

## 不同尺度初始误差对2021年台风烟花路径和强度模拟预报的影响

周非凡 叶一苇 张晗 杨雅雯 段晚锁

### The Impacts of Different Scale Initial Errors on the Track and Intensity Simulated Forecasts of Typhoon In-fa in 2021

ZHOU Feifan YE Yiwei ZHANG Han YANG Yawen DUAN Wansuo

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24023>

#### 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

##### 台风路径数值预报实时订正技术及其集成应用

Real-Time Correction Method for Numerically Modeled Typhoon Tracks and Its Integrated Application

大气科学. 2021, 45(1): 195 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2010.19237>

##### 近海台风对“21·7”河南极端暴雨过程水汽通量和动、热力条件影响的模拟

A Numerical Simulation on the Impacts of the Offshore Typhoons on Water Vapor Flux, Dynamic and Thermal Conditions of the Extreme Rainstorm Event in Henan Province in July 2021

大气科学. 2022, 46(6): 1577 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2204.21255>

##### 台风强度模拟的海温目标观测研究

Target Observation of Sea Surface Temperature for Tropical Cyclone Intensity Simulation

大气科学. 2022, 46(1): 83 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2103.20256>

##### GRAPES对流尺度集合预报模式中不同尺度初始扰动能量的演变特征

Evolution Characteristics of Initial Perturbation Energy at Different Scales in Convection-Permitting Ensemble Prediction of GRAPES

大气科学. 2023, 47(5): 1541 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2202.21242>

##### 边界层参数化方案对“莫兰蒂”台风(1614)登陆阶段影响的数值模拟研究

Numerical Investigation of the Effects of Boundary Layer Parameterization Schemes on Typhoon Meranti (1614) Landing Process

大气科学. 2020, 44(5): 935 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2004.19135>

##### 2021年“7·20”郑州暴雨极端雨强对流尺度集合预报试验

Convective-Scale Ensemble Forecast Experiment of Extreme Rainfall Intensity for “7·20” Severe Torrential Rain in Zhengzhou, 2021

大气科学. 2024, 48(6): 2389 <https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.2304.22222>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



周非凡, 叶一苇, 张晗, 等. 2025. 不同尺度初始误差对 2021 年台风烟花路径和强度模拟预报的影响 [J]. 大气科学, 49(2): 550–564. ZHOU Feifan, YE Yiwei, ZHANG Han, et al. 2025. The Impacts of Different Scale Initial Errors on the Track and Intensity Simulated Forecasts of Typhoon In-fa in 2021 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 49(2): 550–564. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24023

## 不同尺度初始误差对 2021 年台风烟花 路径和强度模拟预报的影响

周非凡<sup>1,2,3</sup> 叶一苇<sup>1,3</sup> 张晗<sup>4,5</sup> 杨雅雯<sup>3,6</sup> 段晚锁<sup>3,6</sup>

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院大学, 北京 100049

4 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室, 郑州 450003

5 河南省气象台, 郑州 450003

6 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟和应用全国重点实验室, 北京 100029

**摘要** 本文以 2021 年台风烟花为例, 考察了不同尺度初始误差对台风路径和强度预报的影响。分别由 NCEP 提供的 FNL 再分析资料和由 ECMWF 提供的 ERA5 资料驱动 WRF 模式, 对烟花进行长时间 (14 d)、高分辨率 (3 km) 的模拟, 产生对照试验 CTL\_F 和 CTL\_E。对比分析 CTL\_F 和 CTL\_E 的模拟结果, 并与最佳路径进行比较, 将与最佳路径较为接近的模拟结果作为真值, 将另一模拟结果作为有误差的预报。将二者的初始场作差, 并进行尺度分解, 以 200 km, 2000 km 为界限, 分解成小尺度、中尺度和大尺度 3 种误差, 分别将这 3 种尺度的误差叠加到真值的初始场上, 再分别进行模拟预报, 考察不同尺度的误差对台风烟花模拟预报的影响程度, 并分析各种尺度误差对预报误差的相对贡献。结果表明, 不论是强度预报, 还是路径预报, 在前 10 d 的预报中, 中尺度误差起到了决定性作用。而在后 4 d 的预报中, 大尺度和小尺度误差的贡献逐渐凸显, 三种尺度误差的效果相当。此外, 中尺度误差在前期使得台风路径偏东, 强度偏强, 而大尺度和小尺度误差使得台风路径偏西, 强度偏弱。分析原因显示, 初始时刻总误差场的信息主要体现在中尺度误差上, 因此中尺度误差在前期的作用最为显著。中尺度误差略微加快了台风增强的速度, 显著放缓了台风衰减的速度, 而大尺度和小尺度误差略微放缓了台风增强的速度, 而明显加快了台风衰减的速度。此外, 叠加中尺度误差场后台风具有更强的初始强度, 偏东的路径又使得其登陆时间较晚, 综上, 中尺度误差使得台风强度偏强。而大尺度和小尺度误差由于使得台风路径偏西, 较早登陆, 因此使得台风强度总体偏弱。

**关键词** 尺度分解 初始误差 台风路径 台风强度 数值模拟

文章编号 1006-9895(2025)02-0550-15

中图分类号 P457

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24023

## The Impacts of Different Scale Initial Errors on the Track and Intensity Simulated Forecasts of Typhoon In-fa in 2021

ZHOU Feifan<sup>1,2,3</sup>, YE Yiwei<sup>1,3</sup>, ZHANG Han<sup>4,5</sup>, YANG Yawen<sup>3,6</sup>, and DUAN Wansuo<sup>3,6</sup>

收稿日期 2024-03-11; 网络预出版日期 2024-06-24

作者简介 周非凡, 女, 研究员, 主要从事台风、暴雨的目标观测和可预报性研究。E-mail: zhouff04@163.com

通讯作者 张晗, 女, 博士研究生, 主要从事台风的集合预报和可预报性研究。E-mail: 1121643877@qq.com

资助项目 国家自然科学基金项目 42175079, 中国科学院国际伙伴计划项目 060GJHZ2022061MI, 国家重点研发计划项目 2017YFC1501601

**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 42175079), International Partnership Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant 060GJHZ2022061MI), National Key Research and Development Program of China (Grant 2017YFC1501601)

1 Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms (LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Henan Key Laboratory of Agrometeorological Support and Applied Technique, China Meteorological Administration, Zhengzhou 450003

5 Henan Meteorological Observatory, Zhengzhou 450003

6 State Key Laboratory of Earth System Numerical Modeling and Application, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** This study examines the typhoon In-fa in 2021 to investigate the impact of initial errors at different scales on the forecast of tropical cyclone track and intensity. The WRF model was driven separately by the FNL (Final Reanalysis Data) from NCEP and the ERA5 (the fifth major global reanalysis data) from ECMWF to conduct long-term (14 days) and high-resolution (3 km) simulations of typhoon In-Fa. These two simulations generated the control experiments CTL\_F and CTL\_E, respectively. The simulation results of experiments CTL\_F and CTL\_E were then compared against the best track, with the one closer to the best track regarded as the true value and the other as the forecast with errors. The differences of the initial fields of CTL\_F and CTL\_E was decomposed into small scale (< 200 km), mesoscale (200~2000 km), and large scale (>2000 km) field. By superimposing these errors with three scales onto the true initial field and comparing the following simulations, the study examines the impact of errors at different scales on the simulated forecast of tropical cyclones, and analyzes the relative contributions of each scale of error to the forecasts. The results indicate that mesoscale errors have the decisive impact on forecasts during the first 10 days, both in terms of track and intensity. Over the subsequent 4 days, the contributions from large-scale and small-scale errors became more significant, with the effects of the three scale errors becoming comparable. In addition, mesoscale errors in the early stage shifted the typhoon track eastward and intensified its strength, while large and small-scale errors caused the typhoon track to shift westward and weakened the typhoon. Analysis reveals that the majority of error information is reflected in mesoscale error, making its role particularly significant in the early stages. Mesoscale errors slightly accelerate the speed of typhoon intensification and significantly slow down the speed of typhoon attenuation, while large-scale and small-scale errors slightly slow down the speed of typhoon intensification and significantly accelerate the speed of typhoon attenuation. Furthermore, the superimposed mesoscale error enhances the initial strength of the cyclone, resulting in an eastward track and later landfall. Therefore, mesoscale error leads to a stronger typhoon intensity. Conversely, large- and small-scale errors drive the track westward, causing an earlier landfall and reducing the typhoon's overall strength.

**Keywords** Scale decomposition, Initial error, Typhoon track, Typhoon intensity, Numerical simulation

## 1 引言

我国是自然灾害频发的国家。其中, 由热带气旋, 尤其是台风带来的气象灾害以及次生灾害(如, 山体滑坡、泥石流等)对我国造成了严重的经济损失, 对人民生命财产安全影响极大, 如 2017 年的台风“天鸽”在粤、桂、滇、黔、闽、湘 6 省区造成 247.8 万人受灾, 因灾死亡 23 人, 9 人失踪, 直接经济损失达 290.3 亿元人民币(中国气象灾害年鉴, 2018)。因此, 加强对热带气旋的预报预测中关键科学问题的研究, 具有重要的意义。

近年来, 随着人们对热带气旋认识的深入以及数值预报水平的提高, 对热带气旋的移动路径和强度等的预报已经有了一定的改善(许映龙等, 2010;

雷小途和余晖, 2015; 端义宏, 2015; Chen et al., 2021)。然而, 对于台风的长时间预报, 仍然存在较大的预报误差(Chen et al., 2021; 王海平等, 2022), 因此有必要考察预报较差的台风个例长时间预报的误差来源, 探究导致其预报不确定性的主要影响因素, 这对于提高这类台风的预报技巧具有重要的意义。

数值预报是目前台风预报的主要手段, 台风预报误差大, 即其在数值预报中有较大的不确定性。许多资料同化和可预报性研究表明, 初值的不确定性是台风数值预报不确定性的主要来源(Yu et al., 2013; Emanuel and Zhang, 2017; Zhou et al., 2018)。因此, 减小初值的不确定性是提高台风数值预报技巧的重要手段之一。然而, 台风主要生成发展于海

