

台风浪集合预报方法研究

刘安琪¹, 李铖², 郭文云³, 葛建忠^{1*}

(1. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200241; 2. 上海市海洋监测预报中心, 上海 200062; 3. 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

摘要: 提出一种新型的集合预报方法, 考虑台风实时预报信息及历史路径信息, 基于动态权重生成台风预报路径集合, 形成集合预报风场, 并结合波浪数值模式(SWAN)和有限体积海洋数值模式(FVCOM), 对台风期间波浪的有效波高进行模拟实验; 在后报验证的基础上, 使用集合预报数值实验给出结果的概率分布。结果表明: 在集合预报的部分时间段内, 集合预报结果对实测结果的覆盖率最高达到94%。此方法适用于台风影响下近岸波浪要素的预测, 可为近岸海域的波浪预报工作提供新的预报技术和思路。

关键词: 台风浪; 集合预报; 波浪数值模式; 有限体积海洋数值模式

中图分类号: P731.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)04-0022-12

0 引言

台风期间, 受台风影响的海域的环流、水位、波浪等要素通常会发生剧烈变化, 其中水位的异常变化会导致风暴潮现象的发生, 而剧烈的海表风场会激发产生巨大的波浪, 即台风浪现象^[1]。与风暴潮相比, 台风浪作用周期更短, 但产生的瞬时破坏作用更大, 会破坏近岸工程, 并威胁人们的生命以及财产安全。2019年, 我国近海共发生有效波高4.0 m (含)以上的灾害性海浪过程39次, 因灾直接经济损失达0.34亿元, 死亡(含失踪)22人。台风浪在向近岸传播的过程中, 会与复杂海底地形以及不规则岸线发生非线性相互作用^[2], 使得波浪预测难度增大, 另外近岸波浪观测资料的缺乏也限制了区域波浪预报产品预报精度的提升。

对台风浪的预报, 国内外很多学者从不同的方向做了很多努力, 取得了丰硕的成果。CHAWLA等^[3]利用了美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的CFSR(Climate Forecast System Reanalysis)再分析

数据, 使用第三代风浪模型(WAVEWATCH III)进行了31 a的后向预报, 分析发现, 在南半球, CFSR对风速的过度预测对波浪预测的准确性有重要影响。ALVES等^[4]基于NCEP和美国海军数字气象和海洋学研究中心(Fleet Numerical Meteorology and Oceanography Center, FNMOC)的数值模式对有效波高等要素进行综合概率预报, 结果表明多模式联合预报方式的准确性比单一数值模式有了很大的提升。FAN等^[5]使用多个全球大气模式数据作为波浪模型输入得到的有效波高, 与空间上不同近岸浮标的观测值的吻合程度各不相同。PAN等^[6]提出了一种优化模型-集合波高的算法, 计算了不同风模式输入波浪模型产生的波高, 该算法在空间上给不同风模式赋不同的权重, 调整后的波高在近岸范围内与浮标观测值的吻合较好。ZIEGER等^[7]使用欧洲中期天气预报中心集合预报模式(The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts-Ensemble Prediction System, ECMWF-EPS)中经过矫正的大气风场生成的集合风场进行波浪模拟, 并对比了近岸区域的浮标观测数据, 部分风场的结果和观测

收稿日期: 2022-05-01。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41776104)。

作者简介: 刘安琪(1999-), 男, 硕士, 主要从事河口区域台风风暴潮、风暴浪的数值模拟研究。E-mail: liuanqi0424@126.com

*通信作者: 葛建忠(1981-), 男, 研究员, 博士, 主要从事近海环流及泥沙动力学数值模拟研究。E-mail: jzge@sklec.ecnu.edu.cn

的有效波高峰值吻合较好。

综上所述,近岸波浪预报结果的准确性在很大程度上依赖于风场的准确性。近岸波浪由于各物理过程的非线性作用导致不确定性很强,很难找到一种传统模式或者参数化方案在整个预报时段内都表现较好。在实际预报中,既要关注预报结果的准确性,也要关注预报结果的概率区间预测。本文旨在提出一种新的台风路径集合方法开展波浪预报实验,并给出台风浪的极值范围作为预报参考。

集合风场目前主要有以下几种生成方法:一种是使用单一业务预报中心的数据作为数据源(如应用较多的增长繁殖法^[8])以及特定业务中心集合预报系统中的集合成员^[7],这种方法的优势在于数据一致性较好,不足之处是会引入单一模式的固有误差;另一种是使用多业务预报中心数据成员,基于“共识”的方式挑选出其中较好的成员^[9];第三种是基于不同业务中心历史预报误差分配权重,使用“概率圆”的方法进行集合概率预报^[10],这种方法能避免单一模式的偶然误差,不足在于各预报源的“好坏”一般由其历史预报误差确定,无法在预报过程中实时变动;还有一种是使用研究区域内历史台风运动数据作为数据源,并基于台风的历史最佳路径集数据确定所有状态的概率转移情况,从而在实际预报过程中对台风移动的路径进行模拟^[11],这种方法的不足之处在于对实时预报数据的利用较少,且状态转移概率情况受限于研究区域。这些方法都只聚焦于历史数据或实时预报数据,没有同时兼顾到两者。

本文使用实况台风数据融合背景分析风场,驱动近岸波浪模式以及海洋模式进行浪-流耦合模拟,使用后报方式验证数值模式;在数值模式精度良好的基础上,提出一种新的台风预报路径集合生成方法,考虑研究区域内历史台风数据和业务中心实时预报数据,构建集合路径并形成集合风场,开展近岸区域波浪要素计算的数值实验,并考虑集合路径情形下有效波高计算结果的覆盖率,以此提供一种新的台风浪概率数值预报方法。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域与数据概况

长江口区域处于亚热带季风气候区域,最大风

速大多发生在夏秋季的台风时期。该区域内的波浪以风浪为主^[12],由于入海口分叉较多,地形和岸线较复杂,区域内不同位置的波高差异性很大,最大波高大多出现在台风期间。据统计,平均每年有2~3个台风对该区域产生直接影响^[13]。长江口区域存在诸多重要的近岸站点(见图1)。本文采用H1与H2两浮标平台的实测波高数据,采样频率为1h,其中H1位于杭州湾北岸近岸区域(121°33'12.05"E, 30°44'52.84"N),H2位于长江口外30m水深处(122°48'29.29"E, 30°58'12.19"N),两个站位兼顾了外海与近岸的波浪差异及变化。

