

作者简介: 孟鑫, 工程师, 硕士, 研究方向为物理海洋学, (E-mail) xizi1993425@sina.com。

time is kept within 3 h, which has been applied in core scenarios such as shipping services, major project support, marine disaster prevention and mitigation, providing a practical reference for building a safer, more efficient, and intelligent ocean wave early warning and forecasting system for the international shipping center.

Key words: wave forecast; SWAN; artificial intelligence; Shanghai International Shipping Center

0 引言

根据《新华·波罗的海国际航运中心发展指数报告》,上海已连续6年稳居前三^[1],香港、宁波舟山、广州等城市也位列前20。国际航运中心高效运行依赖对复杂海洋环境尤其是海浪等动力要素的精准掌握,可靠的海浪预警预报是船舶航行安全与港口调度优化的重要决策支撑。2025年《上海市推进国际航运中心建设条例》正式出台,对航运安全保障、突发事件快速反应和应急处置等提出更高要求。构建智能完备的水上安全保障体系,强化近海海浪精细化预报预警保障和信息发布能力,提升航道整体通过能力和安全保障水平,对于上海国际航运中心能级提升具有现实意义和紧迫性。

上海位于太平洋季风区,冷空气、热带气旋、温带气旋等强天气过程频繁多发或叠加碰头,引起的灾害性海浪对海上航运以及重大涉海工程形成威胁。近5年的数据统计显示,上海海域平均每年海浪超警^[2](即出现2.5 m大浪及以上的危害性海浪)22次,其中冷空气引起的海浪极值波高有4.6 m,热带气旋引起的海浪极值波高有7.4 m,2025年10月18日开始的冷空气过程引起的灾害性海浪持续时长达146 h。近5年上海海域灾害性海浪过程极值为7.4, 6.3, 4.5, 6.8, 5.5 m,分别由2106号“烟花”、2212号“梅花”、2306号“卡努”、2413号“贝碧嘉”和2508号“竹节草”台风过程引起。灾害性海浪过程呈超频超强的趋势。另一方面上海海域水动力环境较为复杂,洋山深水港区平均水深达15 m,长江口北槽深水航道水深达12.5 m,沟槽交错、水深突变大等因素也造成了波浪场在近岸传播的复杂多变,给海浪精细化业务化预警预报带来一定挑战。

近年来,人工智能AI(artificial intelligence)和智能优化算法的发展以及海洋大数据的积累为主要依赖数值模型的海浪预报业务提供了新的发展思路。本文在总结国内外海浪预报模型的发展现状、技术特点及应用局限基础上,结合上海国际航运中

心建设对航运保障的迫切需求,设计“数据感知—数值模拟—智能订正—展示应用”技术路线,深入研究适用于航运中心等场景的海浪数智预警报系统的技术路线与实施路径,实现从“被动响应”到“主动预警”再到“智能决策”转变,并强化了系统验证对比与场景应用,以期为国际航运中心构建更安全、高效、智能的海浪预警报系统提供实践参考。

1 国内外研究现状

目前国际上主流的海浪数值预报模式包括波浪模式WAM(wave model)、近岸海浪模式SWAN(simulating waves nearshore)、海浪观测模式WW3(wavewatch III)以及我国自主研发并于2023年投入业务化运行的“妈祖·海浪”FVWAM(finite volume wave model),均基于第三代海浪谱模式,其物理机制历经发展已较为完善。WAM^[3]引入了能量平衡方程的各个项,是首个真正意义上的“第三代”海浪模式。美国国家环境预报中心NCEP(The National Centers for Environmental Prediction)在WAM的基础上研发了WW3^[4],其基于完全不稳定的频谱作用密度方程,主要用于大尺度空间波浪传播过程。由荷兰Delft大学开发的SWAN^[5]模式基于欧拉形式的离散谱动量平衡方程,采用稳定又经济的全隐式计算,并加入浅水波浪破碎效应,相比其他模式更适用于近岸、港口的海浪模拟。FVWAM^[6]发展了六边形网格和GPU并行加速技术,构建全球区域一体化的海浪模型。业务化海浪预报方面,欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)基于WAM建立了完全耦合的高分辨率海浪预报系统^[7],NCEP则使用WW3建立了全球集合预报系统^[8]。福建省智能网格海洋预报业务系统采用SWAN模型完成海浪数值计算^[9],广州市设计使用WRF驱动的结构和非结构二重嵌套SWAN模型实现了30%以内的海浪预报误差^[10]。预报时效方面,NCEP于2021年实现最长时效384 h;空间分辨率方面,ECMWF的

海浪全球模式于 2024 年更新至 0.1°, 挪威气象研究所 METNO (Norwegian Meteorological Institute) 的区域模式最细可到 4 km。根据世界气象组织海浪预报验证领先中心^[11]评估结果, ECMWF 海浪预报总体上效果最好。

