

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研究

周菲凡^{1,2,3} 叶一苇^{1,3} 张晗^{3,4} 杨雅雯^{3,4}

1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 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 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 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的路径和强度预报的影响。首先, 由 NCEP 再分析资料 (FNL) 驱动 WRF 模式, 对烟花进行长时间 (15 天)、高分辨率 (3km) 的模拟, 产生对照试验 (CTL_F); 然后, 由 ECMWF 的 ERA5 资料再次驱动 WRF 模式, 进行相同时间长度和分辨率的模拟, 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; 然后将二者的初始场作差, 并进行尺度分解, 以 200km, 2000km 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, 在前十天的预报中, 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, 说明在前十天的预报中, 中尺度误差起了决定性作用。而在后四天的预报中, 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。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, 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, 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 强度 数值模拟

文章编号

中图分类号 P457.8

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2405.24023

收稿日期 2024-06-22; **网络预出版日期**

作者简介 周菲凡, 女, 1982 年出生, 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, 1996 年出生, 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 42105079, 国家重点研发计划项目 2017YFC1501601

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 42105079), and National Key Research and Development Program of China (Grants 2017YFC1501601)

The impacts of different-scale initial errors on the track and intensity simulated-forecasts of typhoon In-fa (2021)

Feifan Zhou^{1,2,3}, Yiwei Ye^{1,3}, Han Zhang^{3,4}, and Yawen Yang^{3,4}

1 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 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstracts A long-lived tropical cyclone that occurred on North West Pacific called In-fa has been studied. Two kinds of data, one is ERA-5, another is FNL are used to produce the initial values for model integration. The ERA-5 data is taken as reference, the difference between FNL and ERA-5 is taken as perturbation. By decomposing the perturbation into different kind of scales, we reveal the impacts of different-scale initial perturbations on the forecasts of tropical cyclone. The results indicate that, whether it is intensity forecasting or track forecasting, the impact of mesoscale errors is most significant in the first ten days of forecasting. After adding mesoscale errors, the typhoon track tends to add up all the errors, and the intensity also tends to add up all the errors, indicating that mesoscale errors played a decisive role in the forecast for the first ten days. In the next four days of forecasting, the contributions of large-scale and small-scale errors gradually become prominent, and the effects of the three scale errors are equivalent. In addition, mesoscale errors in the early stage caused the typhoon track to be eastward and stronger, while large and small scale errors caused the typhoon track to be westward and weaker. The analysis of the reasons shows that the mesoscale error field has a higher similarity with the entire error field, that is, the information of the entire error field is mainly reflected in the mesoscale error, so the role of mesoscale error in the early stage is significant. In addition, the superimposed mesoscale error field has a stronger initial strength for the background wind, and the eastward track results in a later landing time. Therefore, mesoscale error leads to a stronger typhoon intensity. However, due to the large and small scale errors causing the typhoon track to be westward and make landfall earlier, the overall strength of the typhoon is weaker.

Key words Scale decomposition, initial error, typhoon track, 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（王海平等, 2022；Chen et al., 2021），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，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重要来源（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 2 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) 2 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 2 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 500km 范围内的引导流的不确定（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，而且还会影响西太副高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风场极为敏感。Nystrom et al. (2018)以距离热带气旋中心 300km 为界，考查该界限内外初始条件的不确定性对 2015 飓风 Joaquin 路径和强度预报的影响，结果表明 300km 以外区域，特别是 600km 到 900km 之间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 300km 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初值敏感区的区域，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，也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 500km 和 1500km 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，也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 天，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 天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; Camargo et al., 2019），那么是什么原因导致了 5 天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，进而寻找其长时间路径及强度预报初始场不确定性的主要来源，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 日在西北太平洋洋面生成，19 日 00 时加强为强热带风暴级，20 日 06 时加强为台风级，21 日 03 时加强为强台风级。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，登陆强度为台风级，中心最大风速 38m/s。“烟花”在舟山岛滞留了 5h、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级，中心最大风速 28m/s。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，最后一路北上经过安徽、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的强降水（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，中央气象台在对其的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。模式分辨率为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ ，水平网格数为 2400×2000 ，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 3km，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，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（ $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ）再分析资料（简称 ERA5），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，仅考虑初始误差对 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 天）、高分辨率（3km）的数值敏感性试验。首先，由 NCEP 再分析资料（FNL）驱动模式，对烟花进行长时间模拟，产生对照试验（CTL_F）；然后，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；再将二者的初始场作差，进行尺度分解，以 200km, 2000km 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（Durrant et al., 2017; Rotunno et al., 2022），对初始误差进行谱分解，按照 200km 和 2000km 范围的水平尺度分为小尺度、中尺度、大尺度的误差。二维离散傅立叶变换通常定义为：

$$F(u, v) = \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) e^{-j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

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

二维离散傅立叶逆变换定义为：

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})}$$

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

首先，比较由 NCEP 再分析资料（FNL）驱动模式和 ECMWF 的 ERA5 资料驱动模式的模拟结果。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 天的模拟结果较为一致，而在后 7 天则存在明显差异。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 天，用 ERA5 作为初始资料的路径模拟（CTL_E）略好于用 FNL 作为初始资料的路径模拟（CTL_F），而在后 7 天，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 3000km 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 1cd），但是在前 7 天，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；

