

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 J, Dong L, Chen J, et al, 2023. Effect of ensemble initial perturbations with rescaling on the forecast of Typhoon In-Fa (2106)[J]. Meteor Mon, 49(7):773-789(in Chinese).

## 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<sup>\*</sup>

岳 健<sup>1,3</sup> 董 林<sup>2</sup> 陈 静<sup>1,3</sup> 王婧卓<sup>1,3</sup> 李红祺<sup>1,3</sup>

1 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

2 国家气象中心, 北京 100081

3 灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

**提 要:** 为考察基于再分析尺度化因子的集合变换卡尔曼滤波(ETKF\_R)初值扰动方案对台风预报的影响, 利用中国气象局区域集合预报系统(CMA-REPS)开展了 2021 年 7 月 18—29 日的回算试验, 分析了初值扰动结构对登陆台风烟花路径和强度预报的影响, 并与 ECMWF 和 NCEP 全球集合预报进行对比。结果显示: ETKF\_R 方法改善了初始三维风场的扰动幅度和结构, 但台风初始位置和强度的离散度偏小; ETKF\_R 方法能合理降低对台风路径预报起关键作用的天气系统的集合离散度, 从而限制台风移速和移向的过度发散, 提高“烟花”全生命史的路径集合平均预报技巧, 并改善台风路径集合平均误差与离散度关系; ETKF\_R 预报前 24 h 台风结构和强度的离散度能快速增长, 其 24 h 后台风强度集合平均预报效果与 ETKF 方案基本相当; 与国际先进的全球集合预报相比, ETKF\_R 对“烟花”登陆的预报效果最优, 其统计平均的 0~2 d 路径预报误差与 ECMWF 集合相当, 而 NCEP 集合的 0~2 d 路径预报误差最小, 但过发散特征明显; 同时, ECMWF 集合对“烟花”的强度预报总体严重偏弱, 而 NCEP 集合对预报台风最大强度的准确性较高, 但预报的台风增强速度比 ETKF\_R 慢。上述研究结果表明, CMA-REPS 的台风路径和强度预报具有业务参考价值。

**关键词:** 再分析尺度化因子, 初值扰动, 台风路径, 台风强度

**中图分类号:** P456, P458

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2023.032901

## Effect of Ensemble Initial Perturbations with Rescaling on the Forecast of Typhoon In-Fa (2106)

YUE Jian<sup>1,3</sup> DONG Lin<sup>2</sup> CHEN Jing<sup>1,3</sup> WANG Jingzhuo<sup>1,3</sup> LI Hongqi<sup>1,3</sup>

1 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Beijing 100081

**Abstract:** To investigate the effect of the ensemble transform Kalman filter with rescaling (ETKF\_R) initial perturbation method on typhoon forecasting, we perform retrospective experiments from 18 to 29 July 2021 using China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System (CMA-REPS). The effect of the initial perturbation structure on the track and intensity forecasts of Typhoon In-Fa is analyzed and compared with the ECMWF and NCEP global ensemble forecasts. The results can be summarized as follows. The ETKF\_R method improves the amplitude and structure of initial three-dimensional

<sup>\*</sup> 国家重点研发计划(2021YFC3000902、2017YFC1501604)、中国气象局地球系统数值预报中心青年基金项目(NWPC-QNJ-2018)共同资助

2022 年 6 月 24 日收稿; 2023 年 1 月 19 日收修定稿

第一作者: 岳健, 主要从事台风数值模拟和集合预报研究. E-mail: yuej@cma.gov.cn

通讯作者: 董林, 主要从事台风预报和研究. E-mail: donglin@cma.gov.cn

wind field perturbations, but the initial ensemble spreads of typhoon location and intensity are small. By reasonably reducing the ensemble spread of weather system which significantly influences the forecast of typhoon track, ETKF\_R can constrain the excessive dispersion of typhoon translation speed and direction. This further improves the ensemble mean track forecast skill for the whole life of Typhoon In-Fa and the relationship between ensemble mean error and ensemble spread of typhoon track. In ETKF\_R, the ensemble spreads of typhoon structure and intensity grow rapidly in the first 24 h, and the performance of ensemble mean intensity forecast after 24 h is comparable to that of the ETKF method without rescaling. Compared with the international advanced global ensemble forecasts, ETKF\_R has the best landfalling forecast of Typhoon In-Fa. The statistically averaged 0–2 d track forecast error of ETKF\_R is comparable to that of ECMWF ensemble. Although NCEP ensemble has the smallest 0–2 d track forecast error, its overdispersed feature is obvious. Meanwhile, ECMWF ensemble generally underestimates the intensity of Typhoon In-Fa, while NCEP ensemble has a high accuracy in predicting the maximum intensity of Typhoon In-Fa, with a slower intensification speed than ETKF\_R. Our results suggest that the forecast of typhoon track and intensity by CMA-REPS has operational significance of reference.

**Key words:** rescaling with reanalysis, initial perturbation, typhoon track, typhoon intensity

## 引 言

提高台风路径和强度预报水平是防御台风灾害的关键,准确的预报能有效降低登陆台风给沿海地区带来的暴雨、大风以及风暴潮等灾害损失(Yue et al, 2017; 吴影等, 2017; 王秀荣等, 2018)。国内外热带气旋预报水平的提高在很大程度上得益于计算机技术的发展和数值模式理论及方法的进步(Yue and Meng, 2017; Leroux et al, 2018; 麻素红等, 2021)。近 30 年来,西北太平洋和南海台风路径预报能力明显提高,当前的 72 h 预报准确率已达到 20 世纪 90 年代初的 24 h 预报准确率(Yu et al, 2022)。相比之下,全球热带气旋强度预报水平在过去几十年却进步缓慢(Emanuel and Zhang, 2016; Cangialosi et al, 2020; 吕心艳等, 2021; 陈国民等, 2022; 周冠博等, 2022)。

初值不确定性对热带气旋路径和强度预报技巧有较大影响。Yamaguchi et al(2012)用预报性能高的模式的初始场替换掉预报性能低的模式的初始场,发现初值误差对热带气旋 1~5 d 路径预报误差的贡献分别为 20%、29%、29%、38% 和 68%。Zhou et al(2016)考察了两种初始分析误差对西北太平洋热带气旋预报误差的影响,发现路径和强度预报技巧对热带气旋中心及附近的位势高度场和风场初值非常敏感,尤其在热带气旋加强阶段,初始强

度的不确定性估计对预报至关重要。由于观测仪器以及资料同化、涡旋初始化等技术方法会引入误差,模式初始场很难准确描述热带气旋的真实结构。即便是欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)等国际先进模式,其单一确定性预报有时也会出现较大的台风路径和强度预报偏差(沈越婷等, 2015)。