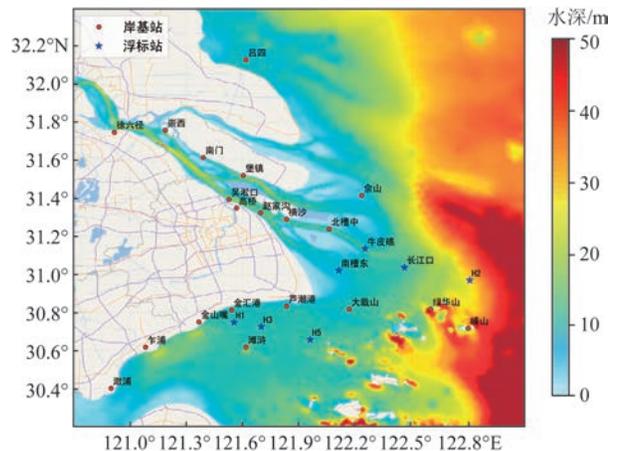


图1 研究区域及主要岸基及浮标站点

Fig.1 Study area and coastal and buoy observation sites

1.2 数值模式

本文选择数值模式作为研究方法,波浪模式选用第三代海浪数值模式(Simulating Waves Nearshore, SWAN),考虑风能输入、波浪折射、三波和四波相互作用、深度诱导波破碎、底摩擦等因素;风场输入采用JANSSEN风增长方式,白冠耗散使用KOMEN模式,底摩擦采用JONSWAP模式进行参数设置。考虑到潮汐作用,除为波浪模式输入风场外,还必须为其输入潮流和潮位作为驱动要素,其由海洋模式进行计算,从而进行高精度的浪流耦合计算(见图3)。

海洋模式选用有限体积海洋数值模式(Finite-Volume Community Ocean Model, FVCOM)。它是一种无结构三角形网格架构、有限体积自由表面的三维海洋数值模型,其原始方程包括动量、质量连

续方程,以及温度、盐度和密度方程。和结构网格海洋模型相比,三角形网格在岸线相接处有局部加密效果,且过渡更加平滑,在长江口杭州湾区域已广泛被使用^[14-15]。

为提高预报时效并保证计算精度,SWAN模式采用大小区域嵌套计算的方式。大区域覆盖了研究区域内台风从产生到对近岸造成影响的整个过程,能给小区域提供合理的计算边界(见图2a)。为兼顾计算效率,采用正交曲线网格,覆盖范围为23°~42°N,115°~130°E,包括了东海、黄海、渤海和部分西北太平洋洋面,开边界处分辨率为3 km左右。近岸区域,由于岸线和地形的复杂性很高,对波浪要素的影响十分显著。为更加精细地刻画各种局地

变化,模拟近岸波浪,保证计算结果的准确性,小区域(见图2b)采用高分辨率无结构三角形网格,主要包括长江口以及杭州湾,河流上边界延伸至大通站,在河道以及沿岸处进行加密,分辨率为100 m左右。在预报计算时,大区域计算较快,将其波浪谱结果作为小区域的计算边界,并在小区域内进行精细化计算,从而在保证计算结果准确性的同时兼顾计算效率。浪-流耦合计算框架见图3。

2 集合风场的构建

2.1 集合路径的形成

本文中以24 h、48 h、72 h 3个预报时刻为代表,

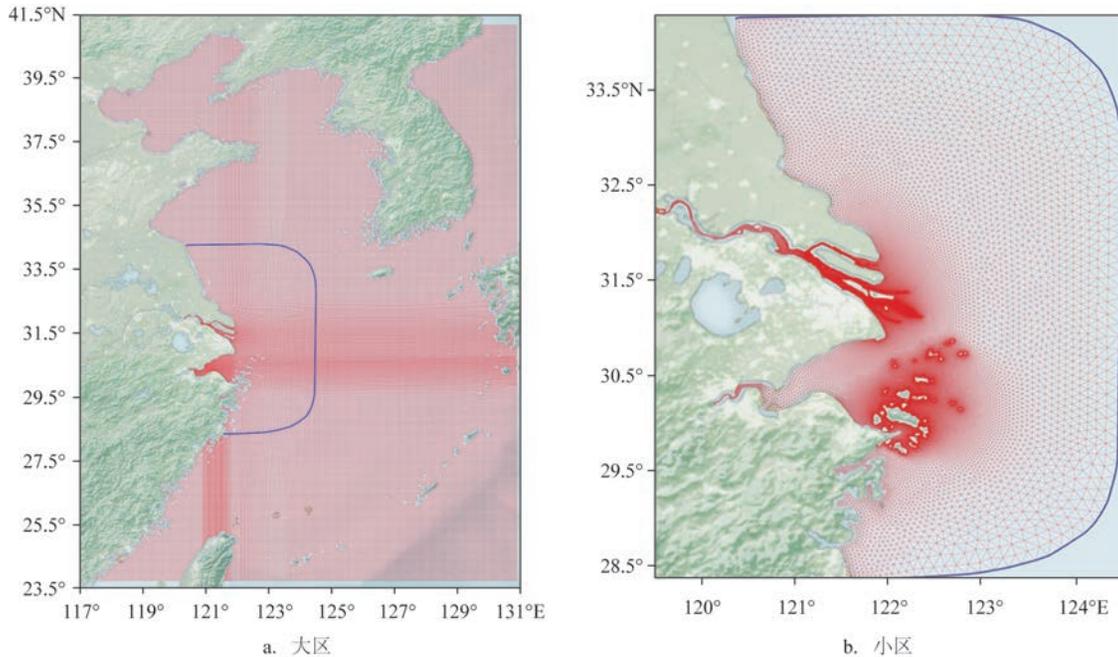


图2 研究区域内SWAN模式计算网格
Fig.2 SWAN model grid in the study area

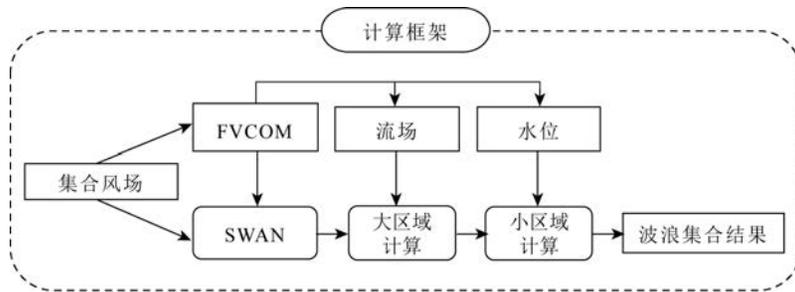


图3 浪-流耦合计算框架
Fig.3 Wave-flow coupled computing framework

构建集合路径并形成集合风场。集合路径的构建采用以下步骤:首先形成某一时刻的预报位置集合,并为它们计算分配相应的权重,再将3个代表性预报时刻各自位置集合进行组合,形成所有的集合路径,并计算出每条路径的权重。整个流程的重点是对某一时刻各预报位置的确定和权重分配,本文采用如下方法:统计业务预报中心(中央气象台)历史台风位置预报误差,并形成当前预报时刻位置偏差的概率分布情况,选取两个特征概率从而确定两个特征偏差距离;同时,使用台风历史最佳路径集数据,基于面积相似法^[16]优选出若干相似路径并综合距离相似及时间相似搜寻出预报时刻相似路径上的对应位置,统计相似位置相对当前时刻预报位置的方向,这些方向代表着台风移动方向以及移动速度的不同趋势,使用聚类分析的方法确定若干个主要聚类方向以及各自的权重;将业务预报位置作为中心,偏差距离作为特征半径,聚类方向结果作为特征方向,形成某一预报时刻的特征预报位置集合。