洋,要在广阔的洋面上进行大规模、长时间、高分辨的观测,进而减小初值的不确定性较为困难。因此,寻找初值中对台风预报具有重要影响的关键因素,进而有针对性地减小初始误差尤为重要。基于此,不少学者开展了台风的初值敏感性研究。Peng and Reynolds (2006) 利用奇异向量方法考查了大西洋和西北太平洋一共 85 个热带气旋的预报关于初值的敏感性问题,他们发现不论热带气旋转向与否,其两天的预报关于初值的敏感区都主要位于位涡梯度变号的区域,且该区域上流场主要流向气旋。然而, Torn and Hakim (2009) 利用集合敏感性分析方法考查台风 Tokage (2004) 和 Nabi (2005) 两天强度预报关于初值的敏感性时则发现台风在预报初始时刻的位置和中纬度槽对两天的强度预报影响最大,随后他们又发现热带气旋外围的大尺度降水区会对热带气旋的路径预报有较大影响 (Torn et al., 2015),但是位置预报的不确定性主要还是受制于预报初始时刻距离热带气旋中心位置 500 km 范围内的引导流的不确定性 (Torn et al., 2018)。Doyle et al. (2012) 利用伴随敏感性方法考查了 2008 年台风 Nuri 生成的初值敏感性问题,他们发现热带扰动的强度对初始的湿度和温度扰动很敏感,而对风场扰动则相对不敏感,同时他们指出最有效的增强热带扰动的方式为在扰动中低层进行加湿,而在涡度值较大的带状区域里进行加热。随后,他们用相同的做法考查了副热带气旋的初值敏感性问题,结果表明初始的湿度和温度扰动对副热带气旋的风场强度有重要的影响 (Doyle et al., 2014)。Zhou et al. (2016, 2018) 针对西北太平洋的 16 个热带气旋,考查了它们登陆前三天路径预报误差的来源,结果表明,预报初始时刻台风的强度不确定性对台风的路径预报有重要的影响。Xu and Wang (2010) 以及 Sun et al. (2015) 发现初始涡旋大小不但会对后期热带气旋内核的大小有重要影响,而且还会影响西太平洋副热带高压对热带气旋移动路径的引导作用。Emanuel and Zhang (2017) 发现初始误差对热带气旋强度预报的影响可以持续多天,且强度误差的增长对初始气旋内核湿度和 wind 极为敏感。Nystrom et al. (2018) 以距离热带气旋中心 300 km 为界,考查该界限内外初始条件的不确定性对 2015 年飓风 Joaquin 路径和强度预报的影响,结果表明 300 km 以外区域,特别是 600~900 km 的区域初始条件的不确定性对飓风 Joaquin 的路径预报有较大的影响,而 300 km 以内区域初始条件

的不确定性对飓风 Joaquin 的强度预报有较大的影响。周菲凡等 (2022) 研究了转向型台风和直线型台风的初值敏感区,研究发现对于转向型台风,敏感区主要位于行进路径的右前方,而对于直线型台风,敏感区主要位于初始台风位置的后方。

上述关于台风初值的敏感性研究,更多地关注初值中关键的区域或者关键的单个或多个物理量对台风预报不确定性的影响,而较少考虑初值中不同尺度的扰动对台风预报的影响。由于大气是由许多不同尺度的系统所构成,即初值可以看成由不同尺度的场所构成,前人的研究表明不同尺度的场对热带气旋的移动具有不同的影响。例如, Fiorino and Elsberry (1989) 以 500 km 和 1500 km 为界,将初值中的切向风廓线分解成大、中、小三个尺度,然后在初始场中分别去掉其中一个尺度,进而考查不同尺度对热带气旋移动的影响,他们发现大尺度场主要决定了热带气旋的移动速度,而中小尺度场主要决定了热带气旋的移动方向。该工作可以让人们了解不同尺度的场对热带气旋移动的作用,然而在实际预报中,初值含有各个尺度的场,导致预报不确定性的一个主要原因是初值的不确定性,即各个尺度场的不确定性,那么这些不同尺度的不确定性中,哪个尺度的不确定性对台风的预报技巧影响更大?如果把初值的不确定性看成是初始误差,那么初始误差中又是哪个尺度的误差会导致较大的预报误差?各个尺度的误差对台风的预报技巧的影响程度又是如何?这些问题鲜有人进行研究。此外,当前台风数值业务预报时间为 5 d,更长时间的预报由于具有相对较大的误差而没有发布;而在学术研究中也发现,超过 5 d 的长时间的台风模拟预报往往存在较大的预报误差 (Xiang et al., 2015; Lee et al., 2018),那么是什么原因导致了 5 d 后预报具有较大的预报误差?不同尺度的误差对其预报的影响时长如何?

基于上述问题,本研究将以 2021 年台风烟花为切入点,考察不同尺度初始误差对长时间路径及强度预报的影响,进而寻找其长时间预报不确定性的初值来源,考察不同尺度误差影响的持续时间。这些研究可以为提高台风路径及强度的长时间预报技巧提供参考。

## 2 资料与方法

### 2.1 研究对象

2021 年第 6 号台风烟花于 7 月 17 日在西北太

洋洋面生成, 19 日 00 时(协调世界时, 下同)加强为强热带风暴, 20 日 06 时加强为台风, 21 日 03 时加强为强台风。在 23 日之后, 烟花持续向西北方向移动, 于 25 日 04 时 30 分在浙江舟山普陀沿海登陆, 登陆强度为台风, 中心最大风速  $38 \text{ m s}^{-1}$ 。烟花在舟山岛滞留了 5 h、杭州湾徘徊了 16 h 后, 于 26 日 01 时 50 分在浙江嘉兴平湖市沿海再次登陆, 登陆强度为强热带风暴, 中心最大风速  $28 \text{ m s}^{-1}$ 。随后, 烟花在大陆高压和副热带高压之间鞍形场的影响下, 引导气流偏弱, 长时间滞留在浙江和江苏省, 最后一路上经过安徽、山东和河北境内, 30 日由河北黄骅进入渤海, 变性为温带气旋, 12 时被停止编号。烟花登陆后维持 128 h, 为历史上登陆华东后陆上维持时间最长的台风, 给我国多个省(市)带来了大范围超历史记录强降雨(向纯怡等, 2022)。总体上, 烟花具有尺度大、强度减弱慢和移动速度缓慢等特征, 是 2021 年给我国造成灾害损失最严重的台风。此外, 烟花的预报难度较大, 中央气象台在对其业务路径预报中出现了 3 次较为明显的阶段性调整(王海平等, 2022)。因此, 本研究选取烟花作为研究对象, 考察烟花路径和强度预报误差的主要来源。

## 2.2 模式、资料

本研究采用的模式是中尺度天气预报模式 WRF V3.9.1。模式采用 Lambert 地图投影, 中心格点为  $23^\circ\text{N}$ 、 $123^\circ\text{E}$ , 分辨率为  $3 \text{ km} \times 3 \text{ km}$ , 水平网格数为 2400(纬向)  $\times$  2000(经向), 垂直层数为 50 层, 模式层顶 50 hPa。采用的参数化方案主要为: Thompson 微物理方案、RRTMG 长(短)波辐射方案、MYJ 边界层方案、Noah 陆面过程方案。由于模式分辨率已经达到了 3 km, 所以在本研究中关闭了积云对流参数化方案。本研究采用两种再分析资料驱动 WRF 模式, 分别为: (1) 美国国家环境预测中心(NCEP)发布的全球业务( $1^\circ \times 1^\circ$ )最后分析资料(简称 FNL), 将该资料插值到 WRF 模式格点上形成初边值条件; (2) 欧洲中期天气预报中心(ECMWF)发布的第五代全球再分析资料(简称 ERA5), 分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ , 将该资料插值到 WRF 模式格点上形成初值条件, 但仍采用 NCEP FNL 资料提供边界条件, 仅考虑不同初值对 WRF 模拟台风路径和强度的影响。本研究采用中国气象局热带气旋资料中心提供的台风最佳路径数据集来检验台风烟花路径和强度

的模拟结果。

## 2.3 试验设计

本研究对 2021 年台风烟花开展长时间(14 d)、高分辨率(3 km)的数值敏感性试验。首先, 由 FNL 驱动模式, 对烟花进行长时间模拟, 产生对照试验(CTL\_F); 由 ECMWF 的 ERA5 资料再次驱动模式, 进行相同时间长度的模拟, 产生对照试验(CTL\_E); 对比分析 CTL\_F 和 CTL\_E 的模拟结果, 并与最佳路径进行比较, 将与最佳路径较为接近的模拟结果作为真值, 将另一模拟结果作为有误差的预报; 将二者的初始场作差, 进行尺度分解, 以 200 km、2000 km 为界限, 分解成 3 种尺度的误差, 并分别将这 3 种尺度的误差叠加到真值的初始场上, 最后分别进行模拟预报, 考察不同尺度的初始误差对烟花模拟预报的影响程度, 并分析各种尺度误差的相对贡献。

## 2.4 尺度分解方法

为了得到不同变量在不同水平尺度下的初始误差场, 本文基于二维离散傅立叶变换(Durran et al., 2017; Rotunno et al., 2023), 对初始误差进行谱分解, 以水平尺度 200 km 和 2000 km 为界分为小尺度、中尺度、大尺度的误差。二维离散傅立叶变换通常定义为

$$\mathbf{F}(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} \mathbf{f}(x, y) \exp\left(-2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)j\right), \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{f}(x, y)$  表示  $M \times N$  的空间域矩阵,  $M$ 、 $N$  代表变量长度;  $\mathbf{F}(u, v)$  表示  $\mathbf{f}(x, y)$  的傅里叶变换, 是由  $u=0, 1, 2, \dots, M-1$  和  $v=0, 1, 2, \dots, N-1$  定义的  $M \times N$  的频域矩阵。

二维离散傅立叶逆变换定义为

$$\mathbf{f}(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} \mathbf{F}(u, v) \exp\left(2\pi\left(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N}\right)j\right). \quad (2)$$

本文关于二维离散傅立叶变换的计算基于 Matlab 中的 FFT 和 IFFT 函数。

# 3 数值结果与分析

## 3.1 CTL\_F 与 CTL\_E 的对比分析

由图 1 可见, 两种初始资料对台风烟花的路径、强度模拟在前 7 d 的模拟结果较为一致, 而在后 7 d 则存在明显差异。在路径方面, 不论哪种资料做初始场, 模拟的路径相对于最佳路径都有明显的向右

