

基于ECMWF细网格风场的台风“烟花”与飓风“艾达” 风暴潮数值预报检验与分析

熊杰¹, 傅赐福¹, 于福江^{1,2}, 董剑希^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081; 2. 自然资源部海洋灾害预报技术研究重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 基于已调试验证的全球风暴潮数值预报模型, 采用 ECMWF 细网格预报风场对 2106 号台风“烟花”和 A12109 号飓风“艾达”开展风暴潮数值预报检验和分析。结果表明: 台风“烟花”48 h 和 24 h 台风预报路径、强度与实测相近, 各潮位站 48 h 和 24 h 预报平均绝对误差分别为 0.49 m 和 0.22 m, 平均相对误差分别为 30.17% 和 12.56%; 飓风“艾达”48 h 和 24 h 台风预报路径较实况偏西, 预报强度低于实测, 各潮位站 48 h 和 24 h 预报平均绝对误差分别为 1.14 m 和 0.49 m, 平均相对误差分别为 61.29% 和 25.17%。分析风暴潮数值预报误差的原因发现: ECMWF 细网格风场对风圈庞大且强度变化较慢的大型台风“烟花”的预报准确度高, 而对短时间强度爆发型飓风“艾达”的预报准确度稍显不足, 导致台风“烟花”风暴潮预报的误差明显小于飓风“艾达”。ECMWF 细网格风场可以成为驱动风暴潮数值预报的有益补充, 建立模型风场与 ECMWF 细网格风场的融合风场将会进一步提升风暴潮预报精度。

关键词: 台风“烟花”; 飓风“艾达”; ECMWF 细网格; 风暴潮; 数值预报

中图分类号: P731.34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)03-0001-09

1 引言

风暴潮是一种来自海上的自然灾害现象, 指由于强烈的大气扰动, 如热带气旋(台风或飓风)、温带气旋、冷锋的强风作用和气压骤变等强烈的天气系统, 引起的海面异常升高的现象^[1-4]。风暴潮灾害对于人口稠密和地势低洼的沿海地区的社会经济有很大的影响^[2]。据统计, 2019 年我国海洋灾害造成的直接经济损失为 117 亿元, 其中风暴潮灾害造成的直接经济损失高达 116 亿元^[3]。因此, 准确预报风暴潮对于沿海地区人民的生命财产安全具有重要意义。

风暴潮预报的准确性与驱动风场高度相关, 高分辨率风场可以极大提高风暴潮的模拟预报准确性^[4]。Dullaart 等^[5]利用不同分辨率的风场进行了

风暴潮模拟, 表明高分辨率的风场可以提高风暴潮模拟的准确性, 减小预报误差。近年来, 随着数值预报技术的发展和计算机性能的不断提高, 全球尺度的高分辨率数值预报产品取得了一定的成果。欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的大气模式高分辨率 10 d 预报产品(简称 ECMWF 细网格)是目前时空分辨率最高的全球气象数值预报资料之一, 它提供全球 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 空间分辨率和 1 h 时间分辨率的气象场。目前, 已有学者对 ECMWF 细网格数值预报资料中的降水和海面风等气象要素进行了评估和分析。例如, 连喜虎等^[6-7]对中国海域 10 m 风场的预报能力进行了检验与分析, 结果表明 ECMWF 细网格对大于 5 级风的预报结果偏小, 但整体的预报偏差离散度小, 预报效果较好。季晓东

收稿日期: 2021-09-23; 修回日期: 2021-11-14。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1402005、2018YFC1407004)。

作者简介: 熊杰(1996-), 男, 硕士在读, 从事风暴潮数值模拟及研究。E-mail: xiongjie_1996@163.com

通讯作者: 傅赐福(1983-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事风暴潮预警及研究。E-mail: fucf@nmefc.cn

等^[8-9]对 ECMWF 细网格模式的降雨预报进行了检验,评估分析了 ECMWF 细网格模式在长三角地区的暴雨预报性能。然而,针对 ECMWF 细网格风场进行风暴潮预报能力的检验和评估工作尚不多见。

本文利用已调试验证后的全球风暴潮数值模型,选取了 2021 年第 6 号台风“烟花”和 2021 年大西洋第 9 号飓风“艾达”为研究个例,将 ECMWF 细网格风场用于风暴潮 48 h 和 24 h 数值预报检验,评估分析 ECMWF 细网格风场在风暴潮数值预报中的适用性,为今后进一步开展全球风暴潮预报服务提供有价值的参考。

2 全球风暴潮数值预报模型的建立

2.1 模型控制方程及参数设置

为了满足风暴潮模拟的精度和计算速度,本文选取了基于非结构三角形网格的 ADCIRC (The ADvanced CIRCulation model) 作为数值模型进行风暴潮模拟。ADCIRC 模型是由 Luettich 和 Westerink 教授基于有限元方法研制的水动力模型,广泛应用于海洋、海岸和河口等复杂地形的海流、潮汐和风暴潮模拟^[10]。ADCIRC 模型采用广义波动连续方程与动量方程结合,利用 Galerkin 有限元方法求解方程,提高了运行求解的稳定性和计算速度。在球坐标系下的连续方程和运动方程可表示为:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial UH}{\partial \lambda} + \frac{1}{R} \frac{\partial VH}{\partial \phi} - \frac{VH \tan \phi}{R} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial U}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial U}{\partial \phi} - \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) V = \\ - \frac{1}{R \cos \phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\lambda} - \tau_{b\lambda}}{\rho_0 H} + D_\lambda \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{R \cos \phi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} + \frac{V}{R} \frac{\partial V}{\partial \phi} + \left(\frac{U \tan \phi}{R} + f \right) U = \\ - \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \phi} \left[\frac{P_s}{\rho_0} + g(\zeta - \eta) \right] + \frac{\tau_{s\phi} - \tau_{b\phi}}{\rho_0 H} + D_\phi \end{aligned} \quad (3)$$