2.1.1 代表性位置偏差计算

本文搜集了中央气象台2008—2020年东海区域共318场台风的历史预报数据以及对应的实际台风过程数据(网址:<http://typhoon.zjwater.gov.cn>);以实时起始时刻和预报时刻的位置形成的区域筛选出此区域内相同预报时效的历史预报数据,统计各预报时效下历史位置预报偏差的累计概率情况。预报偏差 E_{Dis} 为根据两点经纬度计算出的距离误差,公式为:

$$E_{Dis} = 2R \sin^{-1} \sqrt{\sin^2 \frac{a}{2} + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \frac{b}{2}} \quad (1)$$

式中: R 为地球半径; a 为两点纬度之差; b 为两点经度之差; φ_1 和 φ_2 为两点纬度。

各预报时效位置偏差的累计概率曲线见图4。从图中可以看出,随着累计概率的增大,各预报时刻位置偏差增大的速率都越来越大。本文选取70%和95%概率为典型代表作为特征概率,确定各预报时刻两个特征偏差距离作为各预报时刻的两个特征半径,结果见表1。

2.1.2 主要聚类方向计算

搜集了1949—2020年西太平洋区域台风最佳路径集资料(网址:<http://tcdata.typhoon.org.cn>)^[17-18],

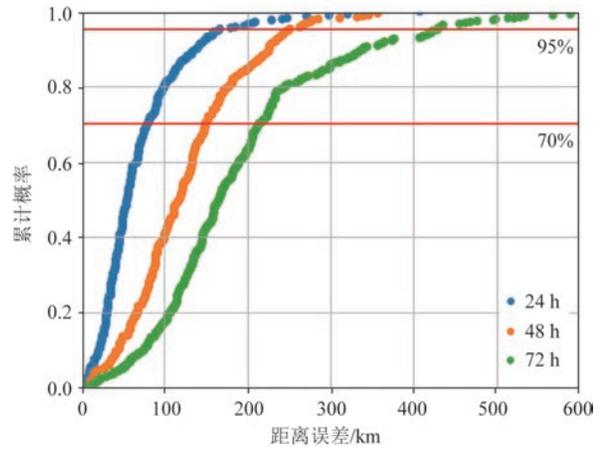


图4 各预报时刻位置偏差的累计概率

Fig.4 Cumulative probability of position deviation at each forecast moment

表1 特征偏差距离(单位:km)

Tab.1 Feature deviation distance (unit: km)

预报时刻/h	70% 概率	95% 概率
24	94.7	164.4
48	166.6	265.3
72	228.2	462.6

对实际台风过程中的各预报时刻,基于面积相似法^[16],以历史台风轨迹和实时台风轨迹上所有路径点为分割点将整个面积分成 L 段,采用积分方式计算历史台风路径和当前路径围成的面积,并作为相似度依据。计算公式为:

$$S = \sum_{i=1}^L S_i \quad (2)$$

式中: S 为总面积; S_i 为面积微元。

采用这种方式,当预报台风、预报起始时刻以及预报时效发生变化时都会导致相似路径成员发生变化。获取所有相似路径后,选择时间和距离最近的对应预报时刻的相似位置,将业务预报位置和所有的相似预报位置投影为二维平面上的点,计算出所有相似位置相对于业务预报位置的方向角($0^\circ \sim 359^\circ$)。将这些方向角作为数据,使用一维均值聚类方法形成特征聚类方向。计算方法为:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{x \in C_i} \|x - u_i\|^2 \quad (3)$$

$$u_i = \frac{1}{|C_i|} \cdot \sum_{x \in C_i} x \quad (4)$$

式中:样本共划分 k 簇; C_i 为第 i 簇; u_i 为簇 C_i 的均值向量,也称为质心; x 为样本点; E 为平方误差。

式(3)中由于 k 值不同,计算出的 E 也不同。根据经验,一般将 k 从 2~10 赋值试算 E ,随着 k 增大, E 呈下降趋势,以 E 在下降过程中梯度最大处的 k 值作为最优的聚类个数(簇个数)。每个簇质心的方向角代表一个特征方向,该簇包含的方向角数量在所有方向角数量中的占比为该特征方向的权重。

2.1.3 形成集合路径

获得各预报时刻的特征半径和特征方向后,对某一特定预报时刻而言,以业务预报位置为中心可以形成特定时刻所有的特征成员位置;从每个预报时刻中各取一个成员位置,再连接所有选出的成员位置作为一条路径,集合路径的数量为各预报时刻成员位置进行组合的所有情况,每条路径的概率也随之确定(见图5)。具体流程如下:

①对特定预报时刻形成特征半径及特征方向,获得各特征方向的权重。以 24 h 为例,基于历史业务预报数据确定指定概率下特征半径为 R_{n1} ;基于相似路径数据,使用聚类分析方法收敛到最佳聚类个数 K_{n1} (K_{n1} 为式(3)中最优 k 取值,不同数据集最优值不同),每个聚类的中心作为一个特征方向,每个聚

类样本量占总样本的比例作为特征方向的权重 ($W_{n11}, W_{n12}, \dots, W_{n1K_{n1}}$),对应的特征点空间位置为 $P_{n11}, P_{n12}, \dots, P_{n1K_{n1}}$ 。

②对 24 h、48 h 和 72 h 预报时刻,从每一个时刻选择一个特征位置形成一条成员路径,例如 $P_{n1K_{n1}} \rightarrow P_{n2K_{n2}} \rightarrow P_{n3K_{n3}}$,相应地,这条路径的权重为 $W_{n1K_{n1}} \cdot W_{n2K_{n2}} \cdot W_{n3K_{n3}}$,3 个预报时刻一共可以形成 $K_{n1} \cdot K_{n2} \cdot K_{n3}$ 条路径,计算每条路径的权重并进行集中构成集合路径。