偏移 (图 1a)。在前 7 d, 用 ERA5 作为初始资料 (CTL\_E) 的路径模拟略好于用 FNL 作为初始资料 (CTL\_F) 的路径模拟, 而在后 7 d, 二者模拟的路径的差异逐渐扩大, CTL\_E 模拟的烟花在我国浙江北部登陆, 和观测较为接近, 而 CTL\_F 模拟的烟花整体路径更为偏东, 以至于其模拟的登陆点在山东东部, 和观测差别较大。此外, CTL\_F 模拟的烟花在后期移速越来越快, 路径误差达到了 3000 km 以上, 而 CTL\_E 模拟的烟花虽然在后期和观测也有较大的差别, 但是其路径误差远远小于 CTL\_F 模拟的路径误差 (图 1b)。在强度方面, 不论是最低海平面气压还是近地面最大风速, CTL\_E 和 CTL\_F 都可以很好地模拟出台风强度的变化趋势, 且模拟的台风强度达到最强的时刻也与

观测较为一致 (图 1c、d), 但是在前 7 d, 不论是 CTL\_E 还是 CTL\_F 模拟的强度都比观测偏强 (更低的海平面气压和更大的最大风速)。随后强度迅速减小, 由于后期模拟的台风路径比最佳路径所在纬度更高, 环境气温更低, 因此最低海平面气压比观测偏高直至消亡。CTL\_E 的最大风速在模拟的三四天迅速减小之后又有所上升, CTL\_F 在模拟的最后两三天明显比观测偏强, 这可能是因为模拟的台风在后期向中高纬移动的过程中变性为温带气旋, 在斜压作用下位能转化为动能导致风速再次增大, 而观测的烟花则最终消亡在渤海湾。由图 1c、d 可见, 模拟的前 5 d CTL\_E 的强度略好于 CTL\_F 的模拟, 而 5 d 之后二者的模拟效果相当。综合路径和强度的模拟结果可见, CTL\_E 的模拟结果好

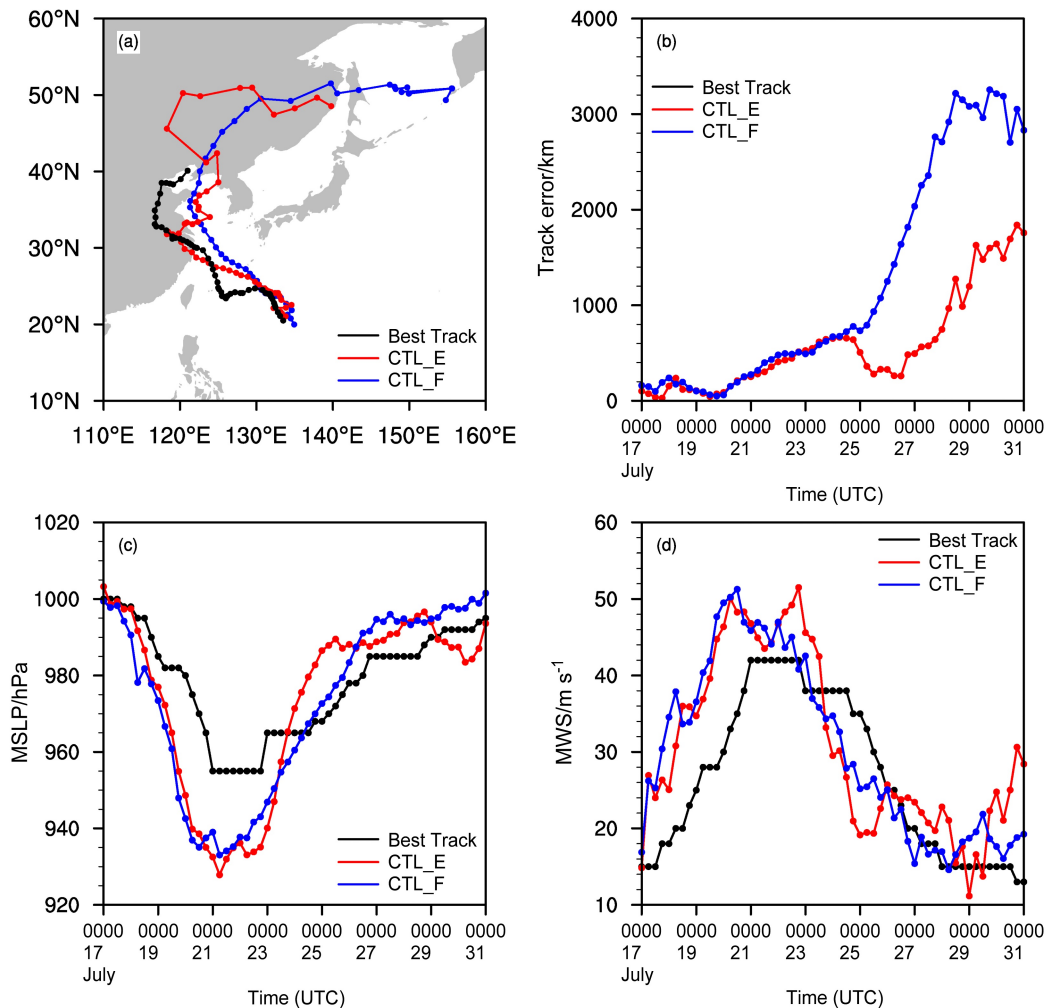


图 1 2021 年 7 月 17 日 00 时 (协调世界时, 下同) 至 31 日 00 时观测的和 CTL\_E、CTL\_F 模拟的台风烟花的 (a) 路径、(b) 路径误差、(c) 最低海平面气压、(d) 近地面最大风速。

Fig. 1 (a) The track, (b) track error, (c) MSLP (minimum sea level pressure), and (d) MWS (maximum surface wind speed) of typhoon In-fa from the best track (observation), model simulation of CTL\_E and CTL\_F from 0000 UTC 17 July to 0000 UTC 31 July 2021.

于 CTL\_F, 因此后续研究将以 CTL\_E 的模拟为真值, 以 CTL\_F 为有初始误差的预报, 通过对二者初始场的差值场进行分析, 探讨不同尺度初始误差对烟花的路径和强度预报的影响。

由图 2 可见, CTL\_F 和 CTL\_E 整体环流形势较为一致 (图 2a、b、d、e), CTL\_F 的台风中心位置较 CTL\_E 的偏东偏南一些, CTL\_F 的台风强度更强, 范围更大 (图 2a、b、c), 且其副热带高压 (简称副高) 比 CTL\_E 副高偏东一些 (对比 588 dagpm 线在日本海的位置)。从二者的差值场 (图 2c、f) 上可以看出, CTL\_F 和 CTL\_E 的主要差异在台风的中心位置和副高边缘位置上, 这反映出了台风位置和强度以及引导流的差异, 上述因

素也是 CTL\_F 模拟的台风路径较 CTL\_E 的台风路径在前 7 d 整体更偏东的原因之一。从温度场和风场上来看, CTL\_F 和 CTL\_E 的初始台风都具有明显的暖心结构 (图 3), 从台风中心往外, 水平温度梯度在中高层较为明显, 而在地面层不明显。CTL\_F 和 CTL\_E 总体风场形势差别不大, CTL\_E 较 CTL\_F 的环流结构更清楚一些。从差值场上看, CTL\_F 的温度场在台风中心区域的高层比 CTL\_E 的冷, 但在低层比 CTL\_E 的暖, 即 CTL\_F 上下层温差更大, 说明台风眼下沉气流更强, 在中低层的增温更明显。有研究指出, 台风眼区低层的高温空气可以在眼墙内侧边缘附近引发对流, 促进眼墙收缩, 从而提高内核惯性稳定性, 维持台风眼结构并

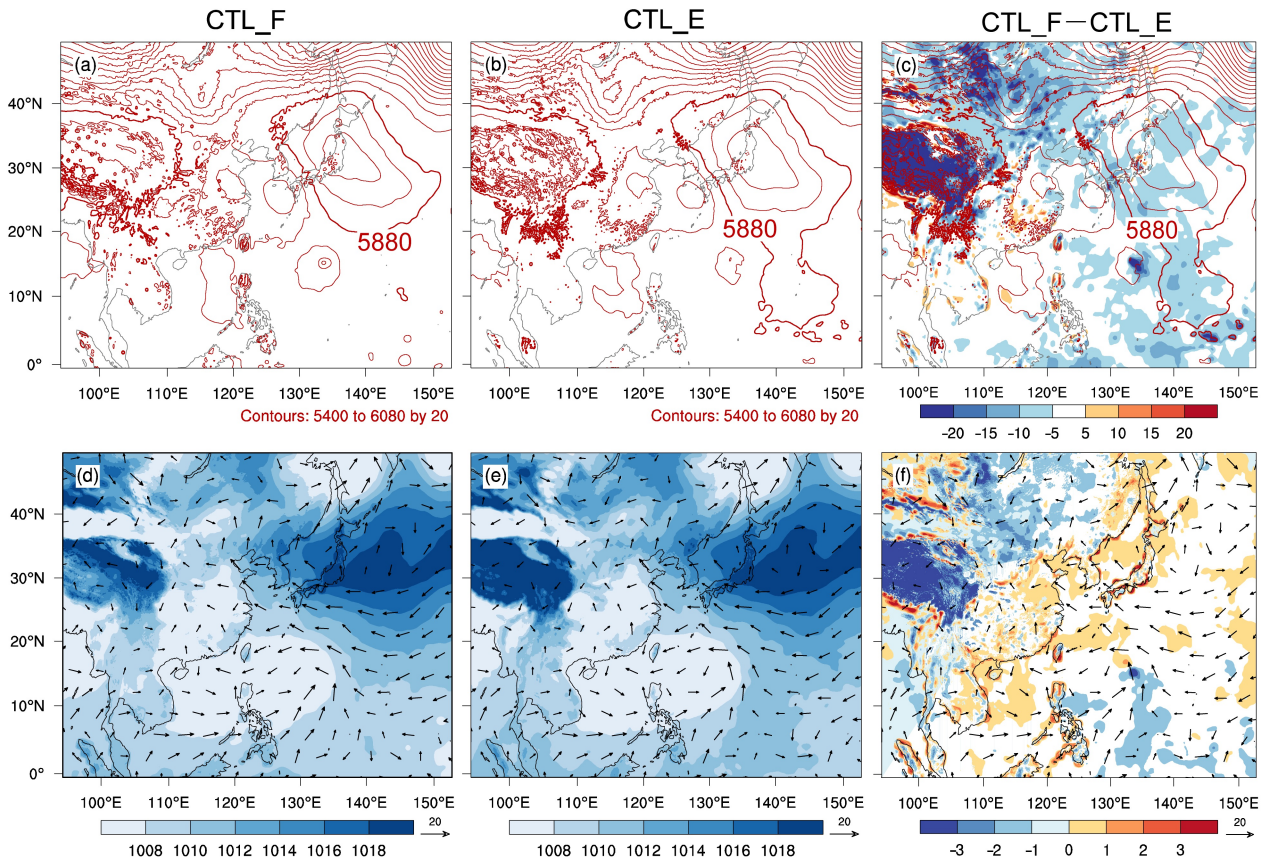


图 2 2021 年 7 月 17 日 00 时 (初始时刻) (a) CTL\_F 试验、(b) CTL\_E 试验模拟的 500 hPa 位势高度 (单位: gpm), (c) CTL\_F 试验与 CTL\_E 试验模拟的 500 hPa 位势高度的差值 (阴影, 单位: gpm) 叠加 CTL\_E 试验模拟的 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm), (d) CTL\_F 试验、(e) CTL\_E 试验模拟的海平面气压 (阴影, 单位: hPa) 和风场 (箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), (f) CTL\_F 试验与 CTL\_E 试验模拟的海平面气压的差值 (阴影, 单位: hPa) 叠加 CTL\_E 试验模拟的风场 (箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。