式中, λ 和 ϕ 分别代表经度和纬度; H 表示海水水柱的总深度, $H = \zeta + h$, ζ 表示从平均海平面算起自由

表面高度, h 表示平均海平面高度; R 为地球半径; f 为科氏力参数,取 $f = 2\Omega \sin(\phi)$; ρ_0 表示海水密度,取 1025 kg/m^3 ; g 为重力加速度; P_s 为自由海表面大气压; η 表示牛顿引潮势; $\tau_{s\lambda}$ 和 $\tau_{s\phi}$ 分别为海表面应力在经向和纬向上的分量, $\tau_{b\lambda}$ 和 $\tau_{b\phi}$ 分别为海底摩擦力在经向和纬向上的分量; D_λ 和 D_ϕ 为动量方程的水平扩散项。初始条件为 $\zeta = u = v = 0$,对于大陆和岛屿边界条件采用法向速度为 0,东、西边界采用周期边界。空间差分方法采用有限元离散法,时间离散采用隐式有限差分法,时间步长选择 10 s。底摩擦项采用二次率方案,即底摩擦与深度平均流速二次平方关系, $C_{f\text{min}}$ 取值 0.001 6;最小水深设置为 $H_0 = 5 \text{ m}$;采用二维模型,不考虑潮汐,时间权重参数设置为 0.35,0.30,0.35。模式采用冷启动方式,但考虑到风暴潮的初期振荡,将预报前 24 h 的风场也拼接进行计算。

2.2 计算区域网格及数据来源

为评估 ECMWF 细网格预报风场在西北太平洋、墨西哥湾以及其他沿岸的风暴潮模拟情况,本文设计的网格计算区域为 $90^\circ \text{N} \sim 78^\circ \text{S}$, $180^\circ \text{W} \sim 180^\circ \text{E}$ 。该套非结构三角网格共计 430 140 个三角形网格,242 095 个网格点(见图 1),对于海岸线和地形较为复杂的地区网格加密处理,沿岸最小分辨率约为 5 km,大洋中心约为 50 km。该套网格所用岸线数据为全球高分辨率海岸线数据集(a Global Self-consistent, Hierarchical, High-resolution Geography database, GSHHG),所用水深数据为世界大洋深度图(GENERAL Bathymetric Chart of the Oceans, GEBCO) 2020 最新全球水深地形数据,最小分辨率为 30" (约 1 km),降尺度后插值到网格。

本文所使用的中国近海台风强度及路径数据来自中国台风网,美国近海台风强度及路径数据来源于美国飓风中心(National Hurricane Center, NHC)和美国中太平洋飓风中心(Central Pacific Hurricane Center, CPHC),ECMWF 细网格预报风场以及中国近岸潮位数据来自国家海洋环境预报中心,本实验所采用风场资料的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间分辨率为 3 h,美国近岸潮位数据来源于美国国家海洋和大气管理局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)。