随着 AI 技术的快速发展, 海浪智能预报凭借其强大的非线性表达能力以及极快的正向计算速度表现出巨大的发展潜力^[12]。李博等^[13]利用人工神经网络 ANN (artificial neural network) 对 WW3 模式在三亚一个小型岛屿附近的模拟单点有效波高结果进行了修正。徐维真等^[14]利用 ERA5 再分析数据集提出了多种基于卷积神经网络 CNN (convolutional neural network) 的渤海有效波高场的预报方法, 为海浪有效波高的预报提供了新的思路。Fan 等^[15]利用全球范围内的单站浮标数据对长短期记忆网络 LSTM (long short-term memory) 等 6 种网络的有效波高预报性能进行了对比研究, 验证了 LSTM 在海浪预报中的优越性, 并将 SWAN 与 LSTM 结合以提升单点 SWAN 模式预测精度。而卷积长短期记忆神经网络 ConvLSTM (convolutional LSTM) 解决了 LSTM 空间信息丢失的问题, 具有优异的时空特征提取能力, 被广泛应用于区域海浪预测的研究^[16-18]。Gao 等^[19]利用业务化 WW3 模式 30 年后报数据, 将风场和多种波浪参数输入驱动场强迫卷积长短期记忆网络 DFF-ConvLSTM (driving field forcing ConvLSTM) 模型, 实现海盆尺度上的高分辨率波浪预报, 在 GPU 计算技术的加持下, 其计算效率较数值模型提升 770 倍, 但在近岸、岛屿等地形显著影响波浪的区域预报精度还需提升。

目前 AI 海浪模型主要基于数据学习, 无法给出海浪演变的物理机制, 泛化能力也较差。另外, 其训练成果高度依赖数据集质量, 故高精度高分辨率的再分析浪场资料也是制约 AI 海浪模型精度提升的瓶颈。海浪数值预报虽然计算量大且存在无法消除的经验参数误差, 但其基于海浪谱理论, 仍是国内外主流海浪预报业务的核心。AI 方法目前更多扮演后处理订正或特定场景补充的角色, 世界气象组织也在 2025 年提出计划将 AI 技术全面整合纳入全球预报基础设施体系。面对传统数值预报与人工智能技术协同发展的必然趋势, 本文围绕上海国际航运中心对海洋安全保障的应用需求, 整合当前海浪预报领域最前沿的数值模拟与人工智能方法, 提出“数智结合”的预报关键技术, 探索构建兼具物理可靠性、计算高效性、服务精准性的现代化海浪预警系统。

2 系统功能

2.1 技术路线

基于第三代海浪模式 SWAN 和驱动场强迫卷积长短期记忆网络 DFF-ConvLSTM 人工智能方法, 采用非结构网格加密技术, 开放风场接入和数据可视化端口, 选取局地适用的风能输入最优参数化方案, 接入高分辨率复杂岸线及水深地形, 建立起适用于上海海域的精细化、业务化、自动化海浪数智预警系统, 形成“数据感知—数值模拟—智能订正—展示应用”技术体系, 框架如图 1 所示, 为航运作业等场景提供更安全、更优质、更完善的海浪预警服务, 为上海国际航运中心建设和海洋防灾减灾提供技术支撑。

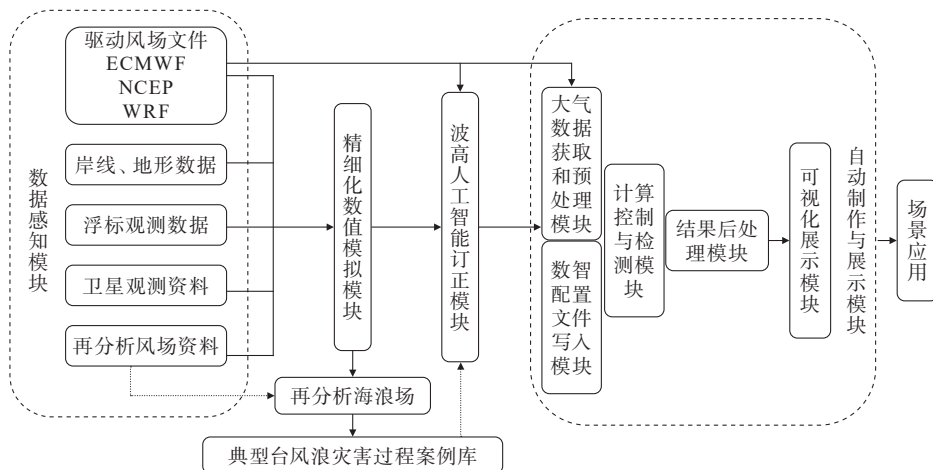


图 1 海浪数智预警系统技术架构

Fig. 1 Technology architecture of ocean wave numerical-AI early warning and forecasting system

2.2 数据感知模块

系统设置定时冷启动,并建立缺测替换机制以应对驱动风场缺失导致业务化预报中断的情况。采取并行计算的方式,保证每天至少2个驱动风场、2个批次自动化预报,单批次计算耗核72个,时间控制在3h以内,预报时效可达240h,在节省计算资源的同时又最大限度提高计算运行效率。

岸线、地形数据是海浪模型构建的基础。长江口附近泥沙淤积会改变海底地形、影响岸线形态,同时长江口航道治理工程、上海市海洋生态保护修复等行动会严重影响附近的地形、岸线,从而影响波浪传播、破碎、折射、反射等物理过程,导致有效波

高产生变化。模型在近海使用的水深、岸线数据持续每年更新,以保证精确的岸线形态、准确的水深地形数据对有效波高的模拟,而在外海则使用GEBCO (general bathymetric chart of the oceans)网站提供的30"分辨率水深数据集进行补充。