Fig. 2 The 500-hPa geopotential height (units: gpm) simulated by (a) experiment CTL\_F and (b) experiment CTL\_E, (c) differences (shadings, units: gpm) of 500-hPa geopotential height between experiment CTL\_F and experiment CTL\_E overlapped with 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm) of experiment CTL\_E, sea level pressure field (shadings, units: hPa) and wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) of (d) experiment CTL\_F and (e) experiment CTL\_E, (f) differences (shadings, units: hPa) of sea level pressure between experiment CTL\_F and experiment CTL\_E overlapped with wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) of experiment CTL\_E at 0000 UTC 17 July 2021 (the initial time).

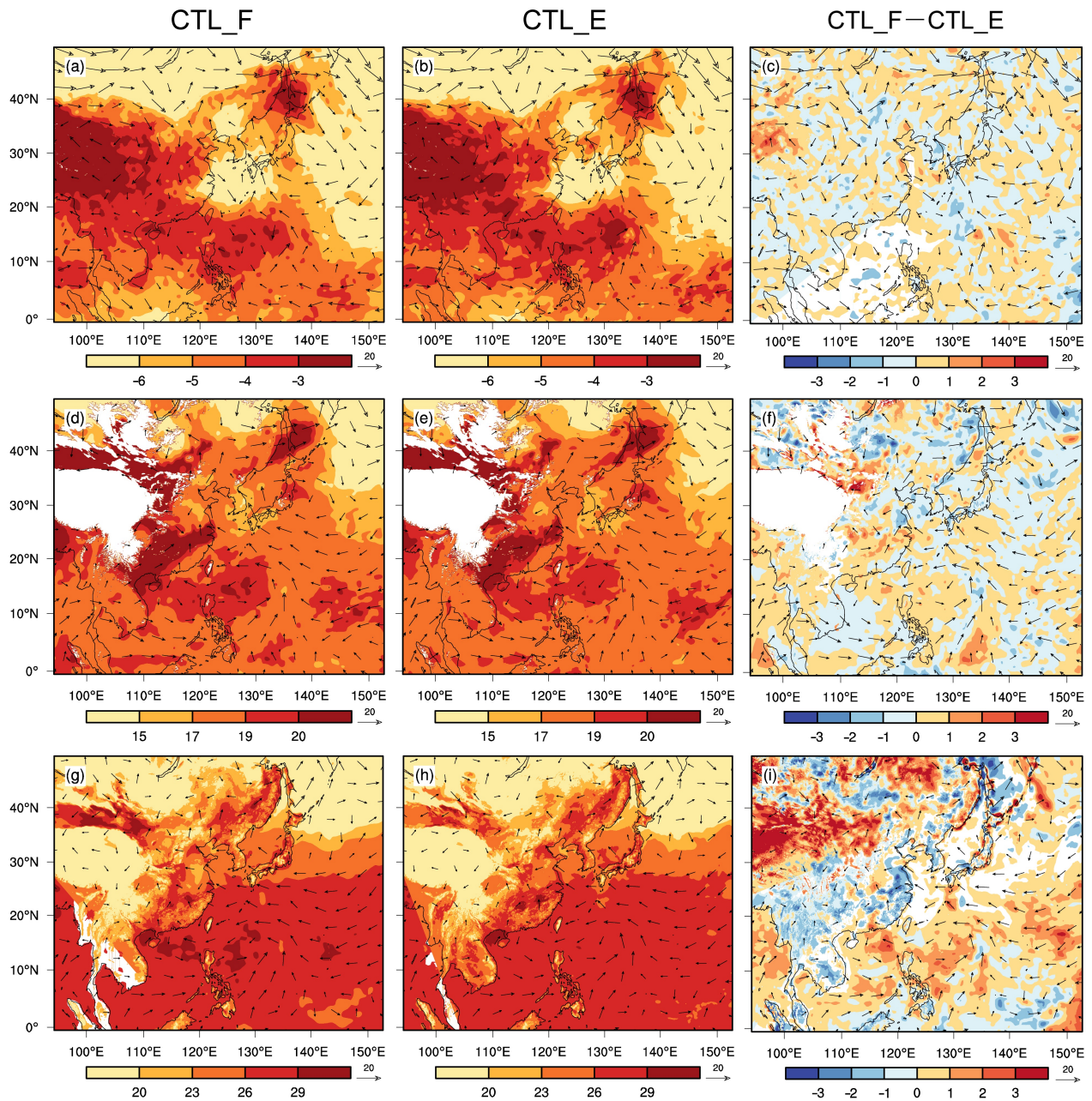


图3 2021年7月17日00时 (a、d、g) CTL\_F试验、(b、e、h) CTL\_E试验 (a、b) 500 hPa、(d、e) 850 hPa、(g、h) 地面的温度 (阴影, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风场 (箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ) 以及 CTL\_F 试验和 CTL\_E 试验 (c) 500 hPa、(f) 850 hPa、(i) 地面温度场的差值 (阴影, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 叠加 CTL\_E 试验的风场 (箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。

Fig. 3 The temperature (shadings, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) at (a–c) 500 hPa, (d–f) 850 hPa, (g–i) surface from (a, d, g) experiment CTL\_F and (b, e, h) experiment CTL\_E, (c, f, i) the differences of temperature (shadings, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) between experiment CTL\_F and experiment CTL\_E overlapped with wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) of experiment CTL\_E at 0000 UTC 17 July 2021.

提高加热的动力效率, 使气旋更快增强 (Haurwitz, 1935; Wang and Heng, 2016)。这种机制导致了 CTL\_F 的台风在初始时刻强度更强一些, 其与气压场的结果相呼应 (图 1c)。从相对湿度场上看, CTL\_E 的台风眼中心的相对湿度更大, 台风眼中多数区域相对湿度在 90% 以上, 而 CTL\_F 的台风

中心相对湿度多数区域仅有 80% 多 (图 4a、b), 二者的差值场显示差异最大处能达 16% (图 4c)。CTL\_E 的台风水汽更为充足, 环境场中也有更多的气源源源不断地向台风中心输送。前人研究表明, 水汽导致的非绝热加热作用可以对台风的移动产生明显的影响 (吴胜蓝等, 2023); 充足的水汽有利

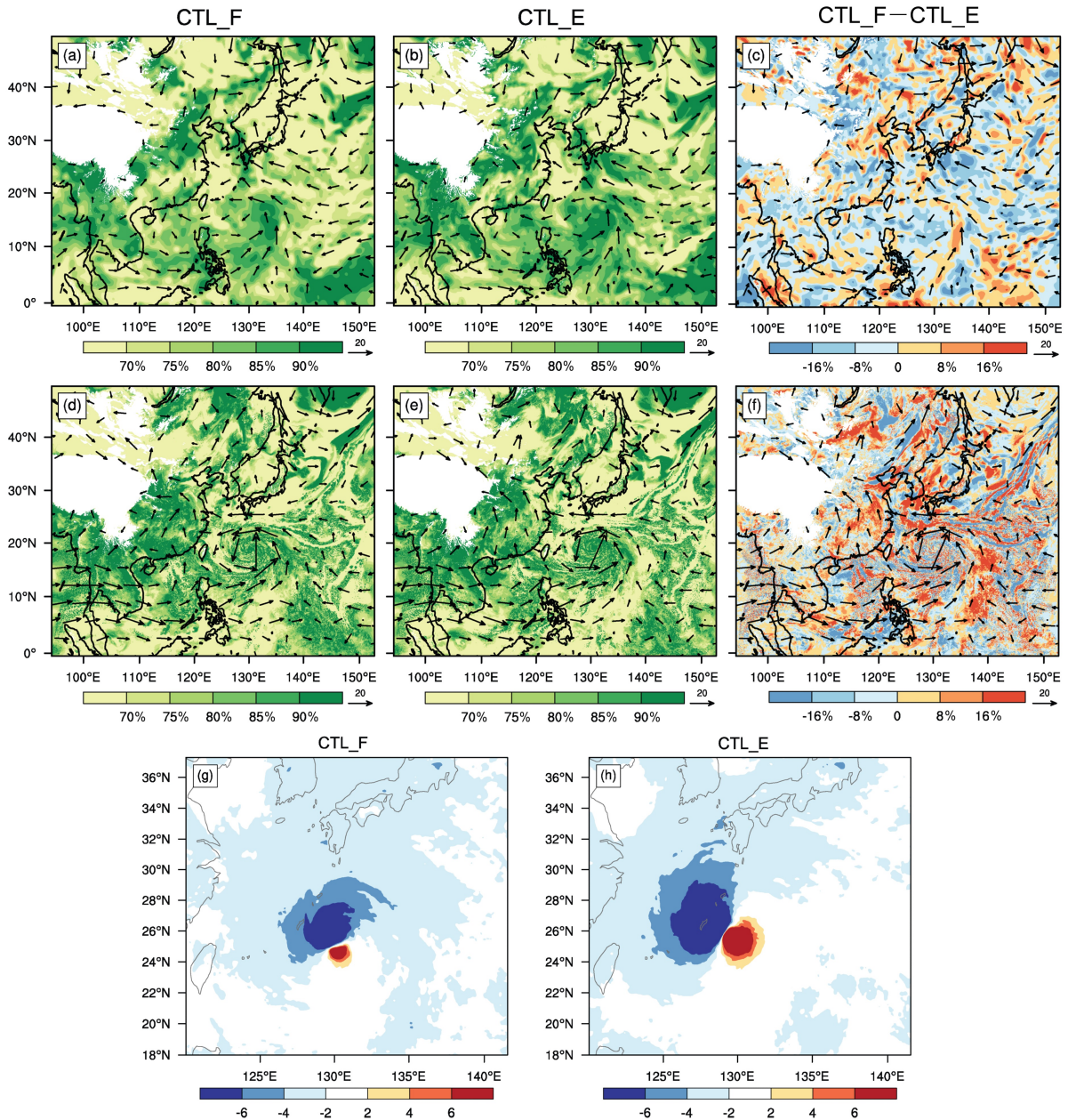


图4 2021年7月(a-c)17日00时、(d-f)20日00时(a、d)CTL\_F试验、(b、e)CTL\_E试验的850 hPa相对湿度(阴影)、风场(箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ ), (c、f)CTL\_F试验与CTL\_E试验相对湿度场的差值(阴影)叠加CTL\_E试验风场(箭头, 单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。2021年7月21日00时(g)CTL\_F试验与(h)CTL\_E试验海平面6h变压场(单位: hPa)。