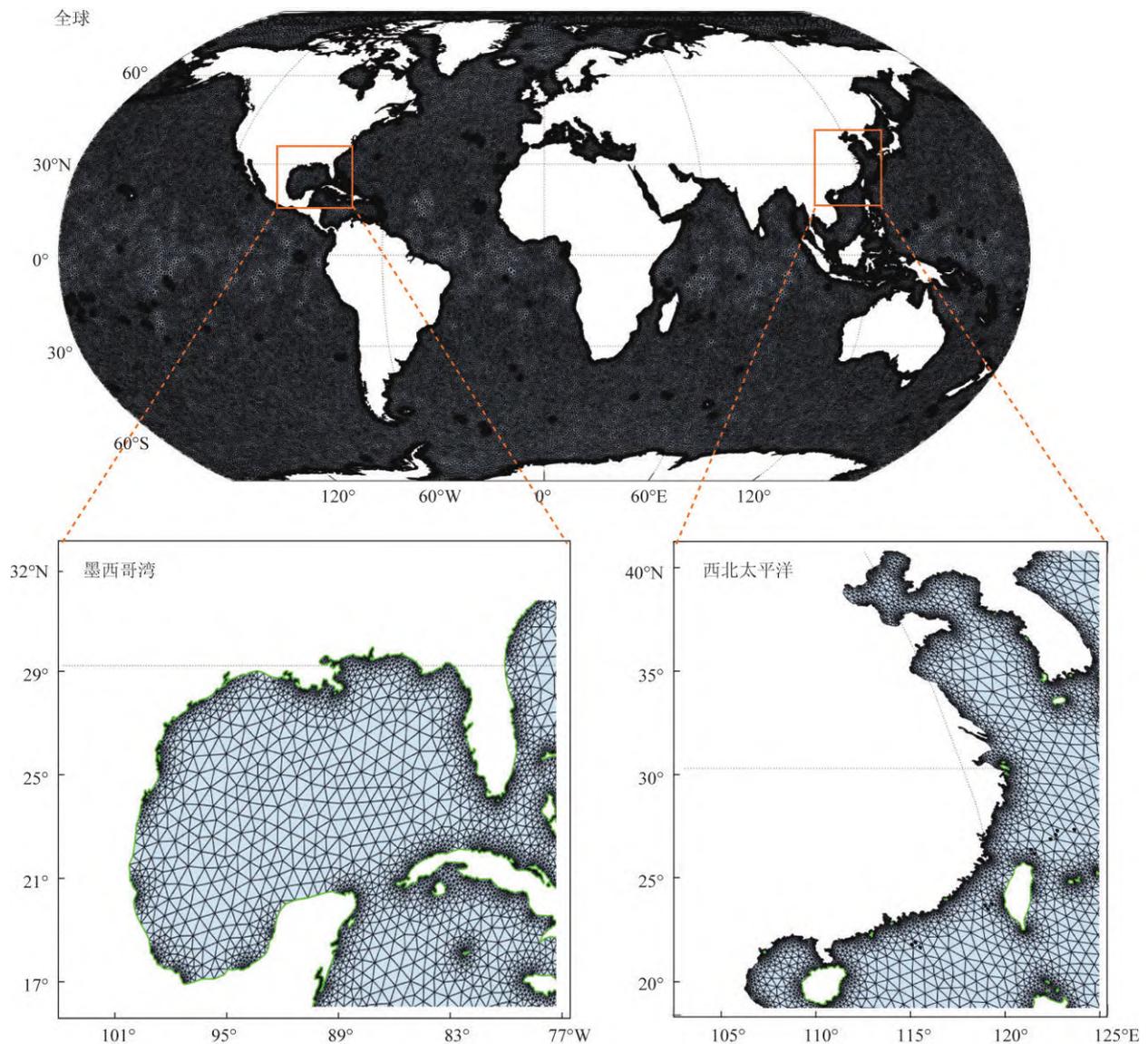


图1 风暴潮模式计算区域网格划分

Fig.1 Computational mesh of storm surge domain

3 风暴潮的数值预报检验与分析

3.1 台风“烟花”的风暴潮数值预报检验

2021年第6号台风“烟花”(强台风级)于2021年7月17日(世界时,下同)在太平洋西北洋面生成,此后向西移动并不断加强,21日升级为强台风,22日转为北偏西移动,强度缓慢减弱,25日在浙江省舟山普陀区沿海登陆,登陆时中心最低气压965 hPa,中心附近最大风速38 m/s,26日在浙江

省嘉兴沿海再次登陆,登陆强度为强热带风暴。台风“烟花”风圈庞大、强度强且移动缓慢,受其影响,浙江中北部—长江口沿海出现了1.1~2.7 m的最大风暴增水。浙江、上海和江苏南部多个潮位站超过警戒潮位,其中,杭州湾和长江口为影响严重岸段,镇海、定海、芦潮港和金山嘴潮位站均观测到超过当地红色警戒的潮位,镇海潮位站更是观测到破历史记录的潮位,部分岸段出现海水倒灌。

本文选取了受台风“烟花”影响显著的黄埔公园、澈浦、北仑、石浦、镇海和芦潮港6个潮位站开展

预报检验,将登陆前48 h和24 h风暴潮预报结果与实测值进行对比(见图2和表1)。台风“烟花”于7月25日中午前后登陆,考虑到ECMWF细网格数据传输的延时和预报频次,48 h预报选取7月23日12时—26日12时,24 h预报选取7月24日12时—27日12时。为保证临近预报的准确性,对48 h和24 h预报均拼接了前一日气压场和风场,以充分模拟前期的振荡增水。

从图2和表1可以看出,各潮位站48 h和24 h预报平均绝对误差分别为0.49 m和0.22 m,平均相对误差分别为30.17%和12.56%;单站预报的最大绝对误差0.83 m、最小绝对误差为0.06 m,分别为

48 h镇海站和24 h石浦站。从时间序列来看,各潮位站48 h和24 h预报的风暴增水趋势均与实测基本一致,预报峰值时间与观测峰值时间吻合较好;从最大增水预报误差来看,24 h预报相对48 h预报更好,48 h预报相比实测整体偏大,24 h预报与实测更为接近。结果表明,ECMWF细网格风场对台风“烟花”过程的最大增水时间和最大增水高度预报均较好。