而最大风速在三四天的迅速减小之后又有所上升，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 和图 1d 可见，前 5 天 CTL_E 的强度模拟略好于 CTL_F 的模拟，而 5 天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。

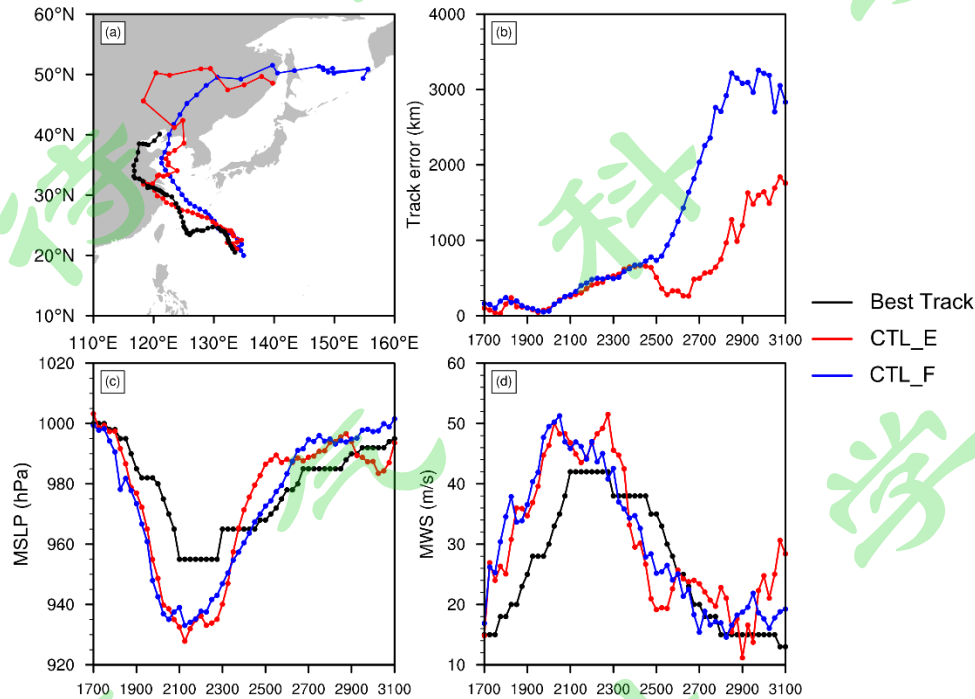


图 1 2021 年台风烟花 14 天的观测和模拟的路径和强度对比图（起报时间 17 日 00 时）。(a) 路径(黑线：观测；蓝线：CTL_F 的模拟结果；红线：CTL_E 的模拟结果)；(b) 路径误差（蓝线：CTL_F 的误差；红线：CTL_E 的误差）；(c) 最小海平面气压(黑线：观测；蓝线：CTL_F 的模拟结果；红线：CTL_E 的模拟结果)；(d) 最大风速(黑线：观测；蓝线：CTL_F 的模拟结果；红线：CTL_E 的模拟结果)

Fig.1 Comparison of track and intensity between Best Track archives and model simulation for 14 days (starting at 00 h on 17th July) for typhoon In-fa in 2021. (a) Track, (b) Track error, (c) Minimum sea level pressure, (d) Maximum wind speed. Black for Best Track, blue for the model results of CTL_F, and red for that of CTL_E.

首先分析 CTL_F 和 CTL_E 的初始场以及它们的差值场。图 2 给出了初始时刻 CTL_F 和 CTL_E 的 500hPa 高度场、海平面气压场、风场以及两者高度场和气压场的差。由图可见，CTL_F 和 CTL_E 整体环流形势较为一致（图 2abde），其中，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 2cf），且其副高比 CTL_E 副高偏东一些（图 2ab），从二者的差值场上可以看出，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 天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，也即 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,维持台风眼结构并提高加热的动力效率,使气旋更快增强(Haurwitz B, 1935; Wang and Heng, 2016)。这种机制可能导致了 CTL_F 的台风在初始时刻强度更强一些,也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 4ab),二者的差值场显示差异最大处能达 16%(图 4c)。可见,CTL_E 的台风水汽更为充足,环境场中也有更多的水汽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,产生复变压中心,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 4def),随后 CTL_F 的台风的西北偏北方向有较强的复变压中心(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。