Fig. 4 The relative humidity (shadings) and wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) from (a, d) experiment CTL\_F and (b, e) experiment CTL\_E, (c, f) the differences of relative humidity between experiment CTL\_F and experiment CTL\_E overlapped with wind field (arrows, units:  $\text{m s}^{-1}$ ) of experiment CTL\_E at 850 hPa at (a-c) 0000 UTC 17 July, (d-f) 0000 UTC 20 July 2021. The 6-h change of pressure (units: hPa) from (g) experiment CTL\_F, (h) experiment CTL\_E at sea surface level at 0000 UTC 21 July 2021.

于促进对流和降水, 并通过释放凝结潜热增温, 降低气压场, 产生负变压中心, 进而影响台风的移动方向。在20日00时, 可以明显看到在台风前进方向的偏北方, CTL\_F比CTL\_E有更大的低层环境湿度(图4d-f), 随后CTL\_F的台风的西北偏北

方向有较强的负变压中心(图4g), 相比于CTL\_F, CTL\_E则在台风的西侧有明显的负变压中心(图4h)。因此CTL\_F模拟的台风路径在之后的一段时间内比CTL\_E偏北, 而CTL\_E则更多地往西面发展。这也为CTL\_F和CTL\_E模拟的路径在后期有较大

的差异提供了条件。

将上述初始时刻的差值场进行尺度分解,以 200 km, 2000 km 为界限,分解成 3 种尺度的误差,称大于 2000 km 的尺度误差为大尺度误差,200~2000 km 的尺度误差为中尺度误差,小于 200 km 的误差为小尺度误差。我们分别将这 3 种尺度的误差叠加到真值的初始场上,再分别进行模拟预报,考察不同尺度的初始误差对烟花模拟预报的影响程度,并分析各种尺度误差的相对贡献。

### 3.2 不同尺度误差的影响

从图 5a、b 可见,在前 10 d 的预报中,特别是从 21 日 00 时到 27 日 00 时,叠加了中尺度误差后的路径预报误差最大,路径趋向于叠加全部误差(CTL\_F)的路径,这说明在这期间 CTL\_F 相对于 CTL\_E 的路径偏差主要由中尺度误差导致。虽然图 5a 显示在这期间叠加了大尺度和小尺度的误差后的路径与 CTL\_E 的路径没有明显偏差,但是图 5b 却表明这期间存在不可忽略的路径预报误差。仔细分析发现,叠加了大尺度和小尺度误差后,台风移速加快,因此虽然二者移动方向与 CTL\_E 的一致,但是到达相近位置的时间存在明显差异,这也是图 5b 显示的叠加大尺度和小尺度误差后存在明显预报误差的原因。从 27 日 00 时到 28 日 00 时,叠加大尺度误差后的路径预报误差迅速增长,甚至超过了叠加中尺度误差后的路径预报误差;之后,二者的预报误差快速衰减,而叠加小尺度的预报误差则一直增长到 29 日 12 时,从 29 日 00 时到 31 日 00 时,由小尺度误差导致的预报误差最大,量值上逼近 CTL\_F 相对于 CTL\_E 的预报误差。但是从图 5a 可见,从 25 日 00 时开始,叠加小尺度误差后的路径与 CTL\_F 的路径差距就已经较大,说明后两天 CTL\_F 的误差可能并非只由小尺度误差所导致,也受到其他尺度误差的影响。图 5a 显示,25 日 00 时之后叠加大尺度误差后的路径相比于 CTL\_E 的路径明显向西偏移,而中尺度和小尺度的误差对环境场的主要系统的影响则相对弱一些。

由图 5c-f 可见,在 22 日 00 时之前,即在台风的增强阶段,不论从中心气压还是最大风速,三种尺度误差导致的强度预报误差都要小于它们在台风衰减阶段所导致的强度预报误差。相比于 CTL\_E,在整个预报时长内,中尺度误差普遍导致更低的中心气压、更大的最大风速,即使得台风更强。然而在增强阶段中尺度误差使得台风偏强的幅

度要小于在衰减阶段偏强的幅度(图 5c、e),这说明中尺度误差略微加快了台风增强的速度,而显著放缓了台风衰减的速度。相反,大尺度误差和小尺度误差则在整个预报时长内普遍导致更高的中心气压和相对较小的最大风速,即使得台风变弱。类似地,在增强阶段大尺度和小尺度误差使得台风偏弱的幅度要小于在衰减阶段偏弱的幅度(图 5c、e),可见大尺度和小尺度误差略微放缓了台风增强的速度,而明显加快了台风衰减的速度。

### 3.3 不同尺度误差对预报影响的原因分析

总体来说,不论是强度预报,还是路径预报,在前 10 d 的预报中,中尺度误差的影响最为显著。叠加了中尺度误差后,台风路径趋向于叠加全部误差的路径,强度也趋向于叠加全部误差的强度,说明在前 10 d 的预报中,中尺度误差起了决定性作用。而在后 4 d 的预报中,大尺度和小尺度误差的贡献逐渐凸显。图 6 展示了初始场叠加小尺度误差后在不同预报时刻的误差场能谱,不同预报时间的线在左侧几乎重叠,表明小尺度误差几乎没有增长,在早期已达到饱和;中尺度误差在 7 d 之前一直有明显增长,7 d 之后也趋近饱和;大尺度误差在整个模拟预报阶段都有增长。已有研究指出,小尺度初始误差在湿对流过程中增长,在对流尺度达到饱和后会通过重力波传播和地转调整向较大尺度转变,即小尺度误差的升尺度发展机制(Zhang et al., 2007; Selz and Craig, 2015)。图 6 也说明了小尺度误差快速饱和后向中、大尺度转变,在后期以较大尺度误差的形式产生影响。那么,小尺度误差如何在后期以较大尺度形式对台风路径产生影响呢?图 7 给出了叠加小尺度误差后模拟得到的 500 hPa 高度场与 CTL\_E 的对比,可见背景环流场在后期出现了较大尺度的误差,尤其在副高附近,而副高位置的变动会影响台风引导流的位置与方向,对台风路径模拟产生重大影响。综上所述,小尺度初始误差通过升尺度增长,逐渐变为中、大尺度误差,在后期通过影响背景场环流(尤其是副高)对台风整体路径造成影响。此外,中尺度误差在前期使得台风路径偏东,强度偏强,而大尺度和小尺度误差使得台风路径偏西,强度偏弱。那么为何是中尺度误差的影响最为显著?为什么叠加中尺度误差后会使得在前 10 d 台风的强度偏强?下文就这些问题进行分析。