驱动风场数据用于业务化日常预报,目前有3种类型可供选择。再分析风场用于数值模型的后报检验以及制作智能订正模块的训练集。具体使用的风场技术参数如表1所示。浮标观测数据用于验证系统结果,本文使用的观测数据来源于上海市海洋测报中心布放于上海海域的3m浮标,具体信息如图2及表2所示,其传感器均为Triaxys。

表1 风场数据
Table 1 Datasets of windforcing

数据类型	风场数据	来源	预报批次(北京时)	预报时效/d	时间分辨率/h	空间分辨率
预报数据	IFS	ECMWF	8, 20	10	1	0.125°
预报数据	GFS	NCEP	2, 8, 14, 20	7	3	0.25°
预报数据	WRF	上海市海洋测报中心	8, 20	7	1	3 km-9 km-21 km
再分析数据	ERA5	ECMWF			1	0.25°
再分析数据	CFSv2	NCEP			1	0.204 5°

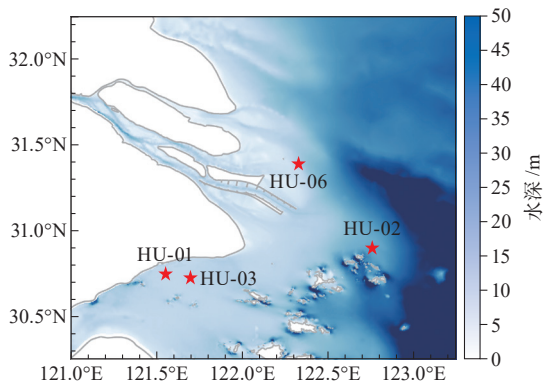


图2 浮标分布点位
Fig. 2 Location of buoy sites

表2 用于验证的浮标信息
Table 2 Information of wave buoy sites for validation

浮标编号	位置	布放水深/m
HU-01	121.55°E, 30.75°N	7.2
HU-02	122.76°E, 30.90°N	24.0
HU-03	121.70°E, 30.73°N	8.0
HU-06	122.33°E, 31.39°N	10.9

2.3 精细化数值模拟模块

基于SWAN模式,选取非结构三角形网格加密技术构建网格,其较传统矩形网格能更加准确地刻画长江口附近复杂的岸线、地形及岛屿,在达到同等分辨率矩形嵌套网格模拟精度的同时可减少网格数

量以节省算力^[20-22],提高运行效率。基于Li等^[23]对极端海浪的研究,网格覆盖渤海、黄海、东海、南海部分海域的同时需考虑西北太平洋部分深水海域。网格开边界处分辨率0.75°,开边界两侧陆地边界分辨率为20km,并向长江口区域逐渐加密,长江口附近重点区域最高分辨率可达100m,具体设置与李一国等^[24]相同。

经再分析风场资料进行后报驱动实验,利用浮标实测数据进行模拟检验,确定风能输入参数化方案为JANSSEN,白冠耗散选取JANSSEN参数化形式,底摩擦采取JONSWAP模式及参数设置,同时考虑三波相互作用、四波相互作用及深度诱导波破碎作用,模式物理配置与Jiang等^[25-26]一致。Jiang等^[25]也验证了模块在上海海域的后报精度优于ERA5再分析海浪数据集,尤其在台风影响期间。但相较于模型参数化方案及相关参数的选取,风场的模拟精度是影响波浪模拟精度的最关键因素。

2.4 波高人工智能订正模块

以2021—2023年ERA5再分析风场及其驱动“2.3”模块得到的再分析海浪场为数据集,基于DFF-ConvLSTM构建订正模块。如图3所示,该网络以3层串联卷积长短记忆单元ConvLSTM为基础,卷积层负责刻画海浪宏观特征要素的受迫运动性及