集合预报是描述数值模式初值不确定性的重要技术方法,也是提高热带气旋预报准确度及提供预报不确定性信息的重要手段(王晨稀, 2013; Bauer et al, 2015)。集合预报通过积分多个略有差异的初值或者略有差异的模式,获得对未来大气运动状态演变的不确定性估计。近 30 年来,全球各大业务数值预报中心相继建立起集合预报业务系统,发展了多种集合预报扰动技术,并广泛应用于中、短期天气预报(Molteni et al, 1996; 麻巨慧等, 2011; 陈静和李晓莉, 2020)。其中,初值扰动技术主要包括奇异向量法(Lorenz, 1965)、繁殖向量法(Toth and Kalnay, 1997)、扰动观测法(Houtekamer et al, 1996)、集合变换卡尔曼滤波(ensemble transform Kalman filter, ETKF)法(Wang and Bishop, 2003)、正交条件非线性最优扰动法(Duan and Huo, 2016)等。热带气旋的集合预报研究从 20 世纪 90 年代中期开始(Zhang and Krishnamurti, 1997; 黄小刚等, 2007),包括集合初始扰动幅度和三维结构对热带气旋路径离散度的影响机制(Yamaguchi and Majumdar,

2010),以及如何基于集合预报偏差修正改善热带气旋强度预报(黄小刚等,2010)等。

2008 年以来,基于自主研发的 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction System)数值天气预报模式(Chen et al,2008)和 ETKF 初值扰动方法发展了中国气象局区域集合预报系统(China Meteorological Administration-Regional Ensemble Prediction System, CMA-REPS)。CMA-REPS (原 GRAPES-REPS)不仅着眼于我国暴雨、强对流等灾害天气预报,也提供西北太平洋和南海热带气旋集合预报,在热带气旋业务预报中发挥着重要作用(王静等,2017;钟有亮等,2017;王婧卓等,2021)。对于区域集合预报关注的 1~3 d 短期天气预报而言,初值不确定性的准确描述比模式不确定性更加重要(Raynaud and Bouttier,2016;王婧卓等,2018)。本文针对基于再分析尺度化因子的 CMA-REPS 初值扰动改进方案,考察了初值扰动结构对 2021 年登陆台风烟花路径和强度预报的影响,并与 ECMWF 和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,NCEP)全球集合预报性能进行对比,分析了 CMA-REPS 对我国台风预报的价值,对明确改进方向及推动业务应用有重要意义。

## 1 方法与资料

### 1.1 再分析尺度化因子方法及试验设计

ETKF 方法是基于卡尔曼滤波理论和集合变换法发展而来,由集合预报扰动方差和观测误差方差快速估计分析误差,反映观测资料对初值不确定性的影响(Wang and Bishop,2003)。

$$\mathbf{Z}^a = \mathbf{Z}^i \mathbf{T} \quad (1)$$

$$\mathbf{Z}^a = \mathbf{Z}^i \mathbf{T} \mathbf{\Pi} \quad (2)$$

由式(1)可见,利用变换矩阵  $\mathbf{T}$  将当前时刻的预报扰动向量  $\mathbf{Z}^i$  进行线性组合更新为当前时刻的分析扰动向量  $\mathbf{Z}^a$ 。由于集合成员数远小于模式预报相空间的自由度,故式(1)得到的分析扰动方差小于真实的分析误差方差。为保证控制预报误差与集合预报离散度相吻合,Bowler et al(2008)在式(2)中引入放大因子  $\mathbf{\Pi}$ 。但是,ETKF 方法未充分考虑初始扰动分布特征(结构和振幅)与分析误差一致性

的问题,在分析不确定性较小的区域也可能出现局地扰动幅度过大,不能合理地表征观测密度波动对预报误差方差的影响。为解决这一问题,Wang et al (2021)参考约束的集合变换法(ensemble transform with rescaling,ETR)和地理掩膜(mask)增长模繁殖法,在 ETKF 中引入调整因子,建立了基于再分析尺度化因子的 ETKF\_R 初值扰动方案。

$$\text{mask} = \sqrt{\frac{(U_{\text{CMA\_ctl}} - U_{\text{EC}})^2 + (V_{\text{CMA\_ctl}} - V_{\text{EC}})^2}{2}} \quad (3)$$

$$K = \sqrt{\frac{(U_{\text{perb}} - U_{\text{CMA\_ctl}})^2 + (V_{\text{perb}} - V_{\text{CMA\_ctl}})^2}{2}} \quad (4)$$

$$r = \begin{cases} \frac{\text{mask}}{K} & \text{mask} < K \\ 1 & \text{mask} \geq K \end{cases} \quad (5)$$

$$\mathbf{Z}^a = \mathbf{Z}^i \mathbf{T} \mathbf{\Pi} r \quad (6)$$

在本文中,初值扰动改进方案 ETKF\_R 采用 ECMWF 再分析资料(水平分辨率为  $0.25^\circ$ )与 CMA-REPS 控制预报初始场(水平分辨率为  $0.1^\circ$ )风场的差异计算分析误差。如式(3)所示, $U_{\text{EC}}$  和  $V_{\text{EC}}$  分别表示 ECMWF 再分析场插值到 CMA-REPS 模式面的纬向风和经向风,其与 CMA-REPS 控制预报初始风场  $U_{\text{CMA\_ctl}}$  和  $V_{\text{CMA\_ctl}}$  的动能平方根定义为表征分析场不确定性的分析误差 mask。考虑到 ECMWF 再分析资料的时效性,并尽可能保留历史分析误差的特征,分析场不确定性采用起报时次前 40 d 到前 10 d 的 31 d 分析误差统计平均得到。式(4)将集合成员扰动风场  $U_{\text{perb}}$  和  $V_{\text{perb}}$  与控制预报初始风场  $U_{\text{CMA\_ctl}}$  和  $V_{\text{CMA\_ctl}}$  的动能平方根定义为初值扰动  $K$ ,则再分析尺度化因子  $r$ ,如式(5)所示,用以解决初始时刻局地扰动量过大的问题。将 ETKF 方案产生的分析扰动乘以调整因子,形成改进后的初值扰动,如式(6)所示。

通过与 ETKF 方案对比分析,本文旨在研究基于再分析尺度化因子的 ETKF\_R 初值扰动改进方案对 2021 年台风烟花路径和强度预报效果的影响。开展了两组回算试验,一组是采用式(2)产生初值扰动(即 ETKF),另一组是采用式(6)产生初值扰动(即 ETKF\_R)。CMA-REPS 区域集合预报系统参数配置如表 1 所示。模式水平分辨率为  $0.1^\circ$ ,垂直方向采用地形追随高度坐标,层次为 50 层(模式层顶为 10 hPa),预报区域为中国区域( $15^\circ \sim 65^\circ \text{N}$ 、

70°~145°E), 集合成员数 15 个(包含 1 个控制预报和 14 个扰动成员), 预报时效为 72 h, 控制预报初值和侧边界来源于 NCEP-GFS 全球模式分析场和预报场。通过从 2021 年业务升级的垂直 87 层中国气象局全球集合预报系统提取扰动背景场, 再与控制预报背景场相加以获得混合侧边界扰动。每个集合预报成员采用相同的物理过程, 包括 Kain-Fritsch (new Eta) 对流参数化方案(Kain, 2004)、WSM6 云微物理方案(Hong and Lim, 2006)、MRF 边界层方案(Hong and Pan, 1996)、Monin-Obukhov 近地面层方案(Noilhan and Planton, 1989)、RRTM 长波辐射方案(Mlawer et al, 1997)、Dudhia 短波辐射方案(Dudhia, 1989)、Noah 陆面过程方案(Chen and Dudhia, 2001)等。模式扰动采用单一物理过程参数化倾向随机扰动方案(袁月等, 2016)。试验时段为 2021 年 7 月 18—29 日(每日世界时 12 时起报, 共计 12 次预报)。需要说明的是, 为考察 ETKF\_R 初值扰动改进方案对台风预报的影响, 回算试验关闭了条件性台风涡旋重定位技术(吴政秋等, 2020)。