由图 8a、c 可以看出,纬向风场的中尺度误差

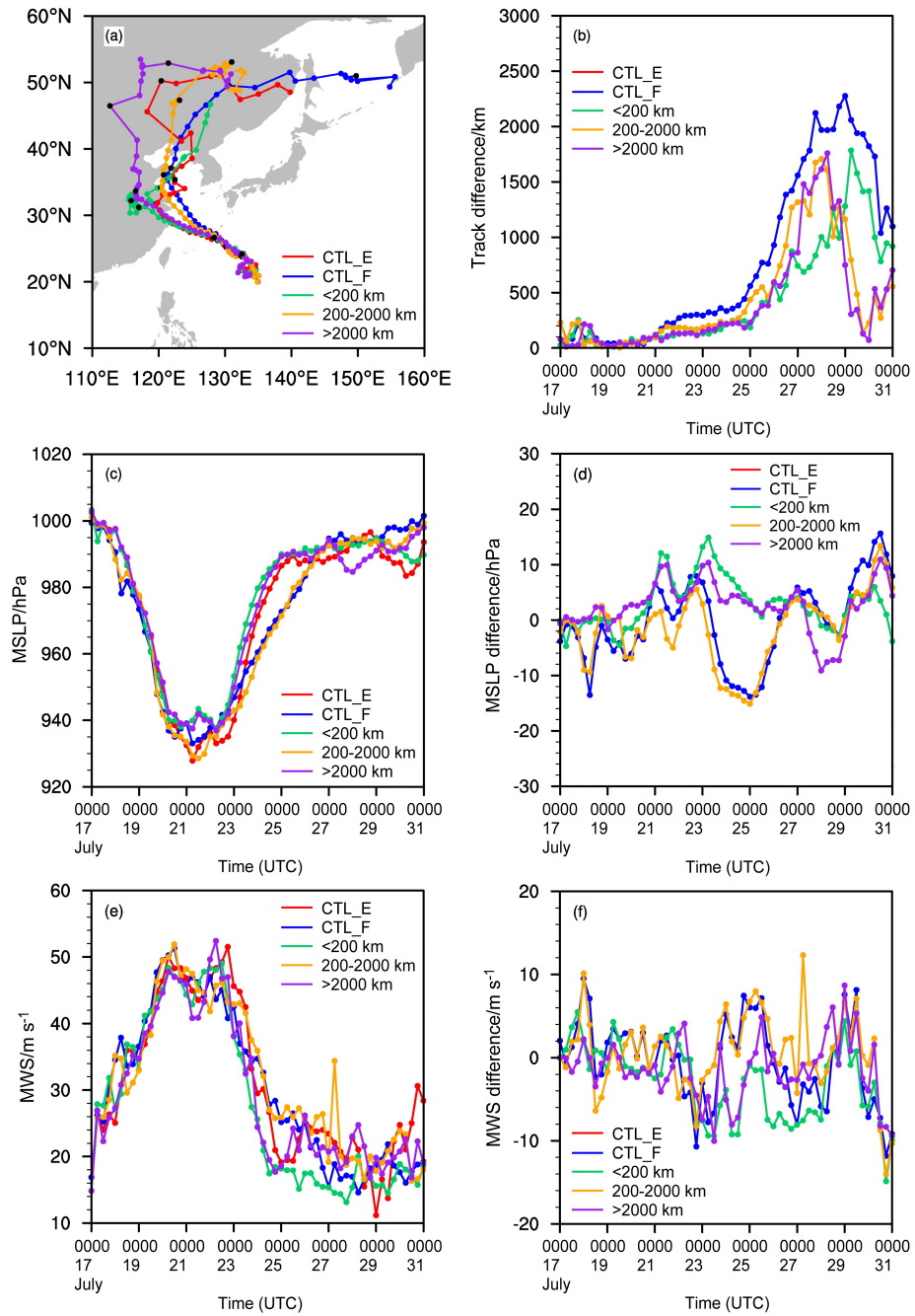


图5 2021年7月17日00时至31日00时 CTL\_E 试验、CTL\_E 试验叠加不同尺度 (<200 km、200~2000 km、>2000 km) 误差以及 CTL\_F 试验模拟的台风烟花的 (a) 路径、(c) 最低海平面气压 (单位: hPa)、(e) 最大风速 (单位:  $m s^{-1}$ ), CTL\_E 试验叠加不同尺度误差以及 CTL\_F 试验模拟的结果与 CTL\_E 试验的 (b) 路径差 (单位: km)、(d) 最低海平面气压差 (单位: hPa)、(f) 最大风速差 (单位:  $m s^{-1}$ )。图 a 中, 黑色标记点表示不同模拟结果中 19 日 00 时、21 日 00 时、25 日 00 时、27 日 00 时、29 日 00 时台风所在位置。误差指的是初始时刻 CTL\_F 试验和 CTL\_E 试验的差值场尺度分解后得到的三个分解场。

Fig. 5 (a) The track, (c) MSLP (units: hPa), (e) MWS (units:  $m s^{-1}$ ) of typhoon In-fa simulated from experiment CTL\_E, experiment CTL\_E superimposed with the errors with the different scales (<200 km, 200~2000 km, >2000 km), experiment CTL\_F, the differences of (b) track, (d) MSLP (units: hPa), MWS (units:  $m s^{-1}$ ) of typhoon In-fa between experiment CTL\_E superimposed with the errors with the different scales, experiment CTL\_F and experiment CTL\_E from 0000 UTC 17 July to 0000 UTC 31 July 2021. In Fig. a, the black dots represent the positions of typhoon In-fa at 0000 UTC 19 July, 0000 UTC 21 July, 0000 UTC 25 July, 0000 UTC 27 July, 0000 UTC 29 July 2021. The errors refer to the three decomposed fields obtained through scale decomposition from the differences between the experiment CTL\_F and experiment CTL\_E at the initial time.

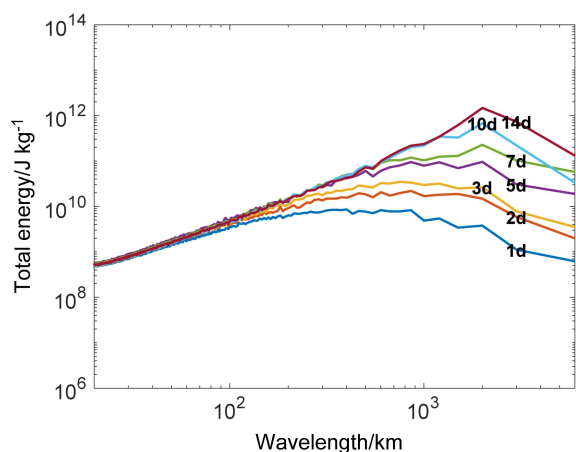


图6 2021年7月17日00时区域(0°~50°N, 95°~152°E)平均的初始场叠加小尺度误差后在不同预报时刻的误差场能谱。1 d表示18日00时, 2 d表示19日00时, 以此类推。

Fig. 6 Energy spectrum of errors averaged over (0°~50°N, 95°~152°E) at the different simulation time after superimposing the small-scale error on the initial field at 0000 UTC 17 July 2021. 1 d represents 0000 UTC 18 July, 2 d represents 0000 UTC 19 July, and so on.

与原场具有较大的相似性, 表明 CTL\_F 与 CTL\_E 的纬向风的差值场主要以中尺度误差为主。此外, 该中尺度误差在台风中心有明显的误差大值区。事实上, 经向风场、温度场、气压场、相对湿度场也具有类似的结论(图略)。即 CTL\_F 与 CTL\_E 的差值场不论是哪个变量都主要以中尺度误差为主, 这也就揭示了为何预报误差主要由中尺度误差所导致。

那么为何叠加了中尺度误差后会较大的路径偏移? 由图 9a 可见, 在初始场上叠加了不同尺度的误差后, 初始的台风位置发生了明显的偏离。叠加中尺度误差后发生的位置偏差最明显, 叠加大尺度误差次之, 叠加小尺度误差导致的初始台风位置偏差相对最小。可见, 叠加中尺度误差后使得初始台风位置发生明显偏移是其后期路径偏差产生的一个重要原因。

随着预报时长的增加, 大尺度误差对副高等大尺度环境场影响更加显著, 这种影响使得副高西伸明显(图 10), 台风顺着副高西侧引导流移动, 从而使得大尺度误差导致的路径偏西。而中尺度和小尺度的误差对环境场的主要系统的影响则相对弱一些。中尺度误差的影响主要体现在对台风本身的影响, 表现为初始时刻更大的位置和强度偏差(图 5a-c); 而小尺度误差不论对台风本身还是背景环境场的影响都相对要小, 这可能是因为它本

身具有相对较小的能量(图 9c)。从能量上看, 在初始时刻, 中尺度误差具有最大的能量, 大尺度次之, 小尺度最小, 这也是中尺度误差在前期保持较大影响力的原因之一。

接下来分析叠加中尺度误差后台风在前 10 d 的强度偏强的原因。由图 5a 可以看出, 叠加了中尺度误差后, 台风路径偏东, 在海上停留时间较长, 登陆时间较晚, 因此减弱的速度较慢; 而叠加了大尺度和小尺度误差后, 台风登陆时间相对较早, 因此衰减速度加快。此外, 由图 9b 可以看出, 叠加了中尺度误差后, 台风具有更强的初始强度, 以往的研究表明, 在数值模拟试验中台风初始强度较强有益于其后维持较高的强度(岳健等, 2023)。而叠加了大尺度和小尺度误差后, 台风仅有略微的偏强。该细小的偏强作用迅速由于台风向高纬移动而被削弱, 之后又由于台风在陆上的过多停留而使得台风强度受到较大的影响, 从而使得在整个预报时段内台风的强度偏弱。

## 4 总结与讨论

本文通过对 2021 年台风烟花开展长时间(14 d)、高分辨率(3 km)的数值敏感性试验, 考察不同尺度初始误差对台风烟花的路径和强度长时间预报的影响, 寻找其路径和强度长时间预报不确定性的主要初值来源。

初始误差场由再分析资料 FNL 驱动 WRF 模式形成的初值(CTL\_F 的初值)与由 ECMWF 的 ERA5 资料再次驱动 WRF 模式形成的初值(CTL\_E 的初值)作差得到。进一步将该初始误差场进行尺度分解, 以 200 km, 2000 km 为界限, 分解成小尺度、中尺度和大尺度 3 种误差, 然后分别将这 3 种尺度的误差叠加到真值(CTL\_E)的初始场上, 再分别进行模拟预报, 考察不同尺度的初始误差对台风烟花模拟预报的影响程度, 并分析各种尺度初始误差对预报误差的相对贡献。

结果表明, 不论是强度预报, 还是路径预报, 在前 10 d 的预报中, 中尺度误差的影响最为显著。叠加了中尺度误差后, 台风路径趋向于叠加全部误差的路径, 强度也趋向于叠加全部误差的强度, 说明在前 10 d 的预报中, 中尺度误差起了决定性作用。而在后 4 d 的预报中, 大尺度和小尺度误差的贡献逐渐凸显, 3 种尺度误差的效果相当。此外, 中尺度误差在前期使得台风路径偏东, 强度偏强;