2.2 集合风场的形成

在具有确定性的台风实况路径的后报验证中,将台风风场模型融合背景风场作为风场输入,而预报实验中仅考虑台风模型风场。

台风风眼处风速较小且向外迅速增加,超过眼壁后风速又急剧减小直至消失。本文采用对称风场模型刻画台风风场,其气压场由藤田公式^[19]给出:

$$P = P_e - (P_e - P_c)[1 + 2(r/R)^2]^{0.5} \quad (5)$$

式中: r 为距离台风中心的距离; P 为空气质点的气压, P_e 为环境气压, P_c 为台风中心气压; R 为最大风速半径。通过藤田公式可以计算出整个台风风域内的气压分布情况。

台风风速根据梯度风关系结合气压分布给出^[20],计算公式如下:

$$w_t = \sqrt{\frac{f^2 r^2}{4} + \frac{r}{\rho_a} \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{fr}{2}} \quad (6)$$

式中: $f = 2\Omega \sin\varphi$ 为科氏参数, Ω 为地球自转角速度, φ 为纬度; ρ_a 为空气密度。

在后报验证中,本文使用 CFSR 作为背景风场。CFSR 是第三代再分析产品,它是一个全球性的、高分辨率的、大气-海洋-陆地-表面-海冰耦合系统,旨在提供这一时期这些耦合域状态的最佳估计。该数据经纬度分辨率可以达到 0.5° ,时间分辨率可以达到 1 h。两种风场融合公式为^[21]:

$$W_c = (1 - e)W_1 + eW_0, e = \frac{c^4}{(1 + c^4)}, c = \frac{r}{10R} \quad (7)$$

式中: W_1 为台风模型风场计算风速; W_0 为 CFSR 风场风速; r 为网格点与台风中心的距离; e 、 c 为系数; R 为最大风速半径,计算公式为^[21]:

$$R = 1119(1010 - P_c)^{-0.805} \quad (8)$$

式中: P_c 为台风中心气压。

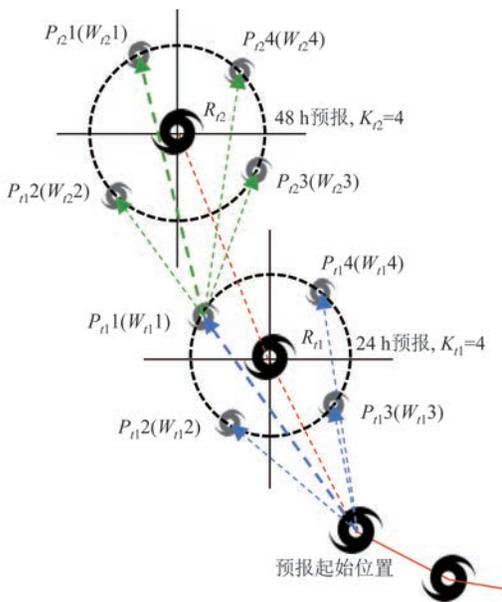


图5 台风集合路径(0~48 h)

Fig.5 Typhoon track ensembles (0~48 h)

3 应用示例

本文以2019年9号台风“利奇马”为例,使用实况台风路径对数值模式进行后报验证;选择2019年8月9日00时(北京时,下同)作为起始预报时刻进行72 h的虚拟集合预报实验。

台风“利奇马”于8月7日05时被中央气象台升格为台风,23时升级为超强台风,此后台风一直向西北方向移动,靠近浙江沿岸地区,8月10日01时45分左右在浙江省温岭市城南镇沿海登陆,此时中心附近最大风力达到16级,中心最低气压为930 hPa,随后台风继续移动至黄海海域,8月11日20时50分左右在青岛市沿海再次登陆,此时中心最大风力仍有9级,中心最低气压为980 hPa,此后台风移动至渤海海面并不断减弱直至消亡。

自起始预报时刻,构建24 h、48 h、72 h的集合路径。选取从台风自洋面生成位置—各时刻业务预报位置区段作为实时轨迹,并与历史轨迹做相似度计算,计算出24 h、48 h、72 h预报时刻情形下相似度最高的各50条路径(见图6)。从图中可以看出,不同预报时刻的实时轨迹不同,相似路径的选择结果也不同。获取相似路径后,采用聚类分析方法确定各预报时刻的特征方向以及权重(见表2)。

形成各预报时刻预报位置以及集合成员位置后(见图7),采用2.1节中的方法形成48条($K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = 4 \times 3 \times 4$)集合路径,并计算出每一条成员路径的权重。

表2 各预报时刻特征方向及权重

Tab.2 Feature directions and weights for each forecast

moment		
预报时刻/h	特征方向/°	权重
24	295.4	0.20
	47.5	0.35
	205.5	0.15
48	92.6	0.30
	170.4	0.26
	59.0	0.58
72	278.0	0.16
	268.7	0.09
	98.8	0.30
	171.3	0.26
	56.4	0.35

考虑到模式冷启动计算的不稳定性,FVCOM模式和SWAN模式都提前7 d开始运行。计算完成后,验证部分站点有效波高的分布情况,给出各预报时刻下部分重点近岸站点以及整个研究区域有效波高的概率分布预测作为参考。