表 1 CMA-REPS 区域集合预报系统参数配置  
Table 1 Parameter configuration of CMA-REPS regional ensemble prediction system

参数项	参数配置
水平分辨率	0.1°
垂直层次	50 层
模式区域	15°~65°N, 70°~145°E
集合成员数	1 个控制预报+14 个扰动成员
物理过程	Kain-Fritsch(new Eta), WSM6, MRF,
参数化方案	Monin-Obukhov, RRTM, Dudhia, Noah

## 1.2 检验评估资料及方法

除了上述基于 CMA-REPS 的改进前和改进后的两组回算试验, 还通过全球通信系统(Global Telecommunication System, GTS)获取了与回算试验相同起报时次的 ECMWF(51 个成员; Palmer, 2019)和 NCEP(31 个成员; Zhou et al, 2022)全球集合预报的台风路径和强度资料。需说明的是, ECMWF 和 NCEP 集合分别缺少 29 日 12 时和 27 日 12 时起报的数据。为对比分析, 本文对三个集合预报系统均只考察 0~3 d 的台风路径和强度预报性能。检验评估采用中国气象局上海台风研究所整编的热带气旋最佳路径数据集(<https://tcdata.typhoon.org.cn/>; Ying et al, 2014; Lu et al, 2021)。降水实况和检验采用中国自动气象站的降水量数据。

本文采用的检验评估方法主要包括集合平均误差和离散度。误差计算方法采用国家标准《天气预报检验 台风预报》(国家市场监督管理总局和国家标准化管理委员会, 2019)。其中, 台风路径的集合平均误差是指路径集合平均预报与观测之间的地球表面距离, 台风强度的集合平均误差是指台风中心附近近地面最大风速集合平均预报与观测之间的绝对误差。离散度是表征集合样本发散程度的物理量, 计算如下:

$$\text{spread} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N-1}} \quad (7)$$

式中:  $N$  表示集合成员数。

本文插图中所涉及的中国国界和行政区域界线基于审图号为 GS(2019)1786 号标准地图制作, 底图无修改。

## 2 结果分析

### 2.1 台风“烟花”概况

2021 年 7 月 17 日 18 时(世界时, 下同), 6 号台风烟花在我国台湾岛以东 48 h 警戒线附近生成并向西北方向移动(图 1a)。19 日 00 时加强为强热带风暴级并转向偏西方向移动。21 日 00 时, “烟花”增强为强台风级( $42 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 随后进入 24 h 警戒区, 并缓慢由西行转为西北行; 23 日 00 时减弱为台风级并逐渐向浙江沿海靠近。“烟花”于 25 日 04:30 前后登陆浙江省舟山普陀沿海。登陆后, “烟花”长时间滞留在浙北和苏南, 28 日 00 时在安徽境内减弱为热带低压, 之后一路北上, 于 30 日 12 时在渤海减弱变性为温带气旋。

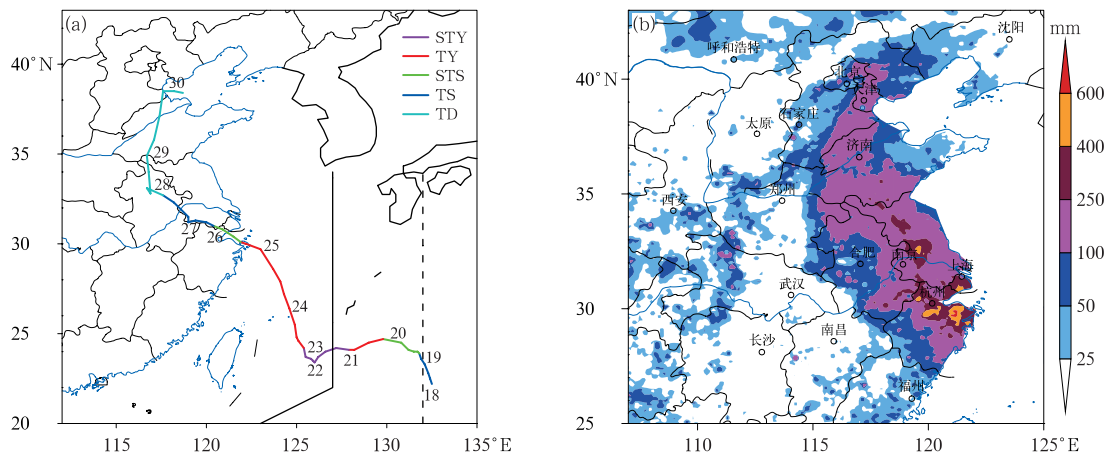
“烟花”是一个致灾性很强的台风, 其本体降水从 7 月 22 日开始在浙江出现并逐渐加强, 登陆后其强降水逐渐向上海、江苏、安徽、山东、河南以及京津冀等地区扩展(图 1b)。“烟花”突破了浙江省登陆台风降雨量纪录, 也是有记录以来影响江苏过程雨量最大的台风。此外, “烟花”在台湾以东洋面上缓慢西行的过程中, 与北侧的副热带高压和西南侧的 7 号台风查帕卡共同作用, 将大量水汽输送至我国内陆地区(Nie and Sun, 2022), 可能与“21·7”河南极端暴雨的发生有密切联系。