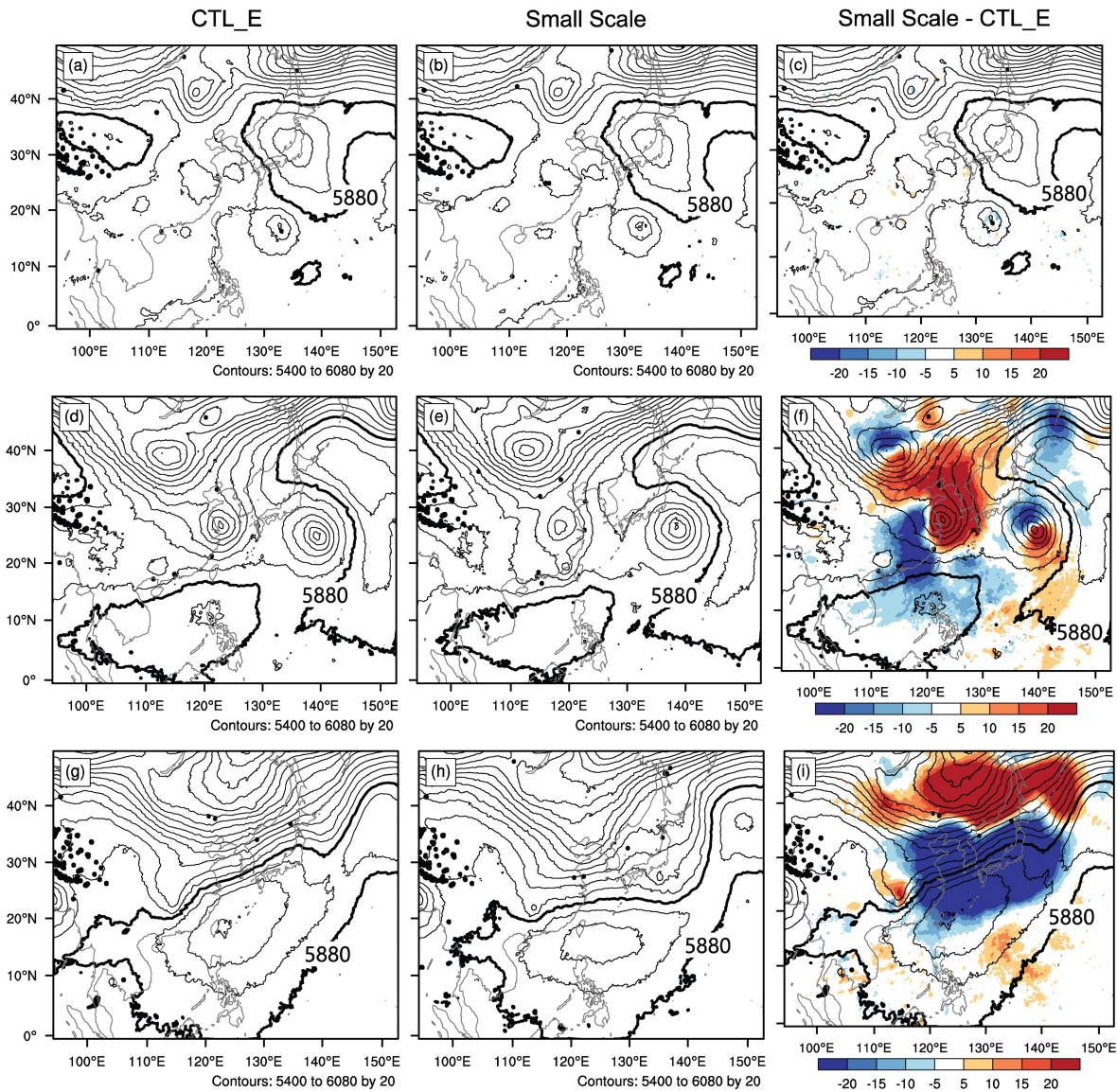


图7 2021年7月(a、d、g) CTL\_E试验、(b、e、h) CTL\_E试验叠加小尺度误差后模拟得到的(a、b) 18日00时、(d、e) 26日00时、(g、h) 30日00时的500 hPa位势高度(单位:gpm)以及(c、f、i)图b、e、h结果与图a、d、g结果的差值(阴影,单位:gpm)叠加图a、d、g的结果(等值线,单位:gpm)。

Fig. 7 500-hPa geopotential height (units: gpm) simulated from (a, d, g) experiment CTL\_E and (b, e, h) experiment CTL\_E superimposed with the small-scale errors at (a, b) 0000 UTC 18 July, (d, e) 0000 UTC 26 July, and (g, h) 0000 UTC 30 July 2021. (c, f, i) The differences of the results (shadings, units: gpm) between Figs. b, e, h and Figs. a, d, g, overlapped with the results (contours, units: gpm) of Figs. a, d, g.

而大尺度和小尺度误差使得台风路径偏西，强度偏弱。

接着，本文分别从各种尺度误差的时空分布、各种尺度误差导致的台风的路径及强度误差以及大尺度环流场等方面分析了中尺度误差影响最为显著的原因。结果显示，在初始时刻中尺度误差场与全部误差场具有更高的相似性，也即全部误差场的信息主要体现在中尺度误差上，因此中尺度误差在前

期的作用最为显著。叠加中尺度误差场后台风具有更强的初始强度，偏东的路径又使得其登陆时间较晚，衰减较慢，因此中尺度误差使得台风强度偏强。而大尺度和小尺度误差由于使得台风路径偏西，较早登陆，衰减较快，因此会使得台风强度总体偏弱。

由本文结果可以看出，中尺度误差在台风烟花的14 d预报中各个阶段都起着十分重要的作用，因此，在减小初始误差以提高台风预报技巧的时候，

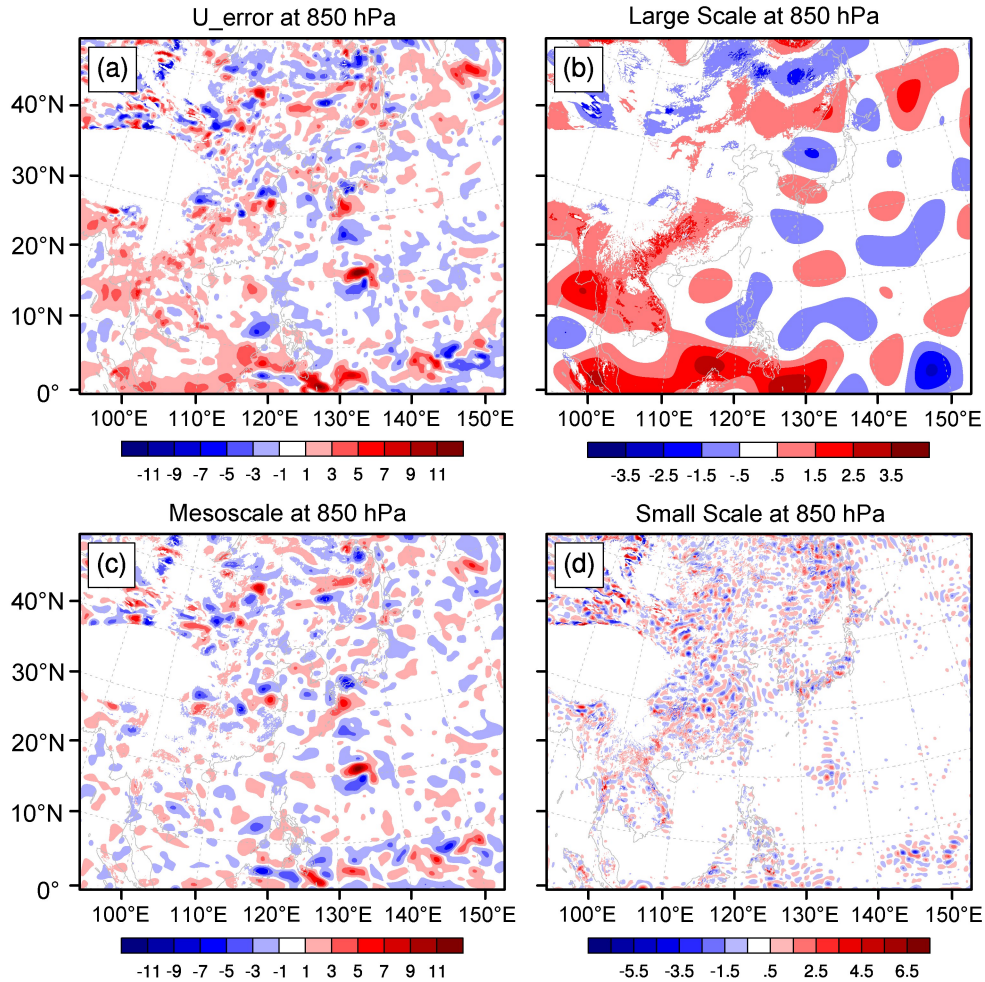


图8 (a) 2021年7月17日00时CTL\_F试验与CTL\_E试验模拟的纬向风在850 hPa的差值场(单位:  $\text{m s}^{-1}$ )。图a的差值场分解成(b)大、(c)中、(d)小尺度三个场的形态。

Fig. 8 (a) The differences of 850-hPa zonal wind (units:  $\text{m s}^{-1}$ ) between experiment CTL\_F and experiment CTL\_E at 0000 UTC 17 July 2021. The zonal wind field of Fig. a is decomposed into (b) large-scale, (c) mesoscale, and (d) small-scale.

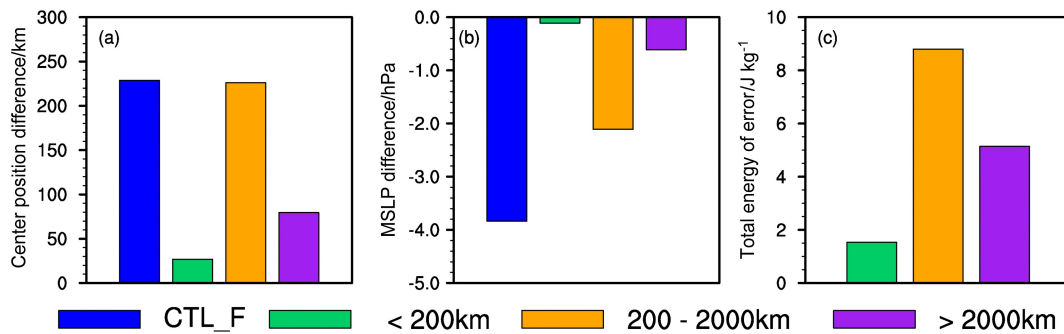


图9 2021年7月17日00时CTL\_F试验, CTL\_E试验叠加了小尺度误差、中尺度误差和大尺度误差后的模拟结果相对于CTL\_E试验的(a)台风烟花中心的位置差、(b)最低海平面气压差(单位: hPa)以及(c)区域( $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $95^{\circ}\sim 152^{\circ}\text{E}$ )平均的误差场的总能量(单位:  $\text{J kg}^{-1}$ )。

Fig. 9 The differences of (a) the center position of typhoon In-fa (units: km), (b) MSLP (units: hPa), (c) total energy (units:  $\text{J kg}^{-1}$ ) of error averaged over ( $0^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ ,  $95^{\circ}\sim 152^{\circ}\text{E}$ ) between experiment CTL\_F, experiment CTL\_E superimposed with small-scale error, mesoscale error, large-scale error and experiment CTL\_E at 0000 UTC 17 July 2021.