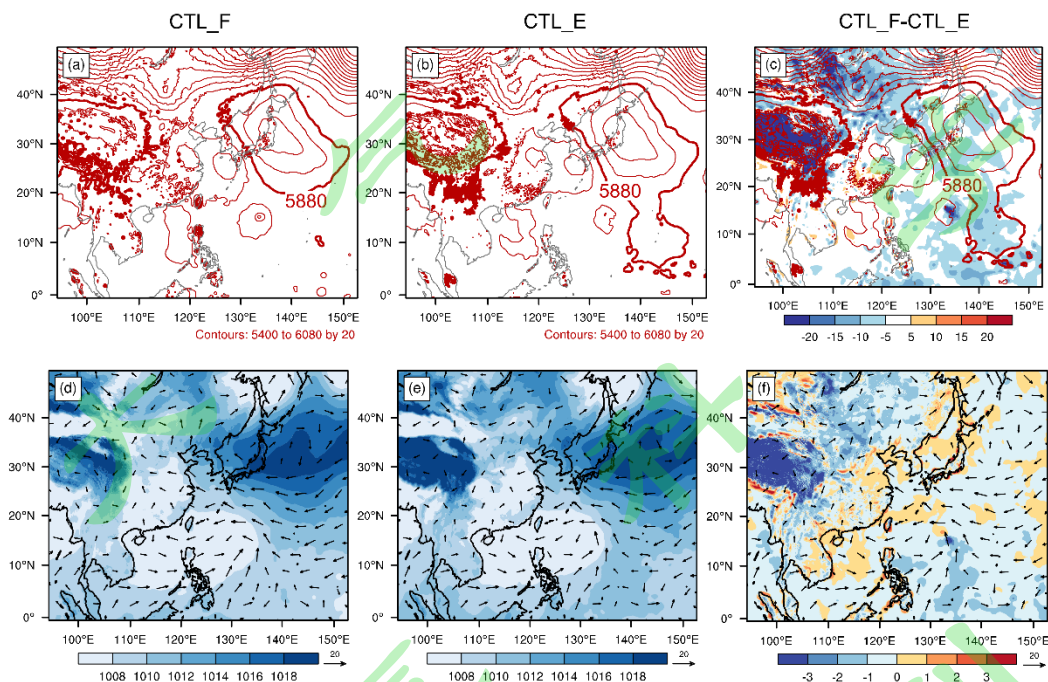


图 2 初始时刻(a)、(b) CTL_F 和 CTL_E 500 hPa 上的高度场(等值线), (c) CTL_F 与 CTL_E 500 hPa 高度场的差值场(阴影)叠加 CTL_E 的 500 hPa 上的高度场(等值线); (d)、(e) CTL_F 和 CTL_E 海平面气压场(阴影, 单位: hPa)和 wind 场(箭头, 单位: m s^{-1}), (f) CTL_F 与 CTL_E 海平面气压场的差值场叠加 CTL_E 风场。加粗红线为 5880 线。

Fig. 2 (a, b) 500hPa potential height (contour lines) of CTL_F and CTL_E at the initial time, (c) Difference (shaded) of potential height between CTL_F and CTL_E overlapped with 500hPa potential height (contour lines) of CTL_E. The bold red lines refer to 5880 geopotential meters. (d, e) Sea level pressure field (shaded, unit: hPa) of CTL_F and CTL_E with wind field (arrows, unit: m s^{-1}), (f) Difference of sea level pressure between CTL_F and CTL_E (shaded) overlapped with wind field (arrows) of CTL_E.

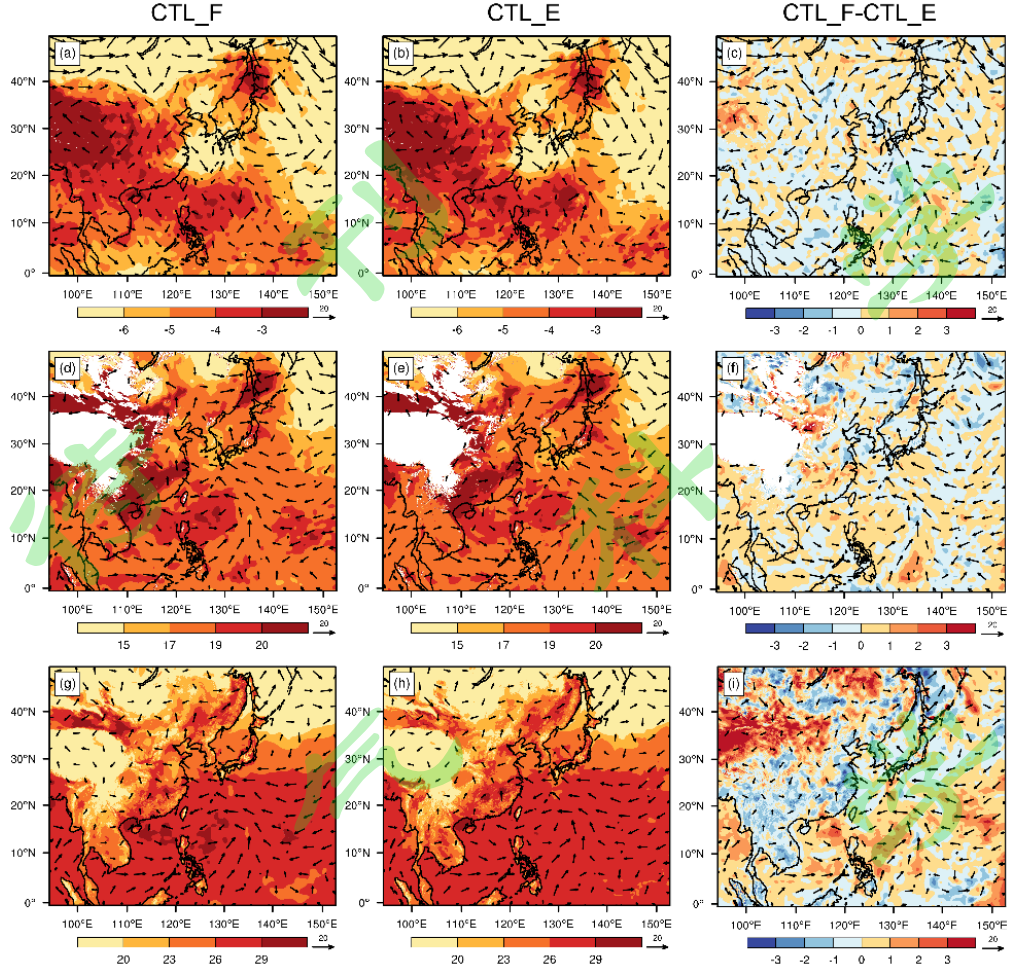


图3 (a、d、g) CTL_F、(b、e、h) CTL_E 的初始场的 (a、b) 500 hPa、(d、e) 850 hPa、(g、h) 地面的温度场 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 以及 (c、f、i) 各高度层上 CTL_F 和 CTL_E 温度场的差值场叠加 CTL_E 的风场。