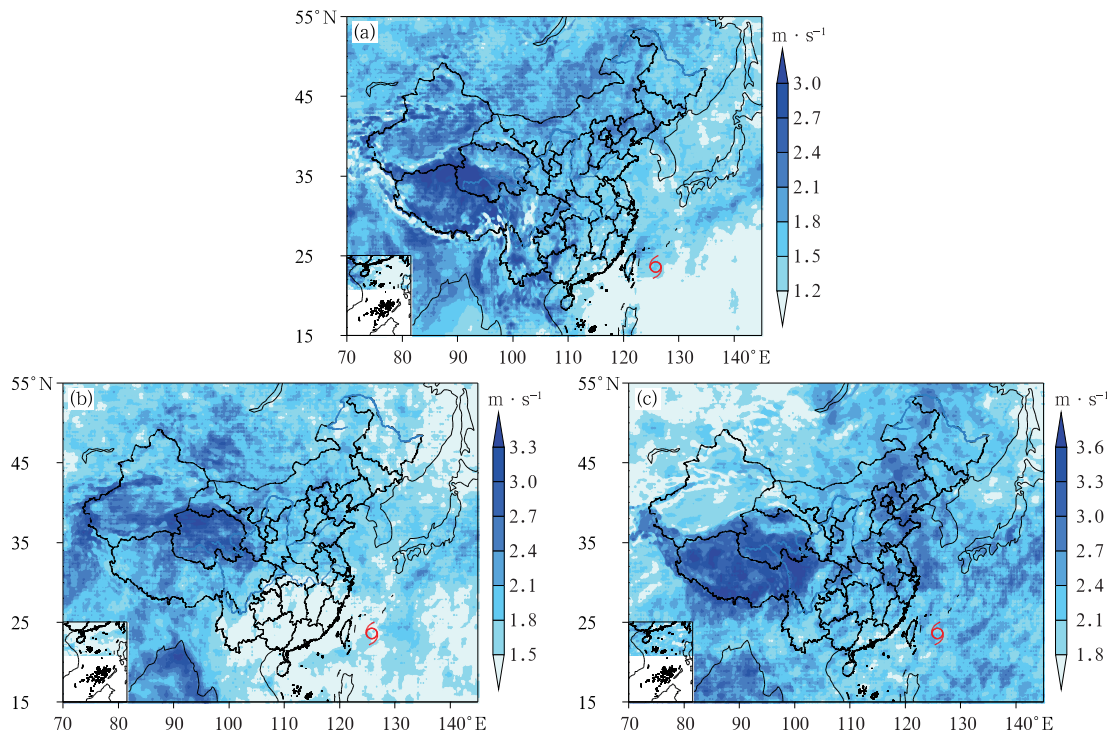
2.2 路径强度及风场

利用历史分析误差的统计平均能较好地估计分

析不确定性。由图 2 可见,在观测稀少的青藏高原等地区分析误差较大,而观测相对稠密的平原地区和洋面上的分析误差较小;分析误差不仅随经度



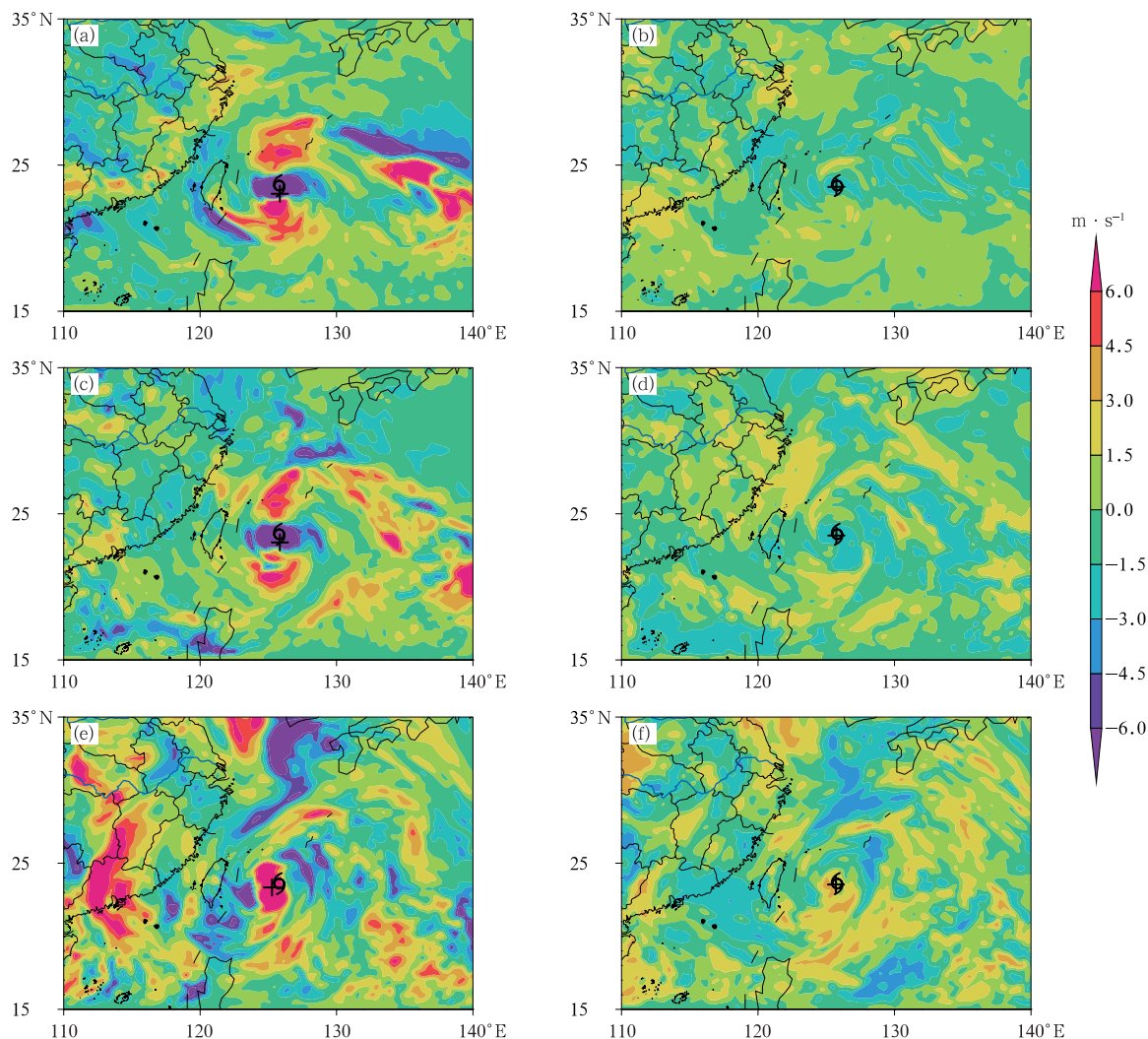
注:图 a 中,彩色线:台风强度,所标数字表示日期(00 时),黑色实折线和虚线分别表示 24 h 和 48 h 警戒线。  
图 1 2021 年 7 月(a)17 日 18 时到 30 日 06 时台风烟花路径,(b)22 日 00 时到 30 日 00 时 8 d 累计观测降水  
Fig. 1 (a) Best track of Typhoon In-Fa from 18 UTC 17 to 06 UTC 30 July, (b) observed 8 d accumulated precipitation from 00 UTC 22 to 00 UTC 30 July 2021



注:台风符号表示 2021 年 7 月 22 日 12 时的台风观测位置。  
图 2 2021 年 6 月 12 日到 7 月 12 日的统计平均分析误差的水平分布  
(a)模式面第 13 层(约 850 hPa),(b)第 24 层(约 500 hPa),(c)第 36 层(约 200 hPa)  
Fig. 2 Horizontal distributions of analysis errors statistically averaged from 12 June to 12 July 2021  
(a) the 13th model level (approximately at 850 hPa), (b) the 24th model level (approximately at 500 hPa),  
(c) the 36th model level (approximately at 200 hPa)

和纬度变化,也随高度变化。总的来说,高层大气的分析不确定性通常大于低层大气。当“烟花”位于台湾岛以东洋面上,台风低层环流区(约 850 hPa)的分析误差明显小于台风高层环流区(约 200 hPa)的分析误差,因而 ETKF\_R 对台风低层风场扰动振幅的调整更显著。

利用分析误差对初始扰动进行调整,洋面上台风环流区及附近的初始风场扰动结构有改进(图 3)。与 ETKF 对比发现,一方面,ETKF\_R 方法能对低、中、高层的初始风场局地幅度过大(超过  $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )的扰动大值区有合理限制;另一方面,ETKF\_R 的初始风场扰动振幅在台风高层环流区



注:台风符号表示台风观测位置,十字符号表示模式初始场台风位置。

图 3 2021 年 7 月 22 日 12 时风场初始扰动的水平分布

(a,c,e)ETKF 方法,(b,d,f)ETKF\_R 方法

(a,b)成员 4 的第 13 层模式面(约 850 hPa)纬向风扰动,(c,d)成员 4 的第 24 层模式面(约 500 hPa)