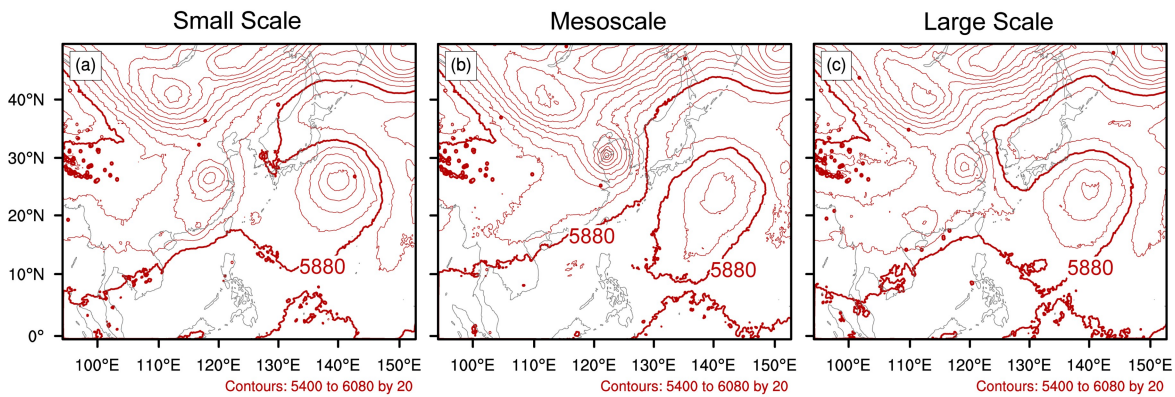


图 10 2021 年 7 月 17 日 00 时 CTL\_E 试验叠加 (a) 小尺度误差、(b) 中尺度误差和 (c) 大尺度误差后模拟得到的 25 日 12 时的 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm)。

Fig. 10 500-hPa geopotential height (units: gpm) at 0000 UTC 25 July simulated from experiment CTL\_E superimposed with (a) small-scale error, (b) mesoscale error, (c) large-scale error at 0000 UTC 17 July 2021.

应着重减小中尺度误差。此外,在集合预报中,在构造集合预报初始扰动成员的时候,产生中尺度初始扰动有望获得相对较高的集合离散度。本文只对台风烟花进行研究,后期还需要对更多的台风个例进行研究,探讨不同尺度初始误差对台风长时间预报的影响,寻找共同规律,为台风长时间预报技巧的提高提供途径。

**致谢** 感谢国家重大科技基础设施项目“地球系统数值模拟装置”提供支持。

### 参考文献 (References)

Chen G., Yang M, Zhang X, et al. 2021. Verification of tropical cyclone operational forecast in 2020 [C]. 53rd Session ESCAP/WMO Typhoon Committee. 23–25 February 2021.

Doyle J D, Reynolds C A, Amerault C, et al. 2012. Adjoint sensitivity and predictability of tropical cyclogenesis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 69(12): 3535–3557. doi:10.1175/JAS-D-12-0110.1

Doyle J D, Amerault C, Reynolds C A, et al. 2014. Initial condition sensitivity and predictability of a severe extratropical cyclone using a moist adjoint [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142(1): 320–342. doi:10.1175/MWR-D-13-00201.1

端义宏. 2015. 登陆台风精细结构的观测、预报与影响评估 [J]. *地球科学进展*, 30(8): 847–854.

Duan Yihong. 2015. Monitoring and forecasting of finescale structure and impact assessment of landfalling typhoons [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 30(8): 847–854. doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2015.08.0847

Durran D, Weyn J A, Menchaca M Q. 2017. Practical considerations for computing dimensional spectra from gridded data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145(9): 3901–3910. doi:10.1175/MWR-D-17-0056.1

Emanuel K, Zhang F Q. 2017. The role of inner-core moisture in tropical cyclone predictability and practical forecast skill [J]. *J.*

*Atmos. Sci.*, 74(7): 2315–2324. doi:10.1175/JAS-D-17-0008.1

Fiorino M, Elsberry R L. 1989. Contributions to tropical cyclone motion by small, medium and large scales in the initial vortex [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 117(4): 721–727. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<0721:CTTCMB>2.0.CO;2

Haurwitz B. 1935. The height of tropical cyclones and of the “eye” of the storm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 63(2): 45–49. doi:10.1175/1520-0493(1935)63<45:THOTCA>2.0.CO;2

Lee C Y, Camargo S J, Vitart F, et al. 2018. Subseasonal tropical cyclone genesis prediction and MJO in the S2S dataset [J]. *Wea. Forecasting*, 33(3): 967–988. doi:10.1175/WAF-D-17-0165.1

雷小途, 余晖. 2015. WMO 登陆台风预报示范项目研究进展 [J]. *气象科技进展*, 5(2): 18–23.

Lei Xiaotu, Yu Hui. 2015. The progress of WMO typhoon landfall forecast demonstration project [J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 5(2): 18–23. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2015.02.003

Nystrom R G, Zhang F Q, Munsell E B, et al. 2018. Predictability and dynamics of hurricane Joaquin (2015) explored through convection-permitting ensemble sensitivity experiments [J]. *J. Atmos. Sci.*, 75(2): 401–424. doi:10.1175/JAS-D-17-0137.1

Peng M S, Reynolds C A. 2006. Sensitivity of tropical cyclone forecasts as revealed by singular vectors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63(10): 2508–2528. doi:10.1175/JAS3777.1

Rotunno R, Snyder C, Judt F. 2023. Upscale versus “Up-Amplitude” growth of forecast-error spectra [J]. *J. Atmos. Sci.*, 80(1): 63–72. doi:10.1175/JAS-D-22-0070.1

Selz T, Craig G C. 2015. Upscale error growth in a high-resolution simulation of a summertime weather event over Europe [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143(3): 813–827. doi:10.1175/MWR-D-14-00140.1

Sun Y, Zhong Z, Yi L, et al. 2015. Dependence of the relationship between the tropical cyclone track and western Pacific subtropical high intensity on initial storm size: A numerical investigation [J]. *J. Geophys. Res.: Atmos.*, 120(22): 11451–11467. doi:10.1002/2015JD023716

- Torn R D, Hakim G J. 2009. Initial condition sensitivity of western Pacific extratropical transitions determined using ensemble-based sensitivity analysis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137(10): 3388–3406. doi:10.1175/2009MWR2879.1
- Torn R D, Whitaker J S, Pegion P, et al. 2015. Diagnosis of the source of GFS medium-range track errors in hurricane Sandy (2012) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143(1): 132–152. doi:10.1175/MWR-D-14-00086.1
- Torn R D, Elless T J, Papin P P, et al. 2018. Tropical cyclone track sensitivity in deformation steering flow [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146(10): 3183–3201. doi:10.1175/MWR-D-18-0153.1
- 王海平, 董林, 许映龙, 等. 2022. 台风“烟花”的主要特点和路径预报难点分析 [J]. *海洋气象学报*, 42(1): 83–91. Wang Haiping, Dong Lin, Xu Yinglong, et al. 2022. Analysis on main characteristics of typhoon In-fa and difficulties in its track forecast [J]. *Journal of Marine Meteorology (in Chinese)*, 42(1): 83–91. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2022.01.009
- Wang Y Q, Heng J Y. 2016. Contribution of eye excess energy to the intensification rate of tropical cyclones: A numerical study [J]. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 8(4): 1953–1968. doi:10.1002/2016MS000709
- 吴胜蓝, 漆梁波, 邹兰军. 2023. 台风灿都路径预报中的非绝热加热因子分析 [J]. *气象*, 49(7): 805–818. Wu Shenglan, Qi Liangbo, Zou Lanjun. 2023. Analysis of diabatic heating factor in track forecast of typhoon Chanthu [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 49(7): 805–818. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.122201
- Xiang B Q, Lin S J, Zhao M, et al. 2015. Beyond weather time-scale prediction for hurricane Sandy and super typhoon Haiyan in a global climate model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143(2): 524–535. doi:10.1175/MWR-D-14-00227.1
- 向纯怡, 许映龙, 高拴柱, 等. 2022. 2021 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析 [J]. *气象*, 48(9): 1195–1208. Xiang Chunyi, Xu Yinglong, Gao Shuanzhu, et al. 2022. Analysis of the characteristics and forecast difficulties of typhoon over the western North Pacific in 2021 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 48(9): 1195–1208. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.053001
- Xu J, Wang Y Q. 2010. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138(11): 4135–4157. doi:10.1175/2010MWR3335.1
- 许映龙, 张玲, 高拴柱, 2010. 我国台风预报业务的现状及思考 [J]. *气象*, 36(7): 43–49. Xu Yinglong, Zhang Ling, Gao Shuanzhu, 2010. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting. *Meteorological Monthly*, 36(7): 43–49.
- Yu H, Chen P Y, Li Q Q, et al. 2013. Current capability of operational numerical models in predicting tropical cyclone intensity in the western North Pacific [J]. *Wea. Forecasting*, 28: 353–367. doi:10.1175/WAF-D-11-00100.1
- 岳健, 董林, 陈静, 等. 2023. 基于再分析尺度化因子的集合预报初值扰动对台风烟花 (2106) 预报的影响 [J]. *气象*, 49(7): 773–789. Yue Jian, Dong Lin, Chen Jing, et al. 2023. Effect of ensemble initial perturbations with rescaling on the forecast of typhoon In-Fa (2106) [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 49(7): 773–789. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2023.032901
- Zhang F Q, Bei N F, Rotunno R, et al. 2007. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Convection-permitting experiments and multistage error growth dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 64(10): 3579–3594. doi:10.1175/JAS4028.1
- 中国气象局. 2018. 中国气象灾害年鉴 2017 [M]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2018. Yearbook of Meteorological Disasters in China 2017 [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Zhou F F, Yamaguchi M, Qin X H. 2016. Possible sources of forecast errors generated by the global/regional assimilation and prediction system for landfalling tropical cyclones. Part I: Initial uncertainties [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(7): 841–851. doi:10.1007/s00376-016-5238-4
- Zhou F F, Duan W S, Zhang H, et al. 2018. Possible sources of forecast errors generated by the Global/Regional Assimilation and Prediction System for landfalling tropical cyclones. Part II: Model uncertainty [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 35(10): 1277–1290. doi:10.1007/s00376-018-7095-9
- 周非凡, 叶一苇, 段晚锁, 等. 2022. 伴随敏感性方法、第一奇异向量方法以及条件非线性最优扰动方法在台风目标观测敏感区识别中的比较研究 [J]. *大气科学*, 46(3): 677–690. Zhou Feifan, Ye Yiwei, Duan Wansuo, et al. 2022. Comparisons of adjoint sensitivity, leading singular vector, and conditional nonlinear optimal perturbations in the identification of sensitive areas for tropical-cyclone-targeted observations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 46(3): 677–690. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2202.22008