空间关联性;长短记忆层负责刻画浪场时间记忆性,使用多次迭代训练得出网络关键参数,实现海浪数值预报的大面智能订正。模块采用热启动,输入当前

批次预报风场、对应的有效波高数值预报场以及预报时效,系统即采用步进迭代计算出全部时次订正后的有效波高预报值。步进迭代算法如图 4 所示。

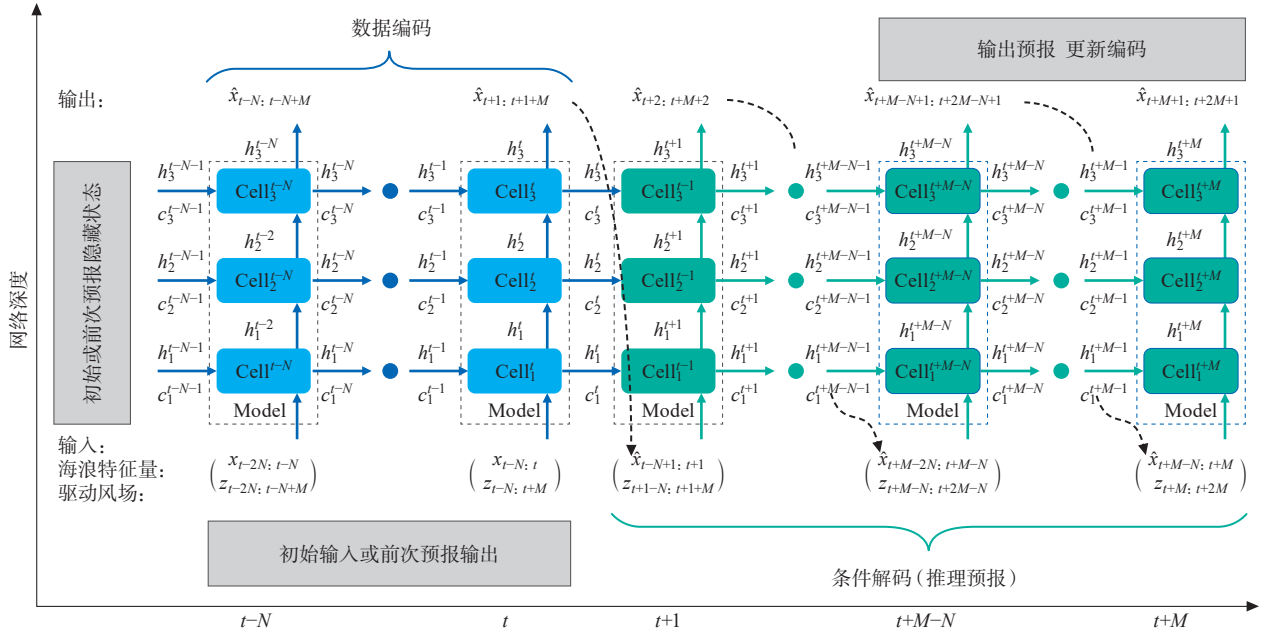


图 3 驱动场强迫卷积长短记忆网络管线结构^[27]

Fig. 3 Structure of DFF-ConvLSTM^[27]

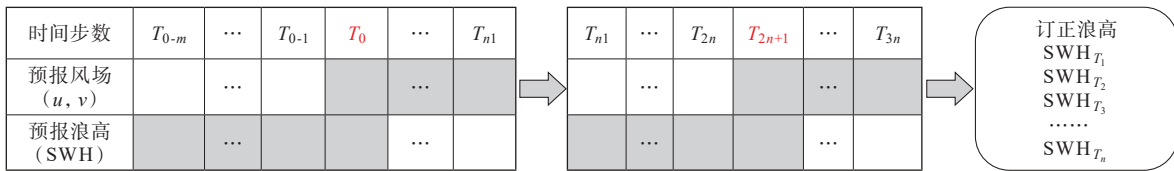


图 4 步进迭代计算流程

Fig. 4 Step-by-step iterative calculation flow

2.5 自动制作与展示模块

系统采用模块化设计思路,采用面向对象的 Python 语言编写,以方便移植和扩展,部署在上海市超算中心。其中大气数据获取和预处理模块可自动获取业务化预报风场并统一写成 SWAN 可用格式的风场输入文件;数智配置文件写入模块将根据风场输入文件信息、模式启动设置、计算设置、输出设置及物理参数设置等按照模式要求统一写入;计算控制与检测模块负责保证各批次预报风场计算订正完毕且不被中断或覆盖;结果后处理模块负责将计算结果传输至服务器端对接展示平台,并按需求生成服务产品,通过政务云或专线发送。可视化展示模块部署在服务器端,支持大面分布图流线粒子动画展示和拾点查询,支持随时查询计算及运行状

态,支持沿岸北上、南部登陆以及沿海北上 3 类影响上海的典型台风浪灾害过程案例库查询。

3 系统验证

3.1 系统后报检验评估

选取使用 ERA5 驱动的 2024 年 7 月—2025 年 8 月后报数据进行检验评估。图 5 给出了均方根误差 (RMSE)、平均绝对误差 (MAE)、分散指数 (SI)、偏差 (Bias) 及相关系数 (CC) 等指标,用以评估系统模拟精度与预报技能。结果表明:各浮标站点有效波高 (H_s) 的 RMSE 最大值为 0.23 m,出现在离岸最远的 HU-02 浮标处;HU-02 和 HU-06 浮标处的分散指数和偏差较小,相关系数均达到 0.9,表明系统在长江口海域具有较高的预报技能;

相比而言,靠近杭州湾北岸的 HU-01 和 HU-03 浮标处模拟误差相对偏大。这种差异可能与近岸区域受海陆相互作用影响显著、风场模拟不确定性较大有关,同时近岸有效波高信号中叠加的明显的潮周期

振荡也会对模拟精度产生影响。总体而言,4个浮标站点的 RMSE 均小于 0.25 m, MAE 均低于 0.2 m, CC 在 0.76~0.92 之间,证明该系统后报效果整体表现良好。