Fig. 3 The temperature field (shaded, unit: degree Celsius) at (a, b) 500 hPa, (d, e) 850 hPa, (g, h) surface of (a, d, g) CTL_F and (b, e, h) CTL_E overlapped with corresponding-height wind field (arrows, unit: m s^{-1}) at the initial time. (c, f, i) The difference of temperature between CTL_F and CTL_E (shaded) with wind field (arrows) of CTL_E for each height.

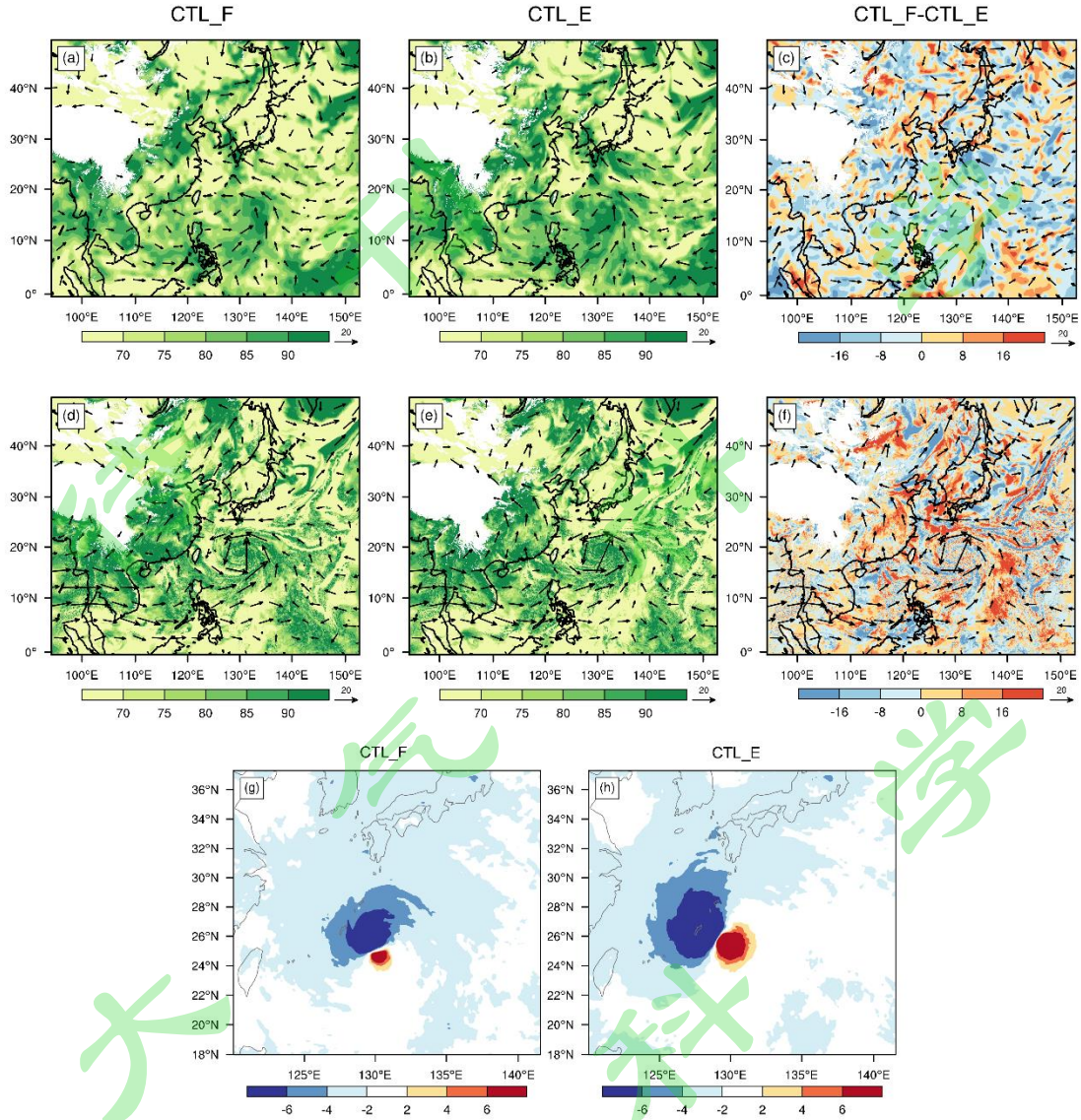


图4 (a、d) CTL_F、(b、e) CTL_E 的 (a、b、c) 初始场与 (d、e、f) 20 日 00 时的 850 hPa 相对湿度场 (阴影, 单位: %)、风场 (箭头, 单位: m s^{-1}), (c、f) CTL_F 与 CTL_E 850 hPa 相对湿度场的差值场叠加 CTL_E 风场, (g、h) CTL_F 与 CTL_E 在 21 日 00 时的 6 小时变压图 (海平面气压, 阴影, 单位: hPa)。