3.2 飓风“艾达”的风暴潮数值预报检验

大西洋第9号飓风“艾达”是2021年登陆美国的第四个飓风,8月24日生成于大西洋洋面,27日

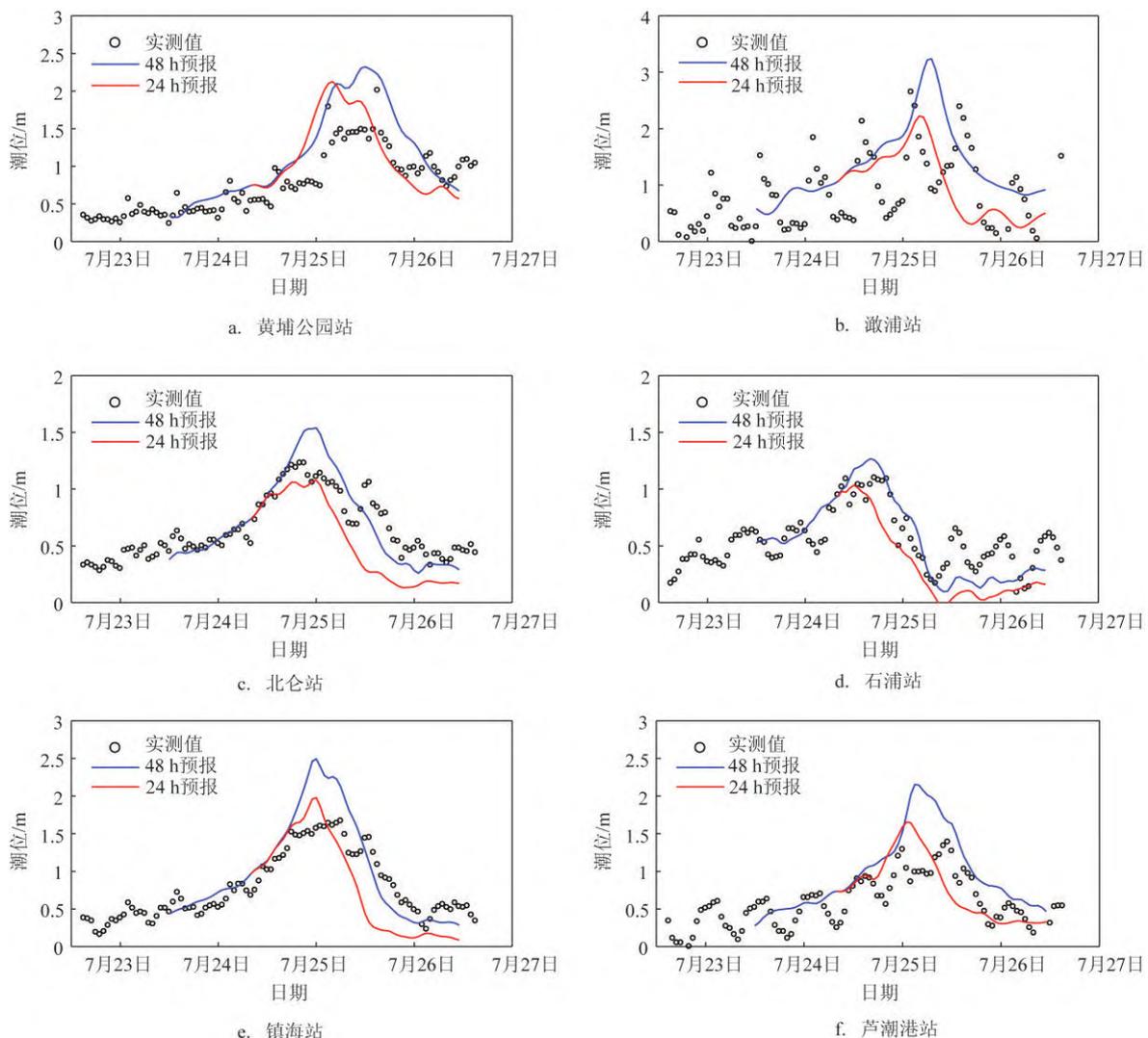


图2 2106号台风“烟花”期间各潮位站风暴潮预报值与实测值对比

Fig.2 Comparisons of storm surge heights between the simulations and observed data at each tidal station during typhoon "In-Fa" (2106)

加强为飓风,登陆前在近海快速加强,29日,飓风“艾达”登陆美国南部墨西哥湾沿岸的路易斯安那州,最大风速达到了66.9 m/s,最低气压为929 hPa。此次飓风强度强、风速大且发展迅速。飓风“艾达”的强风引发风暴潮灾害,造成大面积淹水,密西西比河口附近的风暴潮超过2 m。9月2日飓风“艾达”的影响逐渐结束,但据美国广播公司报道,飓风“艾达”导致63人死亡^[11]。飓风登陆沿岸大面积土地被淹,地铁和电网等城市基础设施建设被破坏,造成了巨大的经济损失和人员伤亡。

选取飓风“艾达”登陆附近的4个潮位站开展预报检验,同台风“烟花”预报检验方法一致,将登陆前48 h和24 h风暴潮预报结果与实测值进行对比。飓风“艾达”于8月29日登陆,48 h预报选取8月27日12时—30日12时,24 h预报选取8月28日12时—31日12时。同样,为保证临近预报的准确性和充分模拟前期的震荡增水,均采用拼接前一日气压场和风场方式。

从图3和表2可以看出,各潮位站48 h和24 h预报平均绝对误差分别为1.14 m和0.49 m,平均相

表1 2106号台风“烟花”期间各站最大增水预报误差统计

Tab.1 Prediction error statistics of maximum surge height at each tidal station during typhoon "In-Fa" (2106)

站点	48 h预报绝对误差/m	24 h预报绝对误差/m	48 h预报相对误差/%	24 h预报相对误差/%
黄埔公园站	0.30	0.11	14.85	5.45
激浦站	0.59	0.42	22.26	15.85
北仑站	0.31	0.15	25.20	12.20
石浦站	0.17	0.06	15.45	5.45
镇海站	0.83	0.31	49.70	18.56
芦潮港站	0.75	0.25	53.57	17.86
平均误差	0.49	0.22	30.17	12.56