纬向风扰动,(e,f)成员 13 的第 36 层模式面(约 200 hPa)经向风扰动

Fig. 3 Horizontal distributions of initial wind field perturbations at 12 UTC 22 July 2021

with (a, c, e) ETKF and (b, d, f) ETKF\_R

(a—d) the zonal wind perturbation (a, b) at the 13th model level (approximately at 850 hPa) and

(c, d) at the 24th model level (approximately at 500 hPa) of ensemble member 4,

(e, f) the meridional wind perturbation at 36th model level (approximately

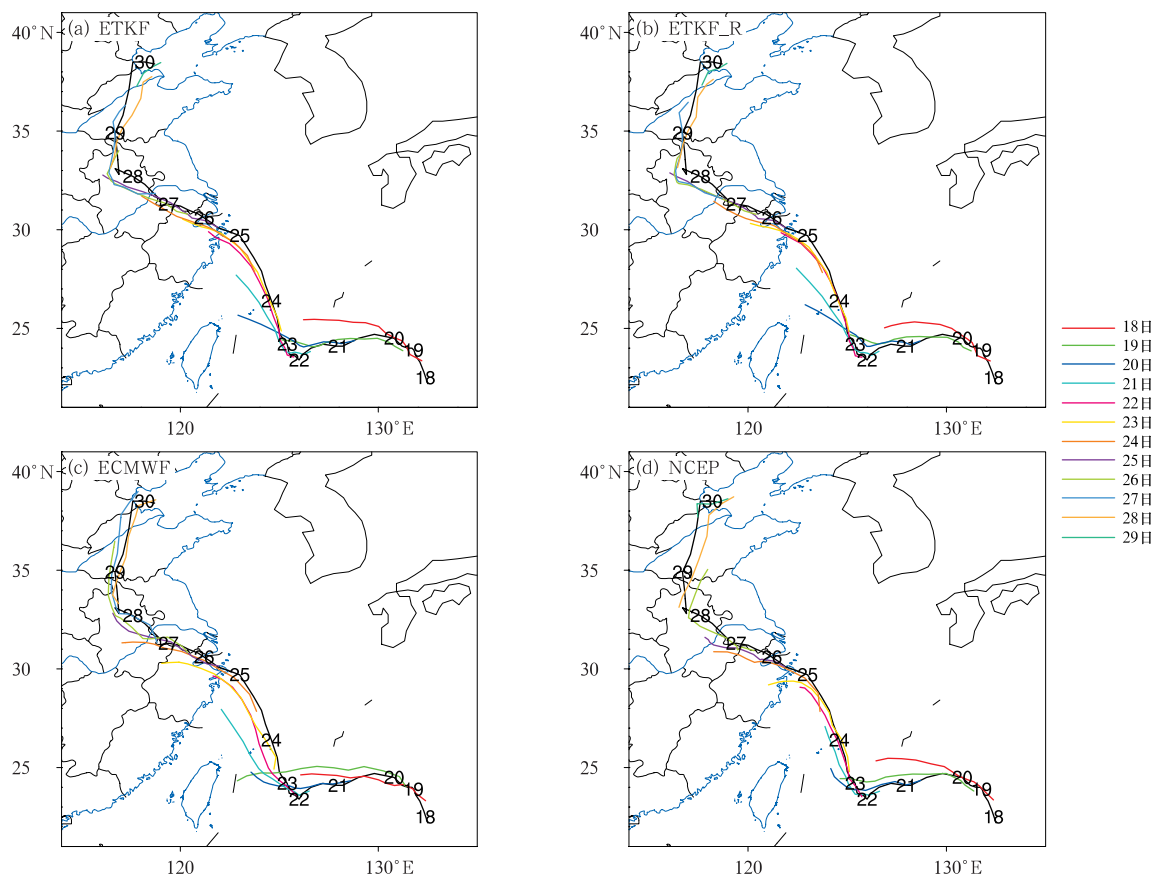
at 200 hPa) of ensemble member 13

大于低层,与分析不确定性特征一致。此外,模式的台风中心利用 850 hPa 环流中心判定(Ryglicki and Hart,2015),ETKF 在台风中心附近的低层风场局地扰动幅度过大,导致集合成员的台风中心发生明显偏离。

基于再分析尺度化因子的 ETKF\_R 初值扰动方法对台风路径集合平均预报效果比 ETKF 方法有改进。从“烟花”全生命史的每日 12 时起报结果来看(图 4a,4b),台风初生阶段,ETKF\_R 集合平均台风路径更接近观测;在台风从西行缓慢转为西北行的预报难点阶段,ETKF\_R 集合平均台风路径与观测路径的方向偏离更小,但 48 h 后移速偏快;台风向东海和浙江沿海靠近阶段(7 月 22—24 日起报),ETKF\_R 集合平均台风路径预报优于 ETKF,

尤其对预报台风登陆位置及登陆后移速更有优势;但是,在台风登陆后,ETKF\_R 和 ETKF 预报台风移速均比观测偏慢,这可能与控制预报移速偏慢有关(图略)。12 次起报的统计平均表明,ETKF\_R 的台风路径集合平均误差在 0~66 h 与 ETKF 相当或略小,最大减小幅度为 6.8%,而 72 h 误差略有增大(图 5)。

受控制预报初始强度误差大和初始集合离散度偏小的影响,ETKF\_R 方法对台风强度集合平均预报效果在前期比 ETKF 方法差,24 h 后二者基本相当。从台风烟花全生命史的预报结果来看(图 6),ETKF 方法通常会产生比控制预报偏强的初值,而 ETKF\_R 的集合平均初值与控制预报初值接近。由于从全球模式分析场动力降尺度的控制预报初始强



注:黑线表示观测路径,所标数字表示日期(00 时)。

图 4 2021 年 7 月 18—29 日每日 12 时起报的台风烟花全生命史的集合平均 0~72 h 路径预报(彩色线)

Fig. 4 Ensemble mean 0—72 h track forecast (colored line) of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC from 18 to 29 July 2021