Fig. 4 The relative humidity field (shaded, unit: %) at 850 hPa of (a, d) CTL_F and (b, e) CTL_E with wind field (arrows, unit: m s^{-1}) at the initial time (a, b) and 00 h 20th July (d, e). (c, f) The difference of relative humidity between CTL_F and CTL_E (shaded) with wind field (arrows) of CTL_E for each time. (g, h) The 6h- change of pressure (unit: hPa) at sea surface level at 00 h 21th July, for CTL_F (g) and CTL_E (h), respectively.

接着, 将上述初始时刻的差值场进行尺度分解, 以 200km, 2000km 为界限, 分解成 3 种尺度的误差, 称大于 2000km 的尺度误差为大尺度误差, 200km~2000km 的尺度误差为中尺度误差, 小于 200km 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

首先考察不同尺度误差对路径预报的影响。从图 5ab 可见，在前十天的预报中，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（也即 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。

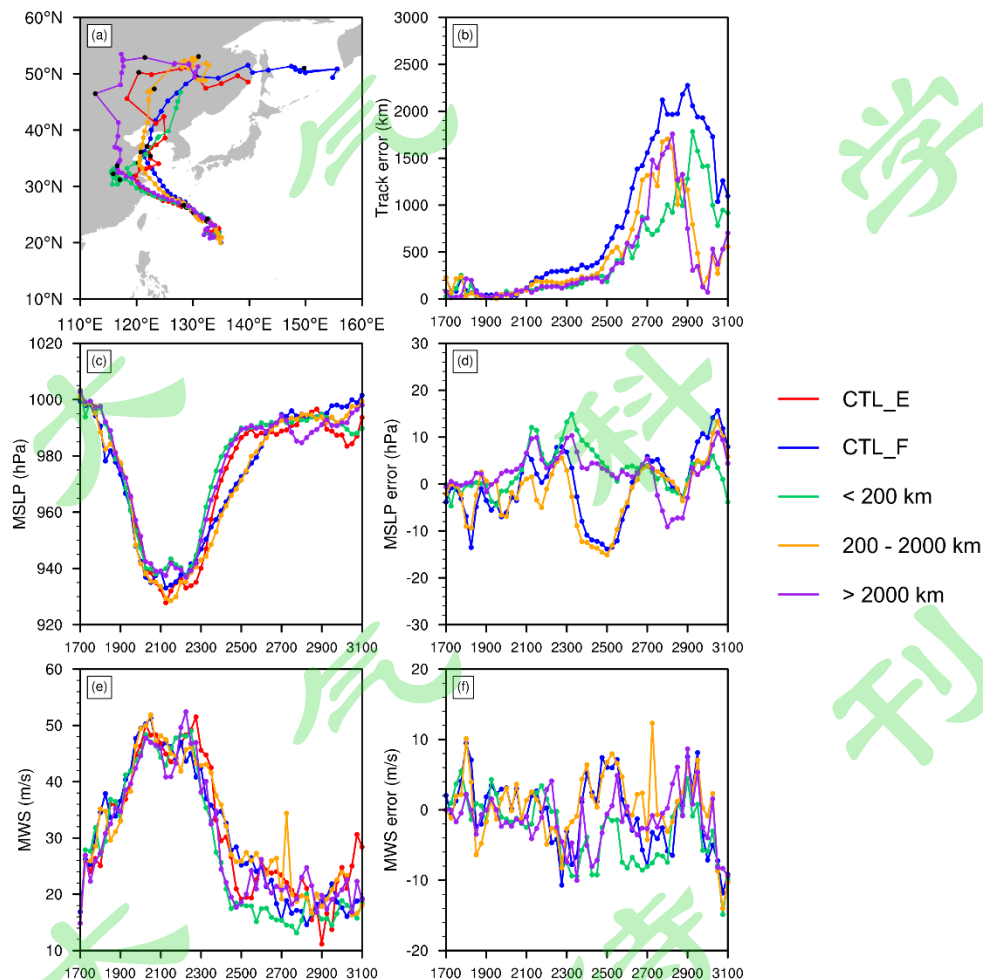


图 5 不同尺度初始扰动对台风烟花的模拟结果的影响分析。(a、c、e) 台风烟花 17 日 00 时至 31 日 00 时的 (a) 路径、(c) 最低海平面气压 (单位: hPa)、(e) 最大风速 (单位: ms^{-1})。 (b、d、f) CTL_F 及不同尺度初始扰动叠加后模拟结果与 CTL_E 的 (b) 路径偏差 (单位: km)、(d) 最低海平面气压差 (单位: hPa)、(f) 最大风速差 (单位: ms^{-1})。 (a) 中黑色标记点表示不同模拟结果中 19 日 00 时、21 日 00 时、

25 日 00 时、27 日 00 时、29 日 00 时台风所在位置。

Fig. 5 The impacts on the simulation results of In-fa by adding initial perturbations with different scales. (a) Track, (c) Minimum sea level pressure (unit: hPa), (e) Maximum wind speed (unit: m s⁻¹) of In-fa from 00 h 17th to 00 h 31st. (b) Track error (unit: km), (d) Minimum sea level pressure error (unit: hPa), (f) Maximum wind speed error (unit: m s⁻¹) of the model results of CTL_F, CTL_E and those with different scales perturbances. The black dots in (a) refer to the positions of In-fa at 00 h 19th, 00 h 21st, 00 h 25th, 00 h 27th, 00 h 29th.