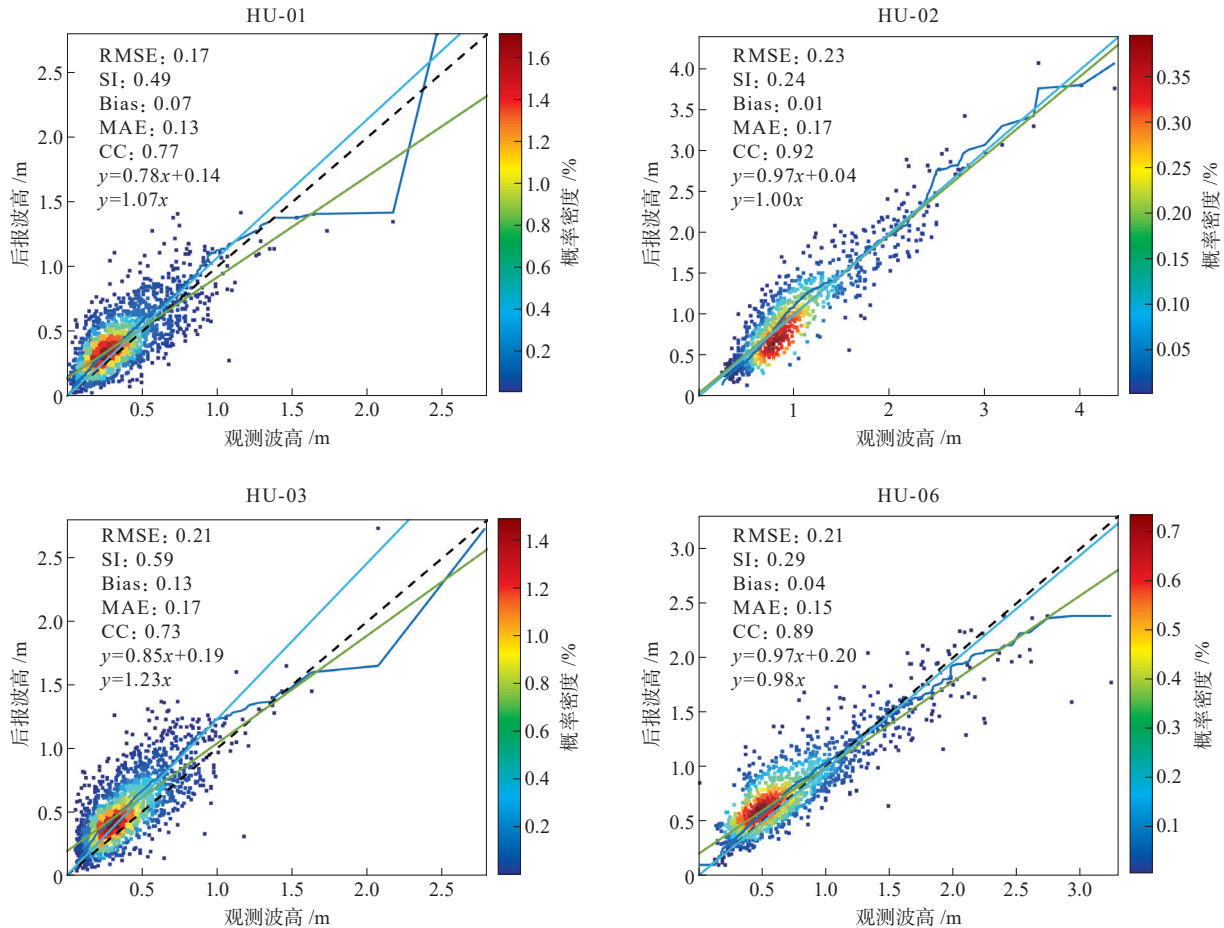


图 5 后报波高与观测波高散点密度图
Fig. 5 Scatter plot of forecast and observed H_s

3.2 24 h/48 h/72 h 预报检验评估

图 6 给出了 2025 年汛期(6—9 月) 4 个浮标在 24, 48 和 72 h 3 个不同预报时效下,有效波高预报结果与观测对比得到的归一化标准差(SD)、标准化处理后的中心均方根偏差(RMSD)以及相关系数(CC)。结合图 2 可以发现,在 4 个站位中, HU-02 和 HU-06 处于长江口开阔海域,其波高变化幅度要大于杭州湾北部近岸海域的 HU-01 和 HU-03,但 HU-02 和 HU-06 在 3 个预报时效下均表现出较高的相关性和较小的 RMSD,其预报性能整体优于位于 HU-01 与 HU-03 处的,反映出系统在靠近陆地的浅水区域模拟能力有所降低,但仍维持客观的预报水平。在 HU-02 和 HU-06 处,模拟结果的 CC 可达 0.94, SD 与观测结果相当。

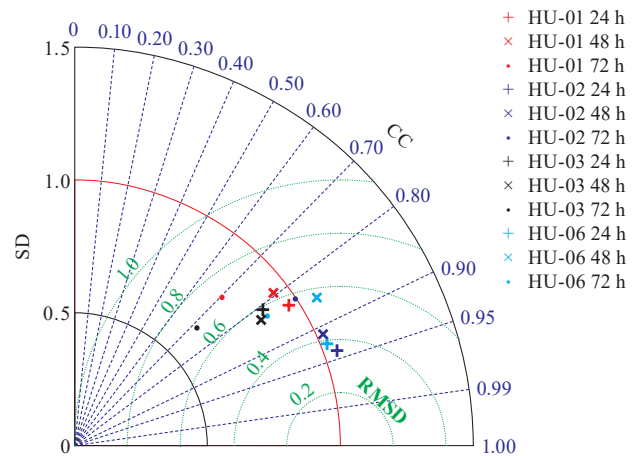


图 6 不同预报时效的波高泰勒图
Fig. 6 Taylor diagram of forecast H_s during different time horizons