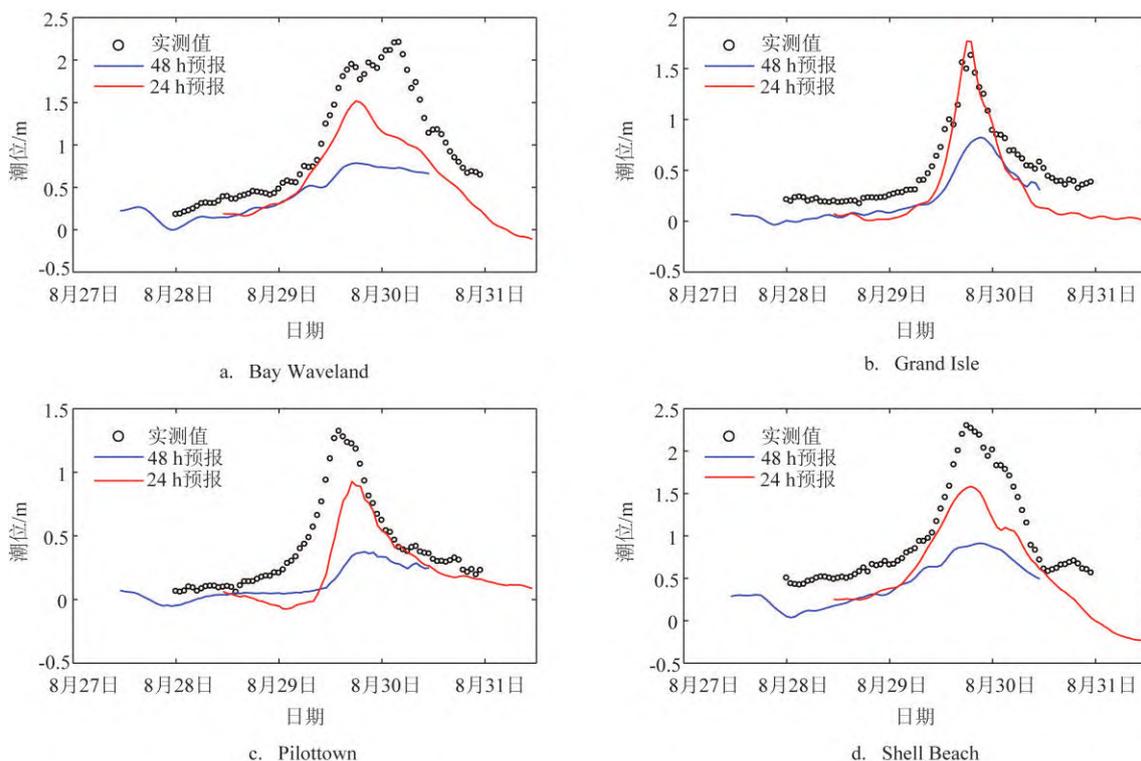


图3 AI2109号飓风“艾达”期间各潮位站风暴潮预报值与实测值对比

Fig.3 Comparisons of storm surge heights between the simulations and observed data at each tidal station during hurricane "Ida" (AI2109)

对误差分别为 61.29 和 25.17;从增水趋势来看,风暴潮峰值出现时间与观测较为一致,但从最大增水来看,除 24 h 预报的 Grand Isle 站最大增水与观测值较为接近外,其余站预报值均与观测值差异较大,48 h 预报和 24 h 预报均显著低于实测,尤其是 48 h 预报。整体分析表明,ECMWF 细网格对此次过程的风暴潮峰值出现时间预报比较准确,但最大增水预报明显偏低,尤其是 48 h 预报。

3.3 两次风暴潮过程的数值预报分析

为了分析两次风暴潮过程中的数值预报误差,提取了两次台风过程的实测中心气压和台风路径,将其分别与 ECMWF 细网格 48 h 和 24 h 的预报气压和预报路径进行对比。

首先对比两个台风的中心最低气压(见图 4)。风圈庞大的台风“烟花”于 7 月 18 日开始不断加强,21—24 日维持强台风级别,中心最低气压为 955 hPa,之后缓慢减弱直至登陆。从图 4a 可以看出,ECMWF 细

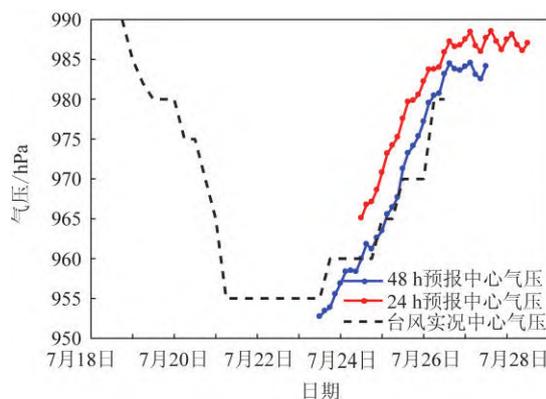
网格 48 h 和 24 h 预报气压与实测十分接近,48 h 预报和实测的吻合度更高,说明 ECMWF 细网格对台风“烟花”强度的预报准确度很高。而对于爆发型飓风“艾达”而言,从 8 月 27 日开始,2 d 内强度迅速加强,中心气压骤降近 60 hPa,达到 929 hPa,随着飓风“艾达”登陆,强度快速减弱,整个过程在 2~3 d 的时间内强度变化非常迅速。从图 4b 可以看出,登陆前,ECMWF 细网格 48 h 和 24 h 预报的中心气压都高于实测,48 h 预报值则比 24 h 预报更接近实测,说明 ECMWF 细网格对飓风“艾达”强度的预报显著偏弱。

再对比两个台风的路径(见图 5)和过程最大增水(见图 6)。图 5 可以看出,ECMWF 细网格对台风“烟花”48 h 和 24 h 的预报路径与实况路径非常接近,24 h 的预报路径更为准确,几乎和实测重叠,48 h 的预报路径偏南,更有利于杭州湾沿岸的风暴增水。从图 6a 和 6b 的过程最大增水分布和位于杭州湾岸段的芦潮港、澈浦、镇海和北仑站的预报误差

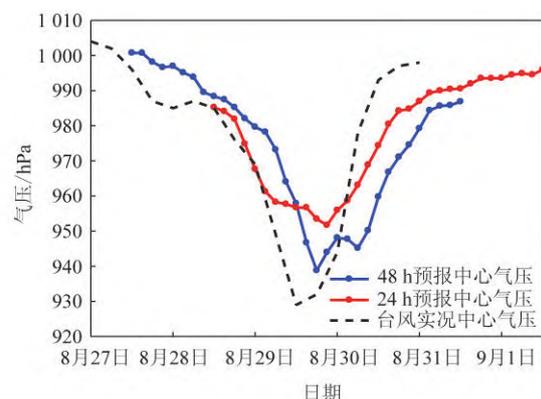
表 2 AI2109 号飓风“艾达”期间各站最大增水预报误差统计

Tab.2 Prediction error statistics of maximum surge height at each tidal station during hurricane "Ida" (AI2109)