接着考察不同尺度误差对强度预报的影响。由图 5cdef 可见，在 22 日 00 时之前，也即在台风的增强阶段，不论从中心气压还是最大风速看，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。此外，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，也即使得台风更强。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 5ce），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，也即使得台风变弱。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 5ce），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。

总的说，不论是强度预报，还是路径预报，在前十天的预报中，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，说明在前十天的预报中，中尺度误差起了决定性作用。而在后四天的预报中，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图，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 天之前一直有明显增长，7 天之后也趋近饱和；而大尺度误差在整个模拟预报阶段都有增长。已有许多研究指出，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 说明了这一点，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 500hPa 高度场结果与 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十天台风的强度偏强？下文将就这些问题进行分析。

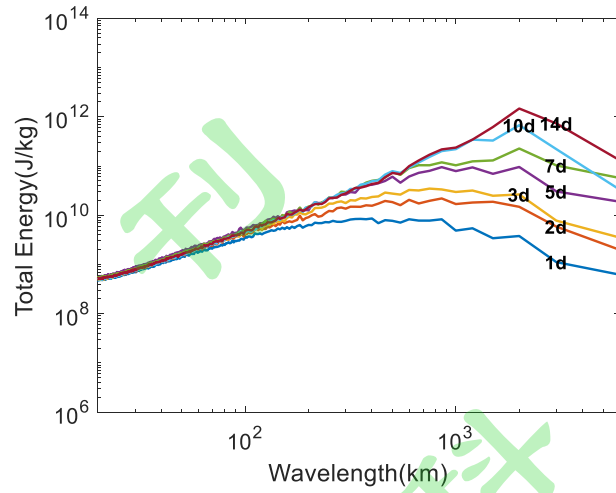


图 6 初始场叠加小尺度误差后在不同预报时刻的误差场能谱图。初始时刻为 17 日 00 时，1d 表示 18 日 00 时，2d 表示 19 日 00 时，以此类推。

Fig. 6 Energy spectrum of errors for different simulation time after adding small scale error into the initial field. The initial time is 00 h 17th, 1d referring to 00 h 18th, 2d referring to 00 h 19th, and so on.