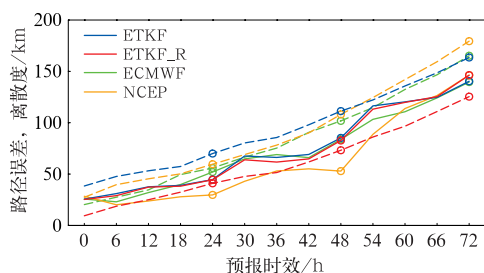
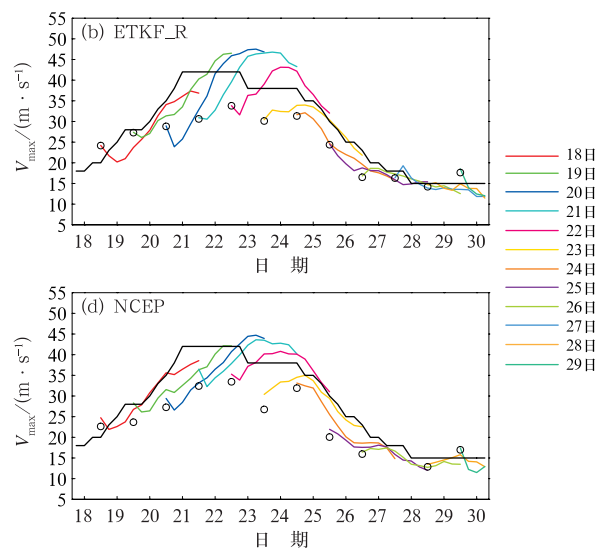
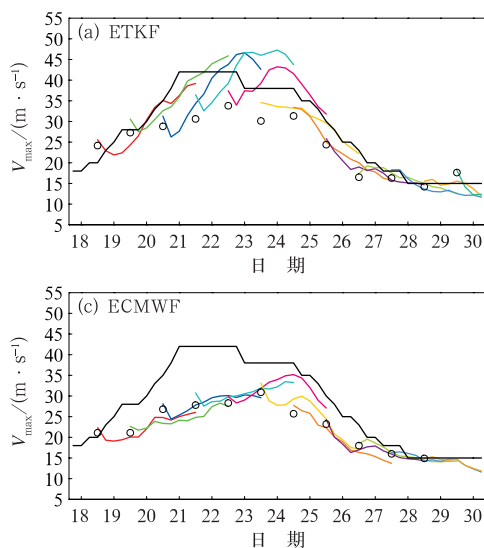


图5 台风烟花统计平均的0~72 h路径预报集合平均误差(实线)和离散度(虚线)

Fig. 5 Statistically averaged 0–72 h track forecast ensemble mean error (solid line) and ensemble spread (dashed line) of Typhoon In-Fa



注:黑线表示观测强度,空心圈表示各起报时次的控制预报初始台风强度。

图6 2021年7月18—29日每日12时起报的台风烟花全生命史的集合平均0~72 h强度预报(彩色线)

Fig. 6 Ensemble mean 0–72 h intensity forecast (colored line) of Typhoon In-Fa initialized 12 UTC from 18 to 29 July 2021

风成熟阶段(图9),ETKF\_R方法产生的台风初始位置均比ETKF更加集中,体现了集合预报的初始小扰动特征。7月22日12时,ETKF的台风初始位置误差最大,成员4为62.5 km,成员13为61.3 km,而ETKF\_R方法能使集合成员最大初始位置误差降为12.9 km。

ETKF\_R方法能合理降低对台风路径预报起重要作用的西北太平洋副热带高压的集合离散度,从而限制台风预报路径过度发散,改进台风路径集合平均预报效果。以7月18日12时起报的“烟花”初生阶段为例,在12 h预报时效,ETKF\_R的500 hPa位势高度离散度比ETKF小,差别主要位

度一般比观测偏弱,且初值对台风强度预报前期效果影响明显,因此ETKF\_R的台风强度集合平均预报误差在前期比ETKF大。12次起报的统计平均表明,ETKF\_R在初始时刻台风强度集合平均误差比ETKF偏大 $1.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,之后差距缩小,二者预报的24~60 h误差基本相当(图7)。

### 2.3 离散度

ETKF\_R方法对洋面上风场扰动幅度的限制,使台风初始位置离散度偏小,但与ETKF的初值过度发散相比对路径预报有改善。无论是定位误差较大的台风初生阶段(图8),还是定位误差较小的台

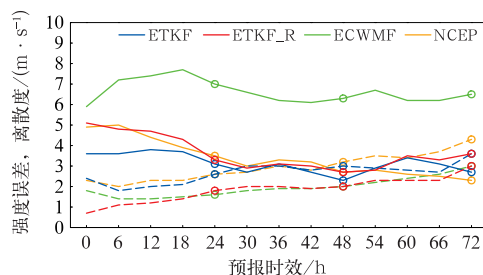
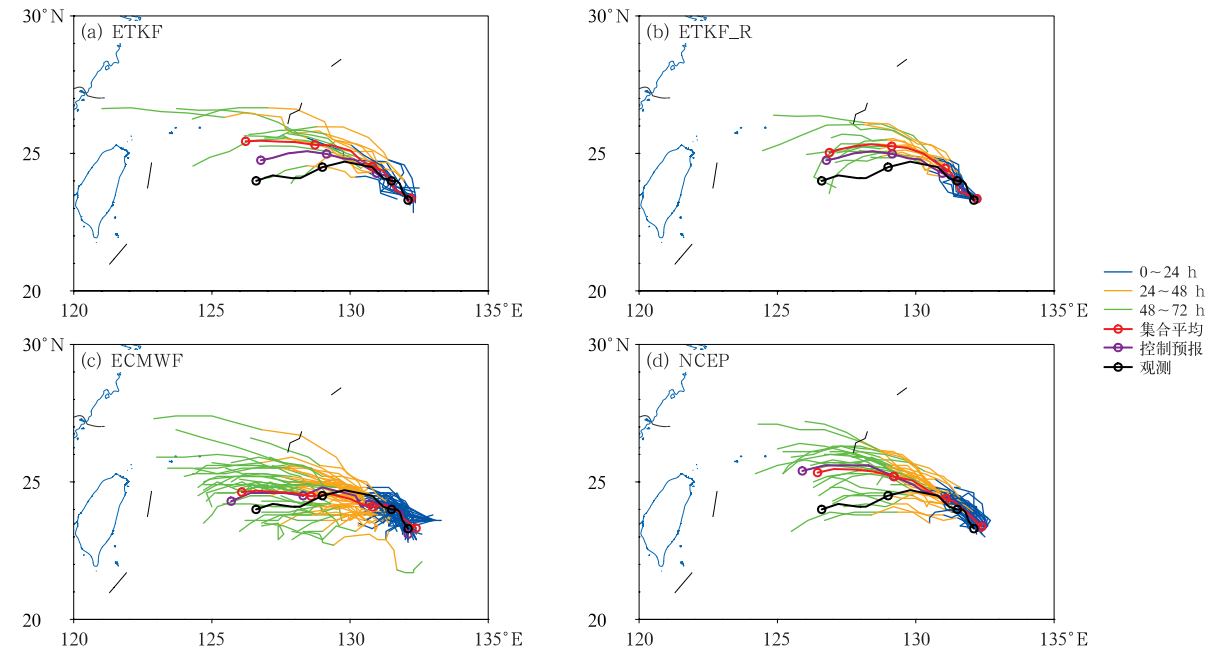


图7 台风烟花统计平均的0~72 h强度预报集合平均误差(实线)和离散度(虚线)