从不同预报时效的对比来看, 5个站位在相同预报时效下的误差分布位置较为相似, 而不同预报时效之间的误差特征存在一定差异。进一步的分析表明, 对于HU-02和HU-06, 48 h和72 h预报与24 h预报具有相近的预报精度; 而在HU-01和HU-03处, 24 h和48 h预报技巧基本相当, 但72 h均有所下降, 以HU-03处下降约10%表现最差。总体而言, 24 h预报结果的SD和RMSD显著低于48 h和72 h预报结果, 同时相关系数最高, 其次为48 h预报结果, 误差随预报时效的增加而增加。

3.3 2508号台风“竹节草”(CO-MAY)影响期间检验评估

2025年7月27日—30日, 受台风“竹节草”影响, 上海海域出现持续约70 h大到巨浪过程。30日3时30分, HU-02号浮标观测到最大有效波高5.5 m, 同日16时40分前后, “竹节草”以热带风暴强度再次在上海市奉贤区沿海登陆。基于ERA5再分析风场开展的“竹节草”过程后报有效波高如图7所示, 模拟波高变化趋势与观测一致性良好。

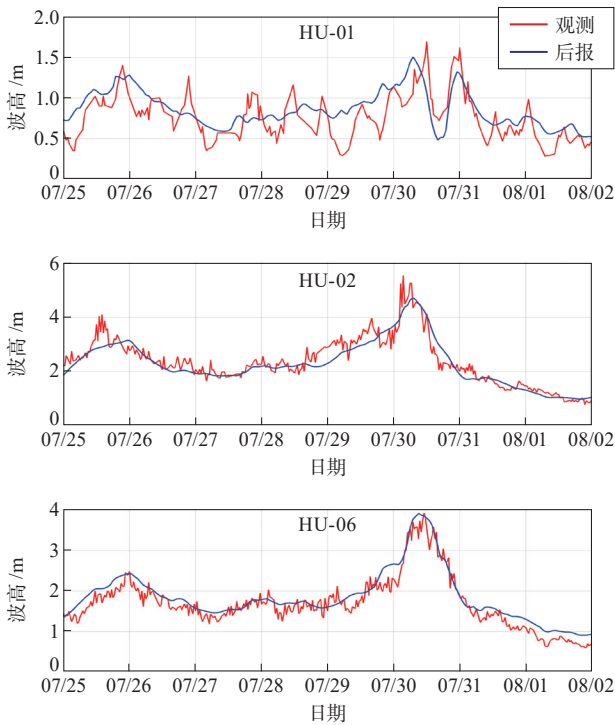


图7 “竹节草”过程后报与观测波高时间序列图
Fig. 7 Time series of hindcast and observed H_s during “CO-MAY”

就峰值而言, HU-06浮标处实测与模拟最大有效波高均为3.9 m; HU-01处实测值、模拟值分别为1.7 m和1.5 m; HU-02处实测值、模拟值分别为

5.5 m和4.7 m, 后报平均绝对相对误差(MARE)为8.8%。由表3可知, 各浮标站位后报的RMSE平均为0.23 m, 系统能够较好地再现“竹节草”影响上海期间的有效波高变化过程。

为评估系统对于台风引起的波高峰值的预报能力, 考虑台风登陆时间及实测峰值的出现时刻, 分别提取提前24, 48, 72 h的预报结果, 对2025年7月29日8时至8月1日8时的有效波高作对比分析, 并计算不同预报时效的RMSE, 结果见表3, 对应时间序列见图8。本次使用ECMWF提供的预报风场。

表3 竹节草期间不同预报时效的有效波高均方根误差
Table 3 RMSE of different time horizons forecast H_s during “CO-MAY”

浮标	不同预报时效的有效波高均方根误差/m			
	24 h	48 h	72 h	后报
HU-01	0.24	0.27	0.34	0.16
HU-02	0.27	0.28	0.44	0.27
HU-06	0.29	0.33	0.37	0.27

表3显示, 在24 h预报时效内, 3个站位预报的RMSE均可达到后报精度相当的水平, 48 h预报RMSE平均增幅0.02 m, 72 h预报RMSE平均增幅0.09 m。结合后报RMSE与图7、图8, 可以看出误差随预报时效增加的主要原因是台风路径及强度的不确定性, 尤其台风预报准确性起着至关重要的作用。

由图8可知, 3处浮标在24 h预报时效内模拟结果最佳, 峰值出现时间均与观测一致。其中HU-01浮标观测/预报峰值分别为1.7 m/1.6 m, HU-02为5.5 m/5.1 m, HU-06为3.9 m/4.0 m, 预报MARE为5.3%。与图7后报峰值对比可见, 24 h最大值模拟精度优于后报结果, 这可能是由于ERA5后报风场对台风强度刻画偏低所致。

综上, 该系统在上海海域表现出优异的模拟能力, 各站点后报RMSE均小于0.25 m, MAE小于0.2 m, 相关系数最高达0.9以上; HU-03处预报性能随预报时效增加降低约10%, 其余站位72 h预报水平与24 h和48 h相当。总体来看, 预报性能随预报时效增加虽有小幅衰减, 但在72 h内仍保持较高的相关性 with 稳定性。在“竹节草”台风影响期间, 系统后报RMSE为0.23 m, 模拟波高与实测变化趋势一致性较高, 最大有效波高在后报和24 h预报MARE均不超过10%, 48 h预报RMSE平均增幅0.02 m, 72 h为0.09 m, 波高模拟表现优秀。系统后报MAE优于李本霞等^[28]建立的近海近岸高精度海浪业务化数值预报系统。