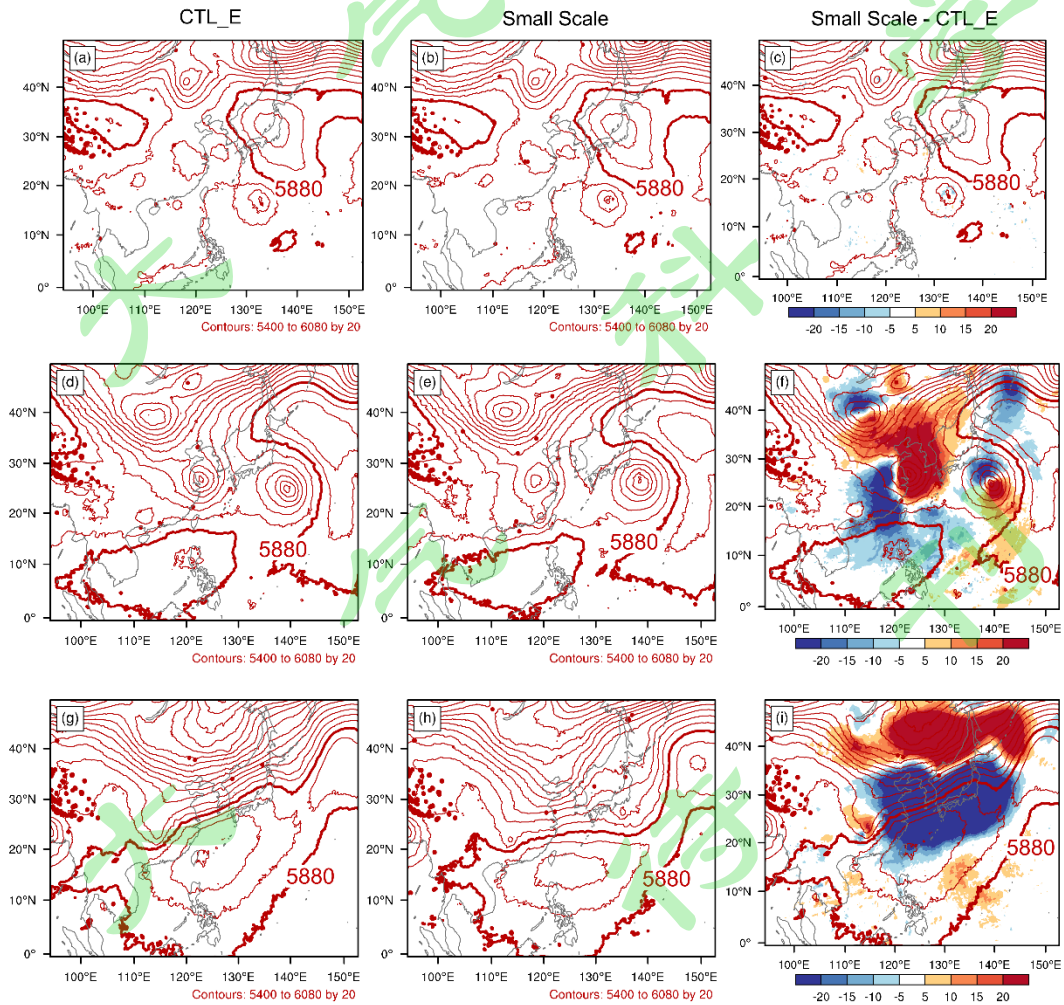


图 7 (a、d、g) CTL_E、(b、e、h) 叠加小尺度误差后模拟得到的 (a、b) 18 日 00 时、(d、e) 26 日 00 时、(g、h) 30 日 00 时的 500hPa 高度场以及 (c、f、i) 各时刻叠加小尺度误差后模拟得到的和 CTL_E 500hPa 高度场的差值场叠加 CTL_E 的 500hPa 高度场。加粗红线为 5880 线。

Fig. 7 500hPa potential height field (contour lines) of (a, d, g) CTL_E and (b, e, h) those with small scale errors at (a, b) 00 h 18th, (d, e) 00 h 26th and (g, h) 00 h 30th. (c, f, i) The difference of potential height (shaded) between CTL_E and those with small scale errors overlapped with 500hPa potential height (contour lines) of CTL_E. The bold red lines refer to 5880 geopotential meters.

3.3 原因分析

首先分析中尺度误差与原有误差场，也即误差分解前原场的相似性。由图 8ac 可以看出，纬向风场的中尺度误差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。

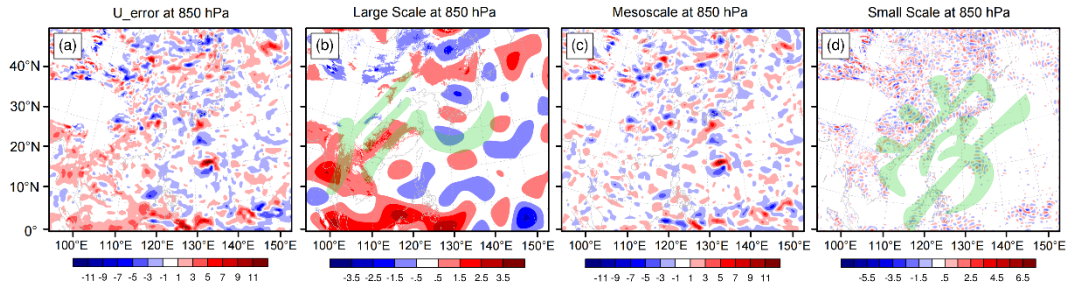


图 8 (a) CTL_F 与 CTL_E 的纬向风在 850hPa 上的差值场（单位：m s⁻¹），(b、c、d) 上述差值场分解成大、中、小尺度三个场后的形态。

Fig. 8 (a) The error field of u-component wind (unit: m s⁻¹) of CTL_F and CTL_E at 850 hPa, (b, c, d) The error fields of u-component wind decomposed into large, meso- and small scales.

那么为何叠加了中尺度误差后会导致较大的路径偏移？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。其中，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路径偏差产生的一个重要原因。

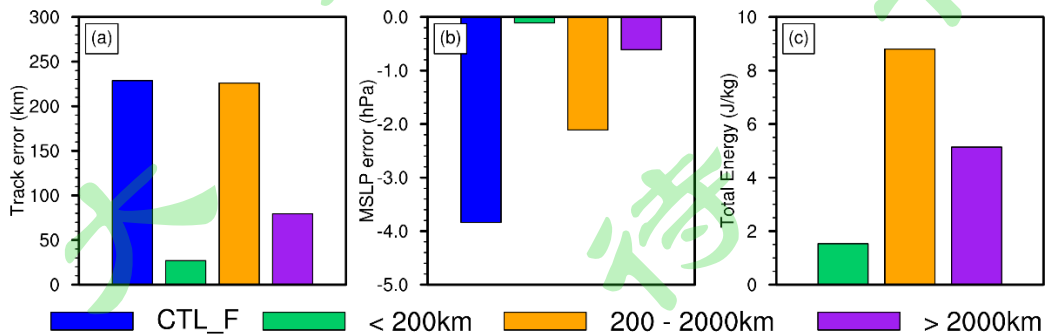


图 9 17 日 00 时，CTL_F（蓝色）、以及叠加了小尺度误差（绿色）、中尺度误差（橘色）和大尺度误差（紫色）后的相对于 CTL_E 的 (a) 初始台风中心位置差和 (b) 中心最小海平面气压差，以及 (c) 误差

场的湿能量。

Fig. 9 (a) Position error, (b) Minimum sea level pressure error, and (c) Total energy of error of CTL_F (blue bar), small scale (green bar), mesoscale (orange bar) and large scale (purple bar) with respect to the corresponding things of CTL_E at 00 h 17th.