站点	48 h 预报绝对误差/m	24 h 预报绝对误差/m	48 h 预报相对误差/%	24 h 预报相对误差/%
Bay Waveland	1.41	0.69	63.80	31.22
Grand Isle	0.81	0.14	49.69	8.59
Pilottown	0.94	0.39	71.21	29.55
Shell Beach	1.39	0.72	60.43	31.30
平均误差	1.14	0.49	61.29	25.17



a. 台风“烟花”中心气压



b. 飓风“艾达”中心气压

图 4 两次台风过程中实况气压与预报气压对比

Fig.4 Comparison of real pressure and forecast pressure during two typhoons

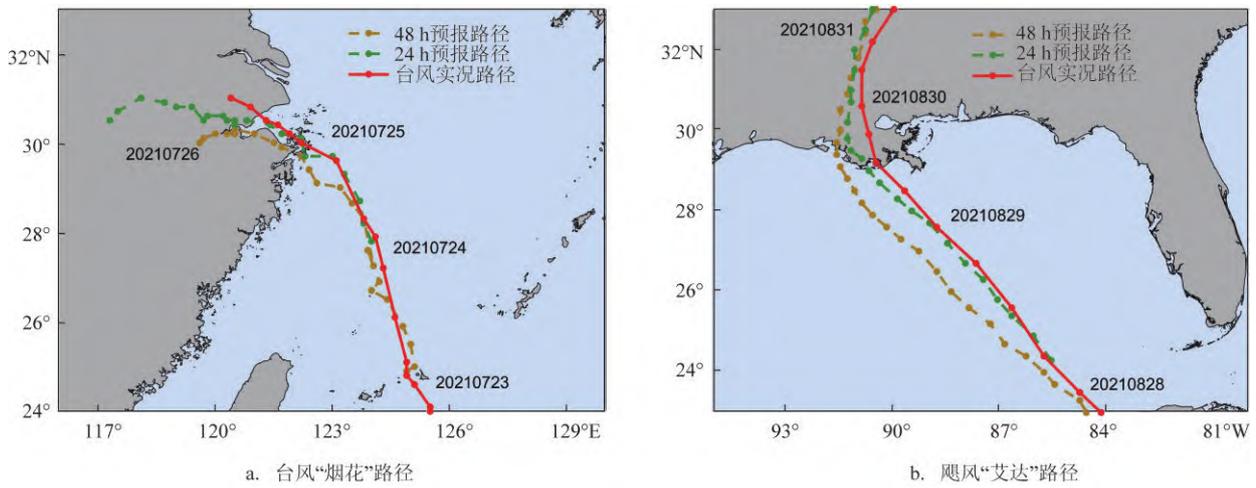


图5 两次台风过程中实况路径与48 h和24 h预报路径对比
 Fig.5 Comparison between the real trajectory and the 48 h and 24 h forecast trajectories during two typhoons