3.1 后报检验与数值预报实验

从与H1、H2站点实测波高数据的对比结果来看(见图8),后报检验(实况路径)的效果较好,自起

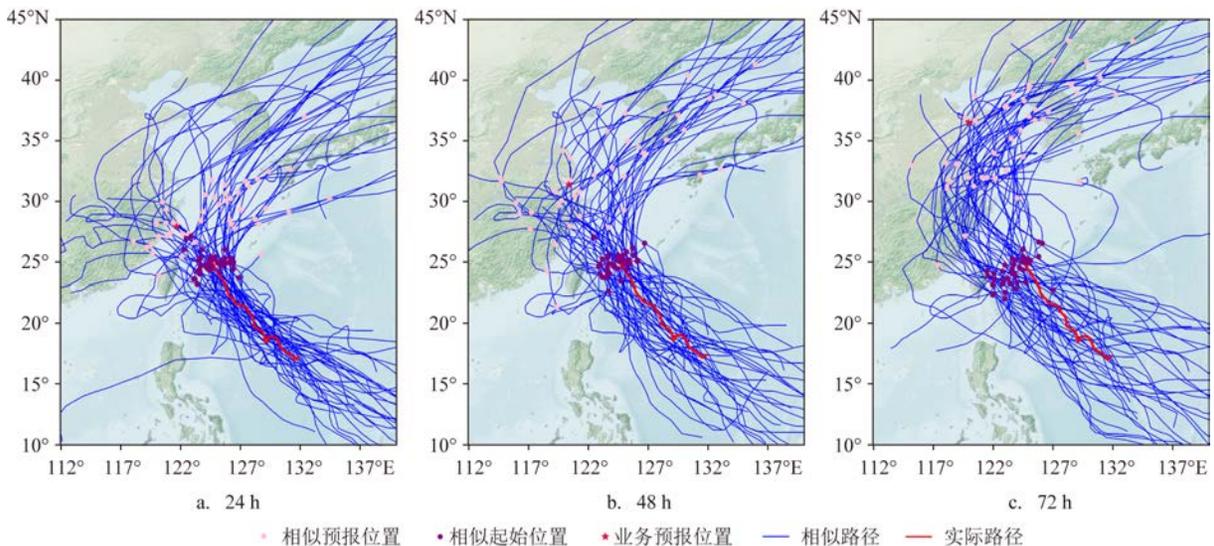


图6 各预报时刻的相似路径及相似位置

Fig.6 Similar tracks and similar positions for each forecast time

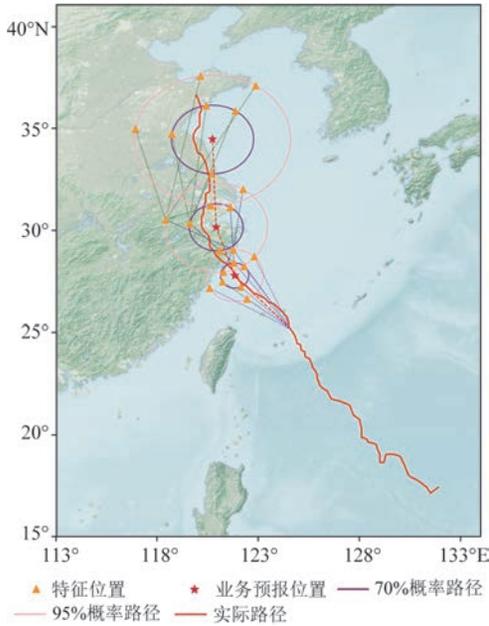


图7 各预报时刻特征位置及实况路径(0~72 h)

Fig.7 Location of features at each forecast time and the real track (0~72 h)

始预报时刻~72 h 预报时段, H1 和 H2 站点波高的均方根误差平均值分别为 0.31 和 0.60。使用集合路径进行数值预报实验的结果符合实际波高的基本发展趋势, 在台风离岸较近时间段内(24~72 h), 集合结果基本能够覆盖实际波高的波动范围, 且在一定程度上能够反映出波高的极值。值得注意的是, H1 站点位于杭州湾靠内区域, 在 24~48 h 时段内, 集合预报实验结果都小于实际值(见图 8a), 且两种概率路径(70% 和 95%) 区间值的差异性小于 H2 站点, 而在 48~72 h 时段内, 波高集合的结果基本覆

盖了实际值; H2 站点位于长江口外, 集合预报实验在 24 h 附近的波高预测偏大(见图 8b), 在 48 h 附近的波高集合结果基本覆盖了实际值, 在此时段内, 95% 概率路径结果的覆盖效果更好。

为量化集合预报在两特征概率情形下各预报时段内对实际有效波高的预测情况, 我们对每个实测站位计算其覆盖指数, 将指定时段内处于集合预报预测区间范围内的实测波高点数量占该时段内总实测波高点数量的比例作为指定时段的覆盖指数。计算公式为:

$$CR = \frac{O_{in}}{O_{all}} \quad (9)$$

式中: CR 表示覆盖指数; O_{in} 表示预报时段内观测点含于集合预报实验结果上下限范围内; O_{all} 为预报时段内所有观测点的数量。作为集合预报结果覆盖范围的参考, CR 的波动范围为 0~100%, 其值越大越好。CR 的计算结果见表 3。从表中可以看出, 在 0~24 h, 台风离岸较远, 集合成员离业务预报位置较近, 集合预报实验的准确性非常依赖业务预报的准确性, 集合结果的发散程度小, 因此, 该时段由于

表 3 各站位集合预报的覆盖指数(单位: %)

Tab.3 Cover rate of ensemble forecasts at each station (unit: %)

预报时长/h	H1(70% 路径)	H1(95% 路径)	H2(70% 路径)	H2(95% 路径)
0~24	0	0	0	0
24~48	5	4	22	54
48~72	39	52	74	94

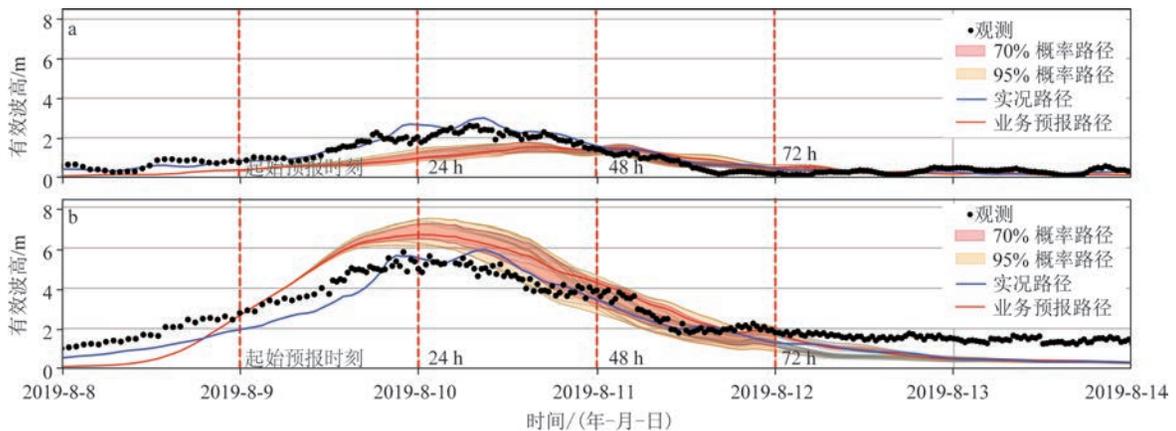


图 8 H1(a)与 H2(b)站点有效波高的验证

Fig.8 Validation of effective wave height at H1 (a) and H2 (b) sites

业务预报效果较差,导致两站的概率路径的CR都为0,其中H1站位集合结果区间范围小;在24~48 h预报时段的CR较高,两概率路径下的CR分别为39%和52%,其中H2站位的波高峰值结果偏大,两概率路径的CR分别为22%和54%;在48~72 h预报时段的两概率路径的CR有所上升,分别为74%和94%。