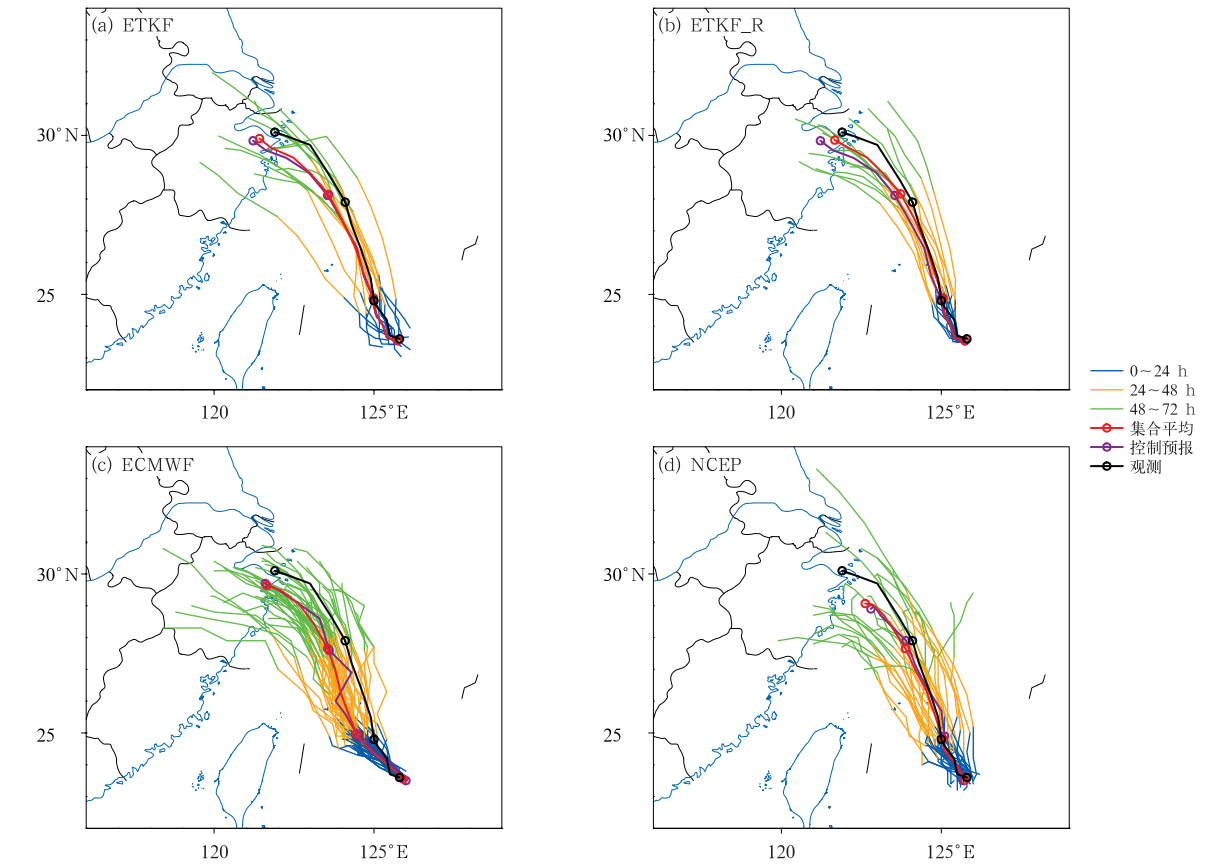
Fig. 7 Statistically averaged 0–72 h typhoon intensity forecast ensemble mean error (solid line) and ensemble spread (dashed line) of Typhoon In-Fa





注:红、紫、黑色粗线上空心圈标注间隔 24 h 的台风位置。

图 8 2021 年 7 月 18 日 12 时起报的台风烟花 0~72 h 路径预报  
Fig. 8 0—72 h track forecast of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC 18 July 2021



注:红、紫、黑色粗线上空心圈标注间隔 24 h 的台风位置。

图 9 2021 年 7 月 22 日 12 时起报的台风烟花 0~72 h 路径预报  
Fig. 9 0—72 h track forecast of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC 22 July 2021

于副热带高压 5880 gpm 等值线以西(图 10a,10b);到 72 h 预报时效,ETKF\_R 的副热带高压西伸范围和强度的离散度依然比 ETKF 小(图 10c,10d)。对应地,ETKF\_R 预报的台风移速和移向的离散度比 ETKF 有改善,从而使集合平均路径与观测更加接近(图 8)。

统计结果表明,ETKF\_R 方法能改善台风路径集合平均误差与离散度的一致性关系。ETKF 的 0~72 h 台风路径离散度始终大于集合平均误差,表现为过发散特征;而 ETKF\_R 方法虽然使台风初始位置离散度偏小,但路径离散度的增长速度快,24 h 和 48 h 台风路径集合平均误差与离散度更加靠近(图 5)。需要注意的是,ETKF\_R 预报的 48 h 后台风路径欠发散特征比较明显,有待改进。

除了台风路径,ETKF\_R 方法相比于 ETKF 也

能改善台风强度初始扰动结构和离散度。初值对前 24 h 台风强度预报效果影响明显,对控制预报初始强度误差最小(图 11)和最大(图 12)的两个起报时次分析发现,ETKF 的扰动初值过度发散,以至于集合成员包含了热带风暴、强热带风暴、台风等若干个等级的强度初值;而 ETKF\_R 方法对洋面上扰动幅度的限制使集合成员初值的强度等级相同,离散度得以改善。另外,ETKF 的大多数集合成员通过叠加偏向控制预报一侧的扰动来减小初值与观测的误差,但这种不合理的扰动结构可能引起动力和热力条件不协调,导致集合成员前 6 h 预报出现与控制预报演变特征不同的 spin-down 过程;而 ETKF\_R 的扰动较均匀地分布在控制预报两侧,且集合成员的演变特征与控制预报一致。需要注意的是,可以通过涡旋强度调整以减小控制预报初始误差,或者