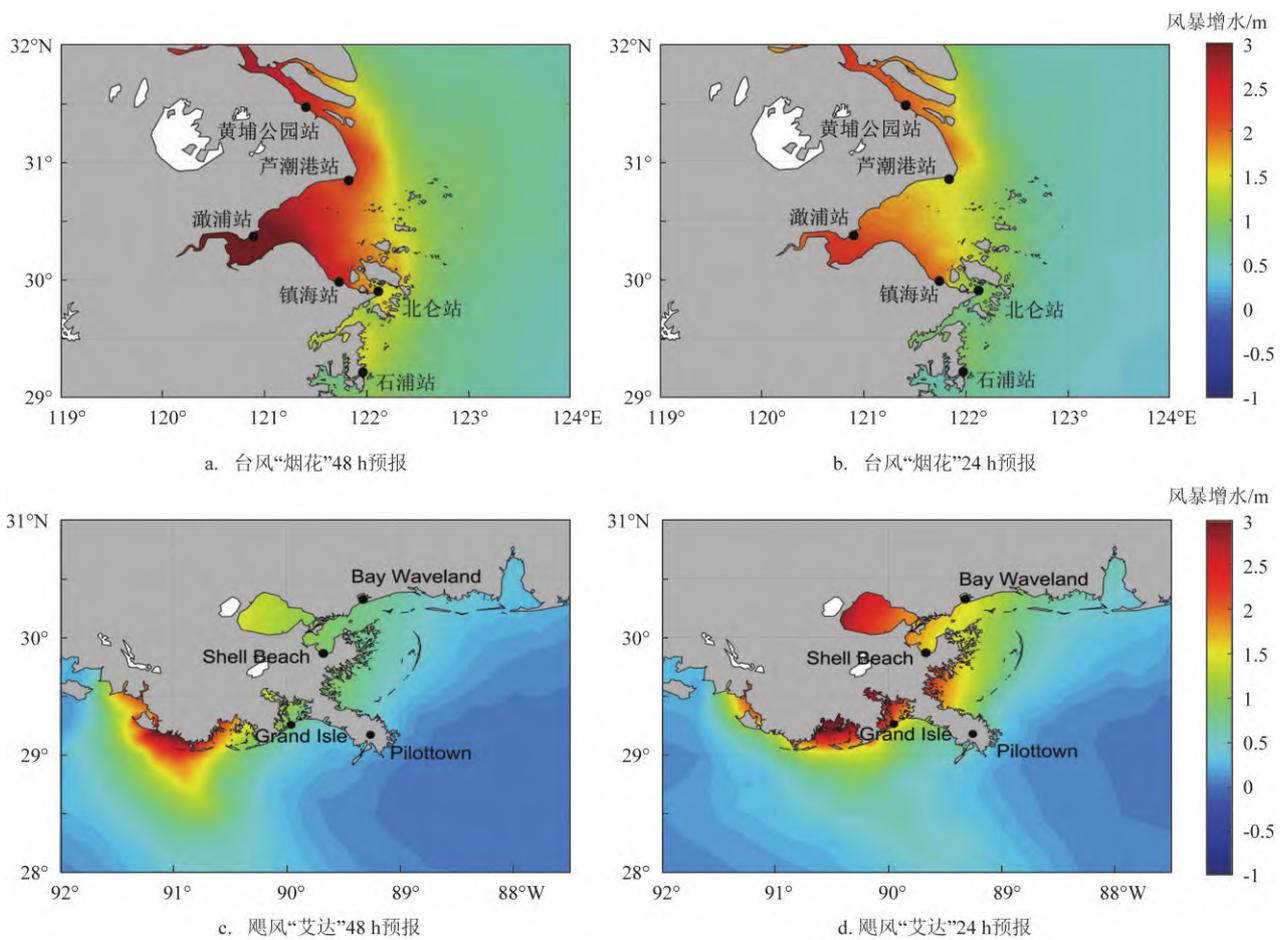


图6 两次台风过程中预报最大增水场分布与对比
 Fig.6 The distribution and comparison of the predicted maximum surge heights during two typhoons

也可以看出,48 h的风暴潮数值预报最大增水明显大于24 h的风暴潮数值预报。ECMWF细网格对飓

风“艾达”48 h预报路径误差较大,预报路径偏西,24 h预报路径更接近实测路径,从图6c和6d的过程

最大增水分布和位于飓风“艾达”登陆点右侧潮位站的预报误差也可以看出48 h预报的最大增水分布产生明显偏差,位于Grand Isle站以西沿岸各代表站的风暴增水预报较实测显著偏低;24 h预报路径与实况路径更接近,24 h预报的最大增水分布位于Grand Isle站以东的新奥尔良沿岸,相应的各代表站的风暴增水预报误差有所减小。虽然24 h预报路径与实测更接近,但强度预报较实况偏低,24 h预报的风暴增水仍普遍小于实测。此外,风暴潮预报对风场分辨率也较为敏感^[12],针对最大风圈半径小于25 km的飓风“艾达”,ECMWF细网格仍不能刻画此类超强飓风的气压梯度和风场变化,这也是导致风暴潮预报被低估的重要原因之一。

综合上述可以看出,ECMWF细网格风场对风圈庞大和强度变化较慢的大型台风“烟花”的预报准确度高;对于移动发展较快的不稳定气旋,ECMWF预报效果通常较差^[13],因此对短时间强度爆发型飓风“艾达”的预报准确度稍显不足^[14]。这个结论反映到风暴潮数值预报中会导致明显的误差区别,文中台风“烟花”风暴潮预报的误差明显小于飓风“艾达”,充分证明了这个观点。

4 结论

本文基于ADCIRC建立了一个适用于全球风暴潮数值预报模型,以2021年台风“烟花”和飓风“艾达”为研究个例,采用ECMWF细网格风场进行了风暴潮的数值预报检验与分析。结论如下:

(1) ECMWF细网格风场对于不同类型的台风预报存在较大差异从而导致了风暴潮数值预报的差异。ECMWF细网格风场对风圈庞大且强度变化较慢的大型台风“烟花”的预报准确度高,而对短时间强度爆发型飓风“艾达”的预报准确度稍显不足,这也导致台风“烟花”风暴潮预报的误差明显小于飓风“艾达”。飓风“艾达”在登陆前强度突然急剧加强,ECMWF细网格预报偏弱是导致飓风“艾达”风暴潮预报出现误差的重要原因。

(2) ECMWF细网格风场可以成为驱动风暴潮数值预报的有益补充,从台风“烟花”的数值预报误差来看,各潮位站48 h和24 h预报平均绝对误差分别为0.49 m和0.22 m,平均相对误差分别为30.17

和12.56;从台风“艾达”的数值预报误差来看,各潮位站48 h和24 h预报平均绝对误差分别为1.14 m和0.49 m,平均相对误差分别为61.29和25.17,相对而言24 h风暴潮预报准确性更高。

(3) 在ECMWF细网格风场的基础上发展融合风场可以进一步提高风暴潮数值预报准确性。对于强度快速爆发型台风而言,Holland等模型风场拥有刻画台风中心及附近风力的优势,开展模型风场与ECMWF细网格风场的融合风场将会进一步提升风暴潮预报精度,笔者也会在下一步的工作中开展此类研究,考察融合风场对风暴潮的改进程度。

参考文献:

- [1] 冯士筭. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 1-10.
Feng S Z. Introduction to storm surge[M]. Beijing: Science Press, 1982: 1-10.
- [2] 傅赐福, 于福江, 王培涛, 等. 滨海新区温带风暴潮灾害风险评估研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 55-62.
Fu C F, Yu F J, Wang P T, et al. A study on extratropical storm surge disaster risk assessment at Binhai New Area[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2013, 35(1): 55-62.
- [3] 自然资源部. 2019年中国海洋灾害公报[EB/OL]. (2020-04-30). http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510979.html.
Ministry of Natural Resources, People's Republic of China. China Bulletin on Marine Disasters 2019[EB/OL]. (2020-04-30). http://gi.mnr.gov.cn/202004/t20200430_2510979.html.
- [4] 于福江, 傅赐福, 郭洪琳, 等. 现代风暴潮预报技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 130-134.
Yu F J, Fu C F, Guo H L, et al. Modern technologies and application in storm surge forecasting[M]. Beijing: Science Press, 2020: 130-134.
- [5] Dullaart J C M, Muis S, Bloemendaal N, et al. Advancing global storm surge modelling using the new ERA5 climate reanalysis[J]. Climate Dynamics, 2020, 54(1-2): 1007-1021.
- [6] 连喜虎, 刘桂艳, 高松, 等. EC细网格10m风场产品在渤、黄海海域的预报能力检验与评估[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 74-82.
Lian X H, Liu G Y, Gao S, et al. Evaluation of the ECMWF forecast skills for the 10 m wind field in the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(6): 74-82.
- [7] 吴俞, 冯文, 李勋, 等. ECMWF细网格10m风场产品在南海海域的预报检验[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(9): 204-212.
Wu Y, Feng W, Li X, et al. On forecast test of ECMWF 10m wind field products in South China Sea[J]. Journal of Southwest China Normal University (Natural Science Edition), 2015, 40(9): 204-212.

- [8] 季晓东, 漆梁波. ECMWF模式降水预报与极端天气预报指数在暴雨预报中的评估与应用[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(6): 566-573.
Ji X D, Qi L B. Evaluation and application of ECMWF model precipitation and extreme weather forecast index of precipitation on heavy rainfall forecast[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2018, 37(6): 566-573.
- [9] 李俊乐, 姚晔, 吕志红, 等. ECMWF细网格模式降水产品在抚顺弱降水中的应用检验[J]. 农业灾害研究, 2020, 10(3): 154-155.
Li J L, Yao Y, Lyu Z H, et al. Application and inspection of ECMWF fine-mesh model precipitation products in Fushun light precipitation[J]. *Journal of Agricultural Catastrophology*, 2020, 10(3): 154-155.
- [10] 张露, 傅赐福, 董剑希, 等. 台风“妮妲”风暴潮与近岸浪的数值模拟与预报[J]. 海洋预报, 2018, 35(2): 27-35.
Zhang L, Fu C F, Dong J X, et al. Numerical simulation and forecasting on storm surge and offshore wave of typhoon "Nida" [J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(2): 27-35.
- [11] 丁以山, 必应. “致命”风暴[J]. 国企管理, 2021, 76(19):14-15.
Ding Y S, Bi Y. "Deadly" storm[J]. *China state-owned enterprises management*, 2021, 76(19):14-15.
- [12] Bloemendaal N, Muis S, Haarsma R J, et al. Global modeling of tropical cyclone storm surges using high-resolution forecasts[J]. *Climate Dynamics*, 2019, 52(7-8): 5031-5044.
- [13] 杨国杰, 沙天阳, 程正泉. 2009-2015年ECMWF热带气旋集合预报的检验及分析[J]. 气象, 2018, 44(2): 277-283.
Yang G J, Sha T Y, Cheng Z Q. Verification and analysis on tropical cyclone ensemble forecast of European Centre for medium-range weather forecasts from 2009 to 2015[J]. *Meteorological Monthly*, 2018, 44(2): 277-283.
- [14] 卢美, 严俊. 浙江沿岸“0216”号台风风暴潮特征及预报经验总结[J]. 海洋预报, 2003, 20(2): 15-23.
Lu M, Yan J. The characteristics and forecast experience of typhoon "0216" storm surge in Zhejiang Coast[J]. *Marine Forecasts*, 2003, 20(2): 15-23.

Verification and analysis of numerical forecast of typhoon "In-Fa" and hurricane "Ida" storm surge based on ECMWF fine grid wind field

XIONG Jie¹, FU Cifu¹, YU Fujiang^{1,2}, DONG Jianxi^{1,2}

(1. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China; 2. Key Laboratory of Research on Marine Hazards Forecasting of MNR, Beijing 100081 China)

Abstract: Based on the validated global storm surge numerical forecasting model, the ECMWF fine grid wind field is used to carry out storm surge numerical forecast verification and analysis for typhoon "In-Fa" (2106) and hurricane "Ida" (A12109). The results show that the track and intensity of the 48 h and 24 h forecast of typhoon "In-Fa" are close to observations. Compared to the observations at each tide gauges, the average absolute errors of 48 h and 24 h forecast are 0.49 m and 0.22 m, and the average relative errors are 30.17% and 12.56%, respectively. For the 48 h and 24 h forecast of Hurricane Ida, the track shows a location bias to the west and the intensity is weaker compared to observations. Compared to the observations at each tide gauges, the average absolute errors of 48 h and 24 h forecast are 1.14 m and 0.49 m, and the average relative errors are 61.29% and 25.17%, respectively. By analyzing the reasons for the storm surge numerical forecast errors, it is found that the ECMWF fine grid wind field has high accuracy in forecasting the large-scale typhoon "In-Fa" with huge wind circles and slow intensity changes. However, the forecast accuracy for hurricane "Ida" that occurs within a short period of time with strong intensity is slightly insufficient, which led to the forecast error of storm surge caused by "In-Fa" is significantly less than that caused by hurricane "Ida". The ECMWF fine grid wind field can be a useful supplement for the storm surge numerical forecast, and the hybrid wind field of the model wind field and the ECMWF fine grid wind field will further improve the accuracy of the storm surge forecast.

Key words: typhoon "In-Fa"; hurricane "Ida"; ECMWF fine grid; storm surge; numerical forecast