3.2 重要沿岸站点各预报时刻有效波高预测的概率分布参考

在实测站点数据验证良好的基础上,分析重要沿岸以及近岸浮标站点各预报时刻实况路径有效波高的分布情况,并给出集合预报路径相对实况路径有效波高预测的概率分布参考,结果见图9,其中站点自江苏沿岸开始,经沿北支、南支到杭州湾北岸区域,外加部分口外站点(见图1)。近岸站点波高预测概率分布在70%和95%概率路径下表现出的特征有所不同。95%路径在24 h预报时刻显示出较大的概率分布(见图9b),这一现象在沿岸及近岸站点如H5、堡镇、赵家沟、芦潮港有所体现,24 h台风距离站点较远,95%路径的部分集合成员距离上述站点更近;而70%路径在48 h预报时刻显示出较大的概率分布(见图9a),该现象在H2、绿华山等

部分口外站点有所体现,48 h台风位于站点附近,70%路径的部分集合成员距离上述站点更近;两种概率路径在72 h预报时刻给出的概率分布情况基本一致。从空间分布来看,H2、嵊山等离岸稍远的站点在整个时间序列上表现出相对较大的波高预测值,而徐六径、崇西、堡镇等站点波高预测相对较小。

3.3 有效波高空间预测的概率分布参考

为分析研究区域空间上有效波高的变化情况,图10和图11分别给出70%与95%概率路径集合风场情形下各预报时刻有效波高的空间分布情况。图中为分别计算所有集合成员有效波高并减去实况后报的结果,并根据权重加权分别累计差值大于0和小于0的增减量分布。

在台风中心移向研究区域的时段,与实况后报相比,集合预报的波高结果在台风中心附近的远岸区域表现为正增量,而在近岸处表现为负增量(见图10b、10c、11b、11c),这表明集合预报对波高空间场有重塑作用,导致空间上波高局地分布的差异。两概率路径情形的正增量最高都超过了4 m(见图10b、11b),两者负增量在近岸区域最大为-1 m左右(见图10c、11c)。当台风中心渐远时,较大概率路

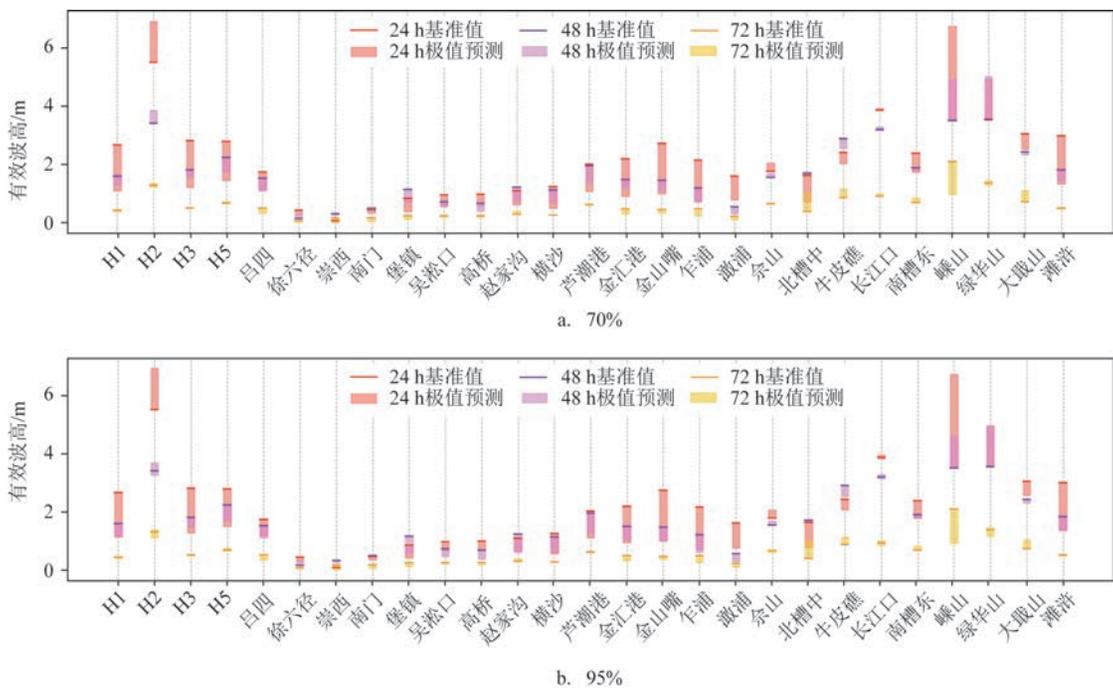


图9 重要沿岸站点有效波高预测概率分布

Fig.9 Predicted probability distribution of significant wave height at important coastal stations