这里需要指出的是，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 5abc）；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也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有较大影响力的原因之一。

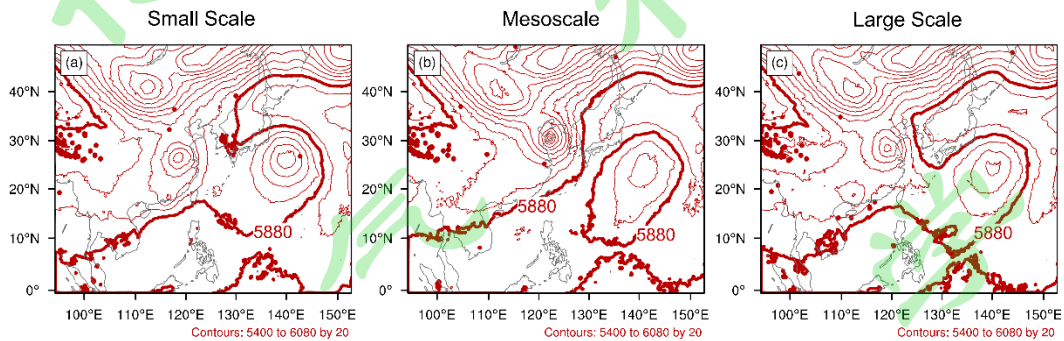


图 10 小尺度 (a)、中尺度 (b) 和大尺度 (c) 误差场叠加后 25 日 12 时 500 hPa 位势高度场。

Fig. 10 500hPa potential height at 12 h 25th after adding (a) small, (b) meso- and (c) large scales errors. The bold red lines refer to 5880 geopotential meters.

最后分析叠加中尺度误差后台风在前十天的强度偏强的原因。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，在数值模拟试验中初始较强的台风有益于其后维持较高的强度（岳键等，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 天）、高分辨率（3km）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 NCEP 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 200km, 2000km 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，在前十天的预报中，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，说明在前十天的预报中，中尺度误差起了决定性作用。而在后四天的预报中，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。

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初始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，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。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，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 天预报中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，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。当然，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。

参考文献 (References)

- Camargo S J, Krouse K D, Sobel A H, et al. 2019. Subseasonal tropical cyclone genesis prediction and MJO in the S2S dataset [J]. *Weather and Forecasting*, 33(3): 967-988. doi: 10.1016/j.tcr.2019.10.004.
- Durran D, Weyn J A, Menchaca M Q. 2017. Practical Considerations for Computing Dimensional Spectra from Gridded Data [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 145: 3901-3910. doi: 10.1175/MWR-D-17-0056.1.
- Doyle J D, Reynolds C A, Amerault C, et al. 2012. Adjoint sensitivity and predictability of tropical cyclogenesis [J]. *J. Atmos. Sci.*, 69: 3535-3557.
- 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: 320-342.
- Emanuel K, and Zhang F. 2017. The role of inner-core moisture in tropical cyclone predictability and practical forecast skill [J]. *J. Atmos. Sci.*, 74: 2315-2324.
- 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: 721-727.
- Haurwitz B. 1935. The height of tropical cyclones and of the "eye" of the storm [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 63: 45-49. doi: 10.1175/1520-0493(1935)63<45:THOTCA>2.0.CO;2.
- Nystrom R, Zhang F, Munsell E B, et al. 2018. Predictability and dynamics of Hurricane Joaquin (2015) explored through convection permitting ensemble sensitivity experiments [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 75: 401-424.

- Peng M S, Reynolds C A. 2006. Sensitivity of tropical cyclone forecasts as revealed by singular vectors [J]. *J. Atmos. Sci.*, 63: 2508-2528.
- Rotunno R, Snyder C, Judt F. 2022. Upscale versus “Up-Amplitude” Growth of Forecast-Error Spectra [J]. *J. Atmos. Sci.*, 80: 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: 813–827.
- 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: 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: 3388-3406.
- 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: 132-152.
- Torn R D, Elless T J, Papin P, et al. 2018. Tropical cyclone track sensitivity in deformation steering flow [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146: 3183-3201.
- 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: 1953–1968. doi:10.1002/2016MS000709.
- Wu L T, Su H, Fovell R G, et al. 2015. Impact of environmental moisture on tropical cyclone intensification [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 15: 14041–14053. doi: 10.5194/acp-15-14041-2015.
- 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, and Coauthors. 2015. Beyond Weather Time-Scale Prediction for Hurricane Sandy and Super Typhoon Haiyan in a Global Climate Model [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143: 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(09): 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. 2010. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 4135-41577.
- 袁娟娟,丁治英,王莉. 2011. 1949-2007 年登陆我国变性热带气旋的特征统计及合成分析[J]. *热带气象学报*, 27(04): 529-541. Yuan Juanjuan, Ding Zhiying, Wangli. A statistical study and composite analysis on the characteristics of the extratropical transition of landfall typhoons during 1949—2007 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 27(04): 529-541. doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2011.04.010.
- 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(07): 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, Bei N, Rotunno R, et al. 2007. Mesoscale predictability of moist baroclinic waves: Convection-permitting experiments and multistage error growth dynamics [J]. J. Atmos. Sci., 64: 3579-3594.
- 张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化 [J]. 大气科学, 36 (5): 912-928. Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. 2012. Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 912-928. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11158.
- Zhou F F, Yamaguchi M, Qin X H. 2016. Possible sources of forecast errors generated by the GRAPES model 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, 张贺. 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