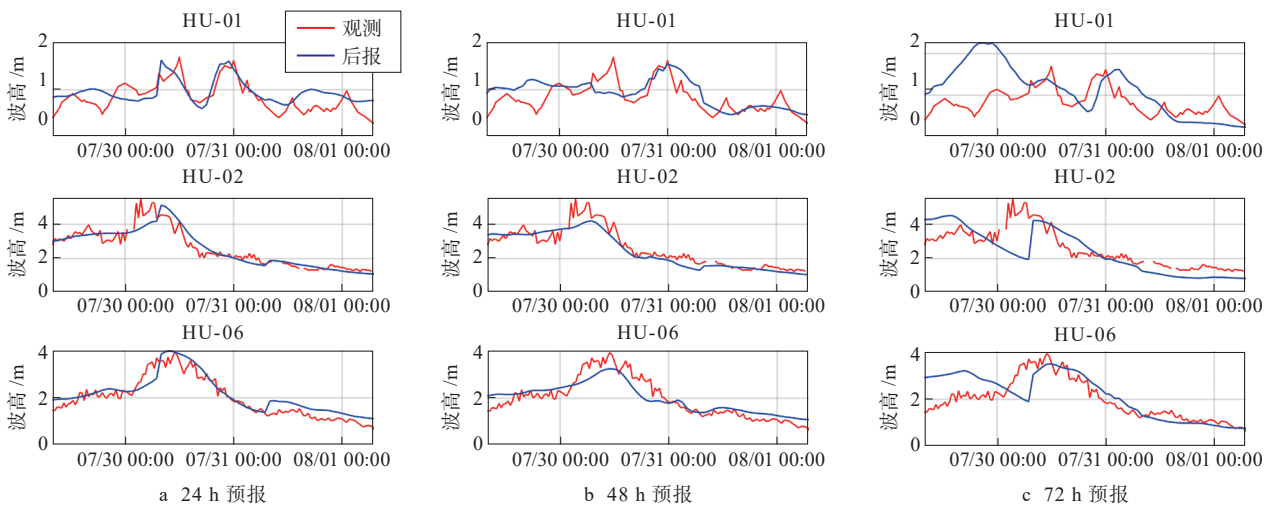


图8 24 h/48 h/72 h 预报与观测波高时间序列图
Fig. 8 Time series of 24 h/48 h/72 h forecast and observed H_s

4 场景应用

本系统自2019年初步建成,已稳定业务化运行至今。通过与东海航海保障中心合作合力打造长江口航保服务示范区,系统每日预报产品即时传送至长江口航保服务示范区助导航系统,为其智能推荐最优航线提供决策支持;同时海浪预警报信息还通过船舶自动识别系统 AIS (automatic identification system) 推送至经过上海市海域的船舶驾驶台,为船舶航行提供直观、全面的浪高参考,有效提升水运网络效率,提升上海国际航运中心海上安全保障能力。

此外,系统先后为横沙浅滩固沙保滩稳定河势先行段工程、上海市海洋生态保护修复项目、上海市海洋灾害综合防治体系建设工程、大芦线东延伸航道整治工程等涉海重大工程项目以及上海市农业农村委员会执法总队禁捕执法作业、长江口水文水资源勘测局船只勘测作业等提供实时、高效的海浪预报保障;为台风、寒潮等极端过程引起的上海海域海浪灾害应急预警提供及时、准确的预报支撑。

5 结论与展望

本文基于非结构网格加密的 SWAN 模式和 DFF-ConvLSTM 人工智能方法,构建适用于上海国际航运中心的精细化、业务化、自动化海浪数智预警报系统。经验证,各站点后报 RMSE 均小于 0.25 m, MAE 小于 0.2 m; 预报性能随预报时效增加虽有小幅衰减,但在 72 h 内仍保持较高的相关性 with 稳定性。在“竹节草”台风影响期间模拟表现优秀,系统

后报 RMSE 为 0.23 m, 最大有效波高在后报和 24 h 预报的 MARE 均不超过 10%, 48 h 预报 RMSE 平均增幅 0.02 m, 72 h 为 0.09 m。经多年建设实践与优化升级,系统实现了重点区域分辨率达 100 m、预警响应时间 3 h 以内的海浪预报预警,并在上海海域表现出优异的模拟能力,能较好满足航运安全保障的迫切需求,有效提升了上海国际航运中心海上安全保障能力。

系统未来需对洋山港附近岸线地形进行精细刻画,并提高重点区域分辨率,以保证小洋山北作业区完工后附近海域的海浪模拟精度;同时尽快实现海浪模拟的风涌分离,以提高码头的接卸效率。另一方面,考虑持续深入研究使用数值模式和 AI 相结合的方式,以填补波向等其他波浪要素智能订正的空白,提升系统对于波浪全要素的预报能力。

参考文献:

- [1] 新华社中国经济信息社,波罗的海交易所. 新华·波罗的海国际航运中心发展指数报告(2025) [R]. 北京: 新华社, 2025.
- [2] 上海市海洋局. 海浪预报和警报发布规范: DB 31/T 1383—2022 [S]. 上海: 上海市市场监督管理局, 2022.
- [3] GROUP T W. The WAM model-A third generation ocean wave prediction model [J]. Journal of Physical Oceanography, 1988, 18 (12): 1775-1810.
- [4] TOLMAN H L, BALASUBRAMANIYAN 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.
- [5] 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.
- [6] PANG Renbo, YU Fujiang, GAO Yuanyong, et al. An effective communication topology for performance optimization: a case study of the finite-volume wave modeling (FVWAM) [J]. Geoscientific Model Development, 2025, 18: 4119-4136.
- [7] JANSSEN P. Progress in ocean wave forecasting [J]. Journal of Computational Physics, 2008, 227 (7): 3572-3594.
- [8] 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.
- [9] 李雪丁, 曾银东, 陈金瑞, 等. 福建省智能网格海洋预报业务系统实现与应用 [J]. 海洋预报, 2021, 38 (1): 10-17.
- [10] 马荣华, 陈海韵, 罗阳, 等. 广州海域精细化海洋灾害数值预警系统的构建与应用 [J]. 海洋预报, 2025, 42 (3): 103-113.
- [11] WMO L W. Intercomparison of operational wave forecasting systems against in-situ observations for JJA 2025-00 and 12UTC runs, part I: significant wave height [R/OL]. UK: ECMWF, 2025. <https://confluence.ecmwf.int/display/WLW/Significant+wave+height>.
- [12] 陆钰婷, 郭文康, 丁骏, 等. 人工智能海浪预报的发展与挑战 [J]. 海洋学研究, 2024, 42 (3): 28-37.
- [13] 李博, 李骏旻, 李毅能, 等. 人工智能在岛屿近岸海浪模拟中的应用 [J]. 厦门大学学报 (自然科学版), 2020, 59 (3): 420-427.
- [14] 徐维真, 李锐, 胡伟, 等. 基于卷积神经网络的渤海黄海水浪波高场预报模型构建与训练方法研究 [J]. 海洋通报, 2025, 44 (1): 1-14.
- [15] FAN Shuntao, XIAO Nianhao, DONG Sheng. A novel model to predict significant wave height based on long short-term memory network [J]. Ocean Engineering, 2020, 205: 107298.
- [16] ZHOU Shuyi, XIE Wenhong, LU Yuxiang, et al. ConvLSTM-based wave forecasts in the South and East China Seas [J]. Frontiers in Marine Science, 2021, 8: 680079.
- [17] 金阳, 韩磊, 金梅兵, 等. 基于 ConvLSTM 的中国东南沿海波浪智能预报和评估 [J]. 海洋学研究, 2024, 42 (3): 88-98.
- [18] 宋佳芮, 胡珀, 莫冬雪. 基于卷积长短期记忆神经网络的南海北部台风浪有效波高预报方法研究 [J/OL]. 海洋科学, 1-21 [2026-01-17]. <https://link.cnki.net/urlid/37.1151.P.20251202.1018.002>.
- [19] GAO Zhiyi, LIU Xing, YU Fujiang, et al. Learning wave fields evolution in North West Pacific with deep neural networks [J]. Applied Ocean Research, 2023, 130: 103393.
- [20] 史剑, 王璞, 钟中, 等. 两种网格下的 SWAN 模式对黄渤海海浪模拟比较 [J]. 海洋预报, 2011, 28 (4): 48-57.
- [21] PALLARES E, LOPEZ J, ESPINO M, et al. Comparison between nested grids and unstructured grids for a high-resolution wave forecasting system in the western Mediterranean sea [J]. Journal of Operational Oceanography, 2017, 10 (1): 45-58.
- [22] MAO Miaohua, VAN DER WESTHUYSEN A J, XIA Meng, et al. Modeling wind waves from deep to shallow waters in Lake Michigan using unstructured SWAN [J]. Journal of Geophysical Research; Oceans, 2016, 121 (6): 3836-3865.
- [23] LI Jiangxia, CHEN Yongping, PAN Shunqi, et al. Estimation of mean and extreme waves in the East China Seas [J]. Applied Ocean Research, 2016, 56: 35-47.
- [24] 李一国, 荣增瑞, 孟鑫, 等. 高分辨率风场对长江口海域波浪场模拟能力的影响研究 —— 以台风“灿都”为例 [J]. 海洋科学, 2023, 47 (11): 1-11.
- [25] JIANG Yan, RONG Zengrui, LI Pixue, et al. Modeling waves over the Changjiang River Estuary using a high-resolution unstructured SWAN model [J]. Ocean Modelling, 2022, 173: 102007.
- [26] JIANG Yan, RONG Zengrui, LI Yiguo, et al. Toward a high-resolution wave forecasting system for the Changjiang River Estuary [J]. Remote Sensing, 2023, 15 (14): 3581.
- [27] 屈远, 高志一, 蔡靖泽, 等. 数值模型和智能模型的海浪预报能力比较 [J]. 海洋预报, 2022, 39 (5): 17-26.
- [28] 李本霞, 吴淑萍, 邢闯, 等. 近海近岸高精度海浪业务化数值预报系统 [J]. 海洋预报, 2010, 27 (5): 1-6.