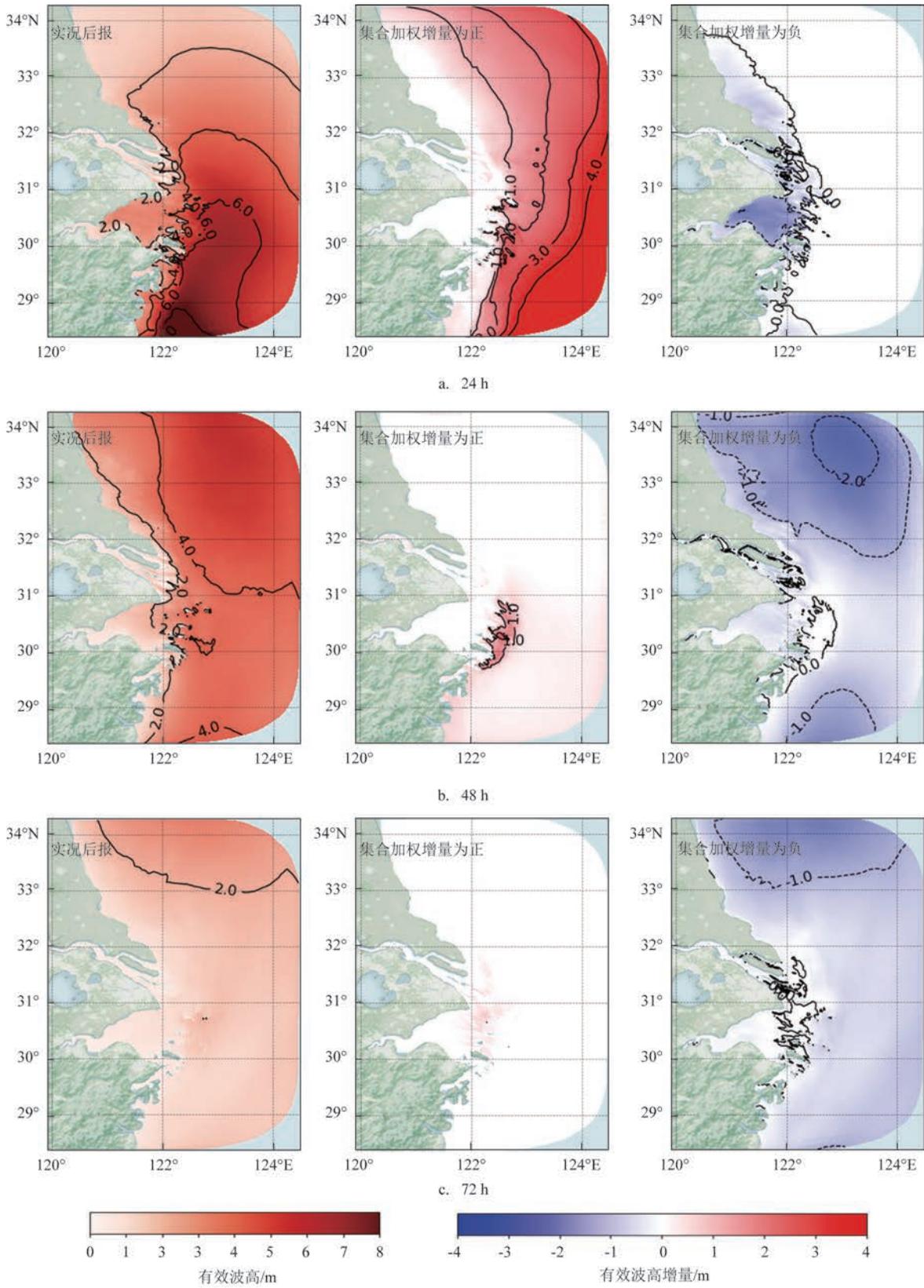


图10 70%集合风场情形各预报时刻有效波高空间分布

Fig.10 The spatial distribution of significant wave height at each forecast moment for the 70% ensemble wind field case

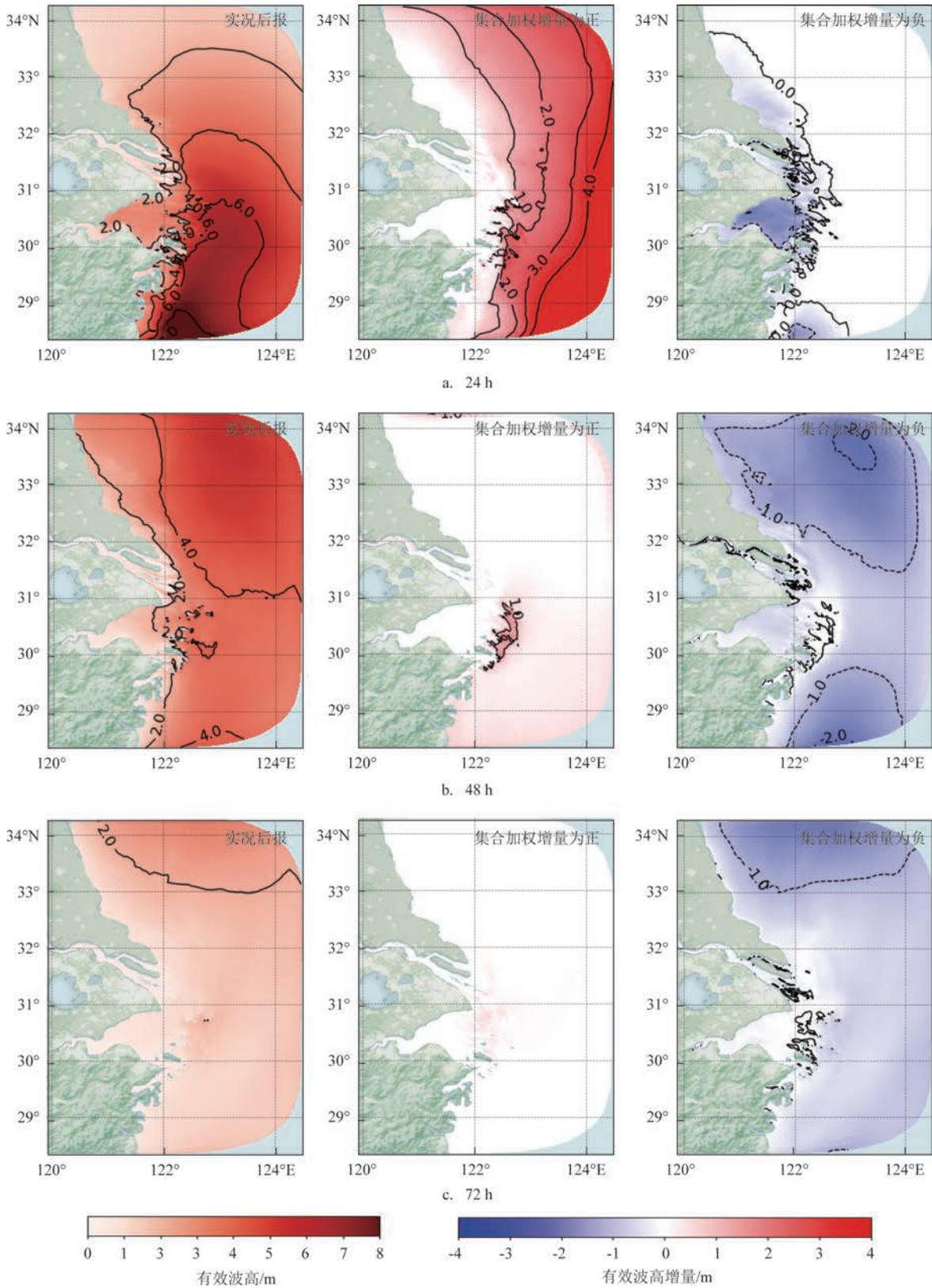


图 11 95% 集合风场情形各预报时刻有效波高空间分布

Fig.11 The spatial distribution of significant wave height at each forecast moment for the 95% ensemble wind field case

径情形的正增量区域(见图 11e)相对较小概率路径情形(见图 10e)偏移近岸研究区域更远,最大值均为 1 m 左右,而较小概率路径情形的负增量区域总体相对偏移近岸研究区域更远(见图 10f、11f)。当台风中心离研究区域更远时,两者都不再有显著的正增量贡献(见图 10h、11h),且负增量空间分布的差异不大(见图 10i、11i)。从整个时序来看,空间中波高正增量区域基本和台风中心位置保持一致,负增量区域滞后于台风中心位置,该特性使得集合预报对部分口外站位波高峰值后的下降时段刻画更好(见图 8b, 24~72 h)。对比两种路径概率情形可以看出,范围偏小的概率路径(70%)集合预报波高加权结果的空间布局地差异更大,波高随空间分布的梯度更大。

4 结论

针对近岸区域波高受到很多因素的影响导致的预测难度较大的问题,本文提出了一种新型的台风集合路径的方法。基于历史台风数据和业务中心实时预报数据,采用统计学的方法给出任意实时情况下台风各预测移动方向的概率,使用动态权重生成台风预报路径集合并进行数值预报实验,得出实验结果的概率分布。以长江口及杭州湾附近为研究区域,结合数值模式对台风过境期间近岸区域的有效波高进行后报验证,在验证基础上应用该新型集合路径生成方法进行预报试验,其中在 48~72 h 时段内,近岸区域 H1 浮标集合预报结果的覆盖指数能达到 52% 左右, H2 浮标的覆盖指数能达到 94% 左右。该方法可适用于台风期间风暴潮、台风浪等要素的预报,可为近岸海域的复杂动力要素预报工作提供新的集合预报技术。

参考文献:

- [1] ANTHES R A. Tropical cyclones: their evolution, structure and effects[M]. Boston: American Meteorological Society, 1982.
- [2] HERTERICH J G, DIAS F. Extreme long waves over a varying bathymetry[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019, 878: 481-501.
- [3] CHAWLA A, SPINDLER D M, TOLMAN H L. Validation of a thirty year wave hindcast using the climate forecast system reanalysis winds[J]. *Ocean Modelling*, 2013, 70: 189-206.
- [4] ALVES J H G M, WITTMANN P, SESTAK M, et al. The NCEP-FNMOC combined wave ensemble product: expanding benefits of interagency probabilistic forecasts to the oceanic environment[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2013, 94(12): 1893-1905.
- [5] FAN Y M, PAN S Q, CHEN J M, et al. Ensemble wave forecasting over typhoon period[C]//Proceedings of the 2013 MTS / IEEE OCEANS-Bergen. Bergen: IEEE, 2013.
- [6] PAN S Q, FAN Y M, CHEN J M, et al. Optimization of multi-model ensemble forecasting of typhoon waves[J]. *Water Science and Engineering*, 2016, 9(1): 52-57.
- [7] ZIEGER S, GREENSLADE D, KEPERT J D. Wave ensemble forecast system for tropical cyclones in the Australian region[J]. *Ocean Dynamics*, 2018, 68(4): 603-625.
- [8] TOTH Z, KALNAY E. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1993, 74(12): 2317-2330.
- [9] GOERSS J S. Tropical cyclone track forecasts using an ensemble of dynamical models[J]. *Monthly Weather Review*, 2000, 128(4): 1187-1193.
- [10] 郭文云, 安佰超, 裘诚, 等. 基于多源数据的台风风暴潮概率预报研究: 台风集合的构建[J]. *海洋预报*, 2021, 38(1): 26-33.
GUO W Y, AN B C, QIU C, et al. Probabilistic forecast for typhoon storm surge based on multi-source data: creation of typhoon ensemble[J]. *Marine Forecasts*, 2021, 38(1): 26-33.
- [11] YASUDA T, MASE H, MORI N, et al. Stochastic typhoon model and its application to future typhoon projection[J]. *Coastal Engineering No. OAI*, 2010. DOI:109753/icce.v32. management.16.
- [12] 任剑波. 台风驱动的长江口波浪动力场及其泥沙输运影响研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
REN J B. Wave dynamics and its impact on sediment transport under typhoons in the Changjiang estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2020.
- [13] 丁平兴, 葛建忠. 长江口横沙浅滩及邻近海域灾害性天气分析[J]. *华东师范大学学报(自然科学版)*, 2013(4): 72-78.
DING P X, GE J Z. Analysis of disastrous weather in the Hengsha Shoal and adjacent waters of the Yangtze Estuary[J]. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 2013(4): 72-78.
- [14] GE J Z, YI J X, ZHANG J T, et al. Impact of vegetation on lateral exchanges in a salt marsh-tidal creek system[J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126(8): e2020JF-005856.
- [15] ZHOU F C, GE J Z, LIU D Y, et al. The lagrangian-based floating macroalgal growth and drift model (FMGDM v1.0): application to the Yellow Sea green tide[J]. *Geoscientific Model Development*, 2021, 14(10): 6049-6070.
- [16] REN F M, QIU W Y, DING C C, et al. An objective track similarity index and its preliminary application to predicting precipitation of Landfalling tropical cyclones[J]. *Weather and Forecasting*, 2018, 33(6): 1725-1742.

- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] FUJITA T T. Pressure distribution within typhoon[J]. *Geophysical Magazine*, 1952, 23: 437-451.
- [20] 赵长进. 长江口及其邻近海区无结构网格风暴潮模式的建立与应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- ZHAO C J. Development and analysis of the unstructured numerical model for storm surge in the Changjiang estuary[D]. Shanghai: East China Normal University, 2014.
- [21] 任剑波, 何青, 沈健, 等. 远区台风“三巴”对长江口波浪动力场的作用机制[J]. *海洋科学*, 2020, 44(5): 12-23.
- REN J B, HE Q, SHEN J, et al. The effect mechanism of a remote typhoon "Sanba" on wave dynamics in the Changjiang estuary[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(5): 12-23.

Research on a typhoon wave ensemble forecast method

LIU Anqi¹, LI Cheng², GUO Wenyun³, GE Jianzhong^{1*}

(1. State Key Laboratory of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Marine Environmental Monitoring and Forecasting Center, Shanghai 200062, China; 3. College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In this paper, we propose a new ensemble forecasting method for typhoon waves. By considering real-time typhoon forecasts and historical typhoon track information, this method generates ensemble typhoon track and wind field forecasts, and eventually predicts the significant wave height by using the outputs from Simulating Waves Nearshore (SWAN) and Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM) models. This method is verified through conducting ensemble hindcast experiments, and probability distribution of the predicted significant wave height is derived. The results show that the coverage of the forecasts to observation reaches up to 94% in part of forecast duration. This method is applicable to the near-shore wave element prediction in severe weather systems such as typhoon, and can provide new techniques and ideas for wave forecasting in near-shore waters.

Key words: typhoon wave; ensemble forecast; Simulating Waves Nearshore; Finite-Volume Community Ocean Model