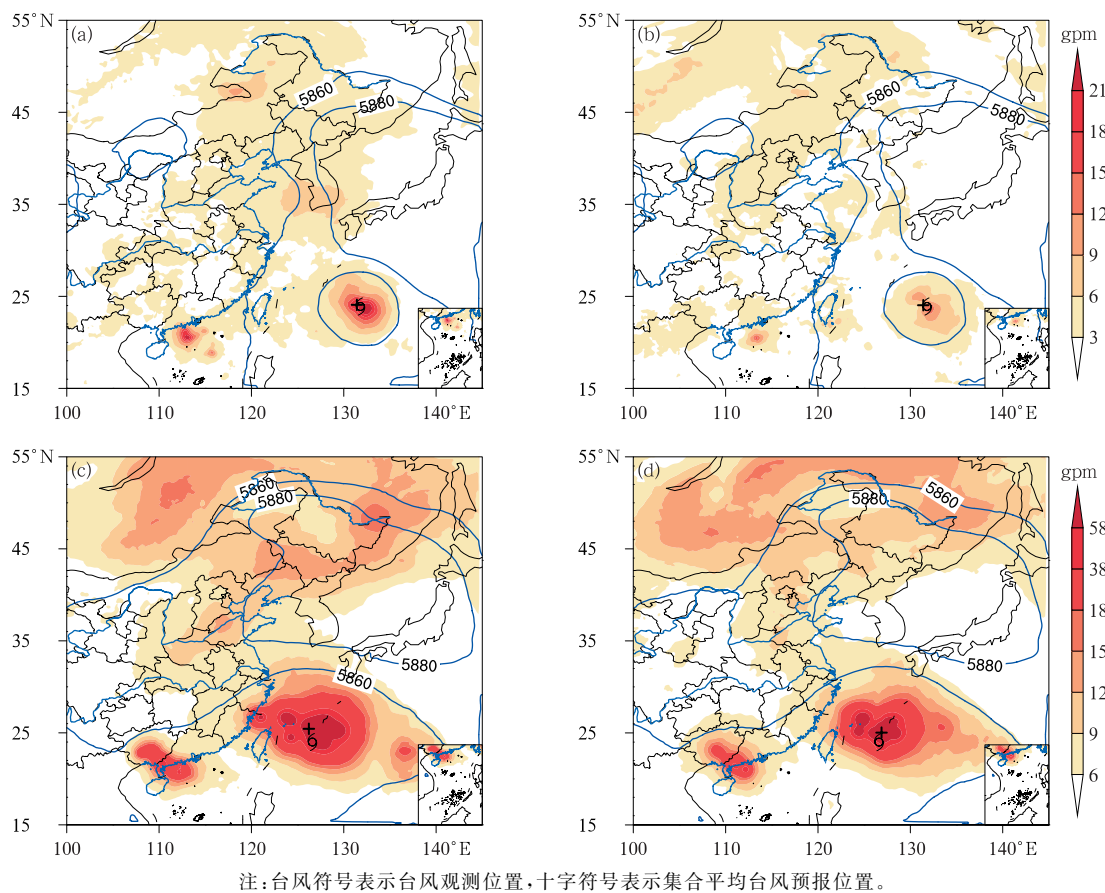


图 10 2021 年 7 月 18 日 12 时起报的(a,b)12 h,(c,d)72 h 500 hPa 位势高度离散度(填色)以及集合平均 5860 gpm 和 5880 gpm 等值线水平分布

(a,c)ETKF 方法,(b,d)ETKF\_R 方法

Fig. 10 Horizontal distributions of ensemble spread of geopotential height (colored) of (a, c) ETKF and (b, d) ETKF\_R at 500 hPa and ensemble mean 5860 gpm and 5880 gpm (contour) initialized at 12 UTC 18 July 2021

(a, b) 12 h forecast, (c, d) 72 h forecast

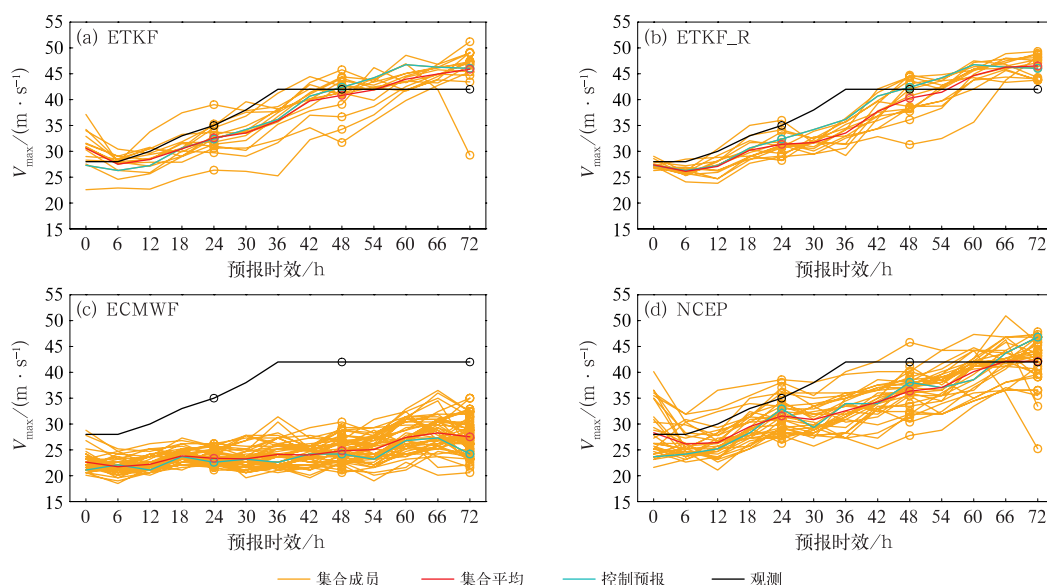


图 11 2021 年 7 月 19 日 12 时起报的台风烟花中心附近近地面最大风速 0~72 h 预报

Fig. 11 Maximum 10 m wind speed 0–72 h forecast of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC 19 July 2021

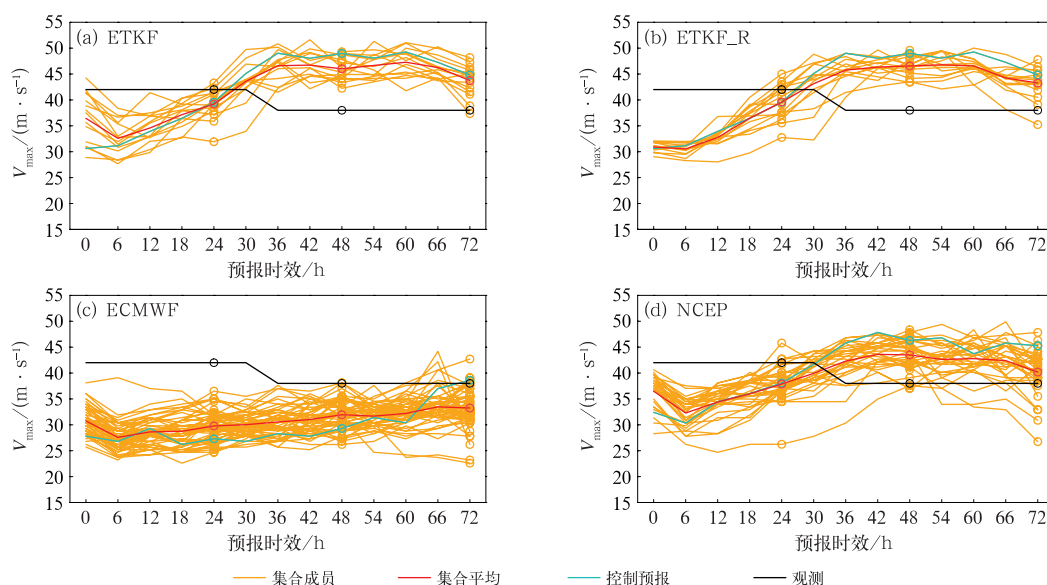


图 12 2021 年 7 月 21 日 12 时起报的台风烟花中心附近近地面最大风速 0~72 h 预报

Fig. 12 Maximum 10 m wind speed 0–72 h forecast of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC 21 July 2021

通过集合预报与资料同化紧密结合以引入更多中小尺度扰动(马旭林等,2018;潘贤等,2021),来进一步改善 ETKF\_R 的台风强度预报。

除了表征台风强度的近地面风场,ETKF\_R 方法对台风三维风场的初始扰动结构和离散度也有改进。以 7 月 19 日 12 时起报为例,分析过台风中心的切向风垂直剖面可以发现,ETKF 的初始三维风场离散度过大,扰动集合成员的台风眼大小、台风发

展高度、低层最强风速以及非对称结构等都有很大不同,且与控制预报差别很大(图 13)。计算过台风中心的切向风垂直剖面离散度可以发现,ETKF\_R 的初始三维风场离散度相比于 ETKF 有改善,且差别主要集中在台风内核区(图 14a,14b)。

ETKF\_R 方法虽然使台风强度预报离散度偏小,但预报前 24 h 台风结构和强度的离散度能快速增长。统计结果表明,ETKF\_R 和 ETKF 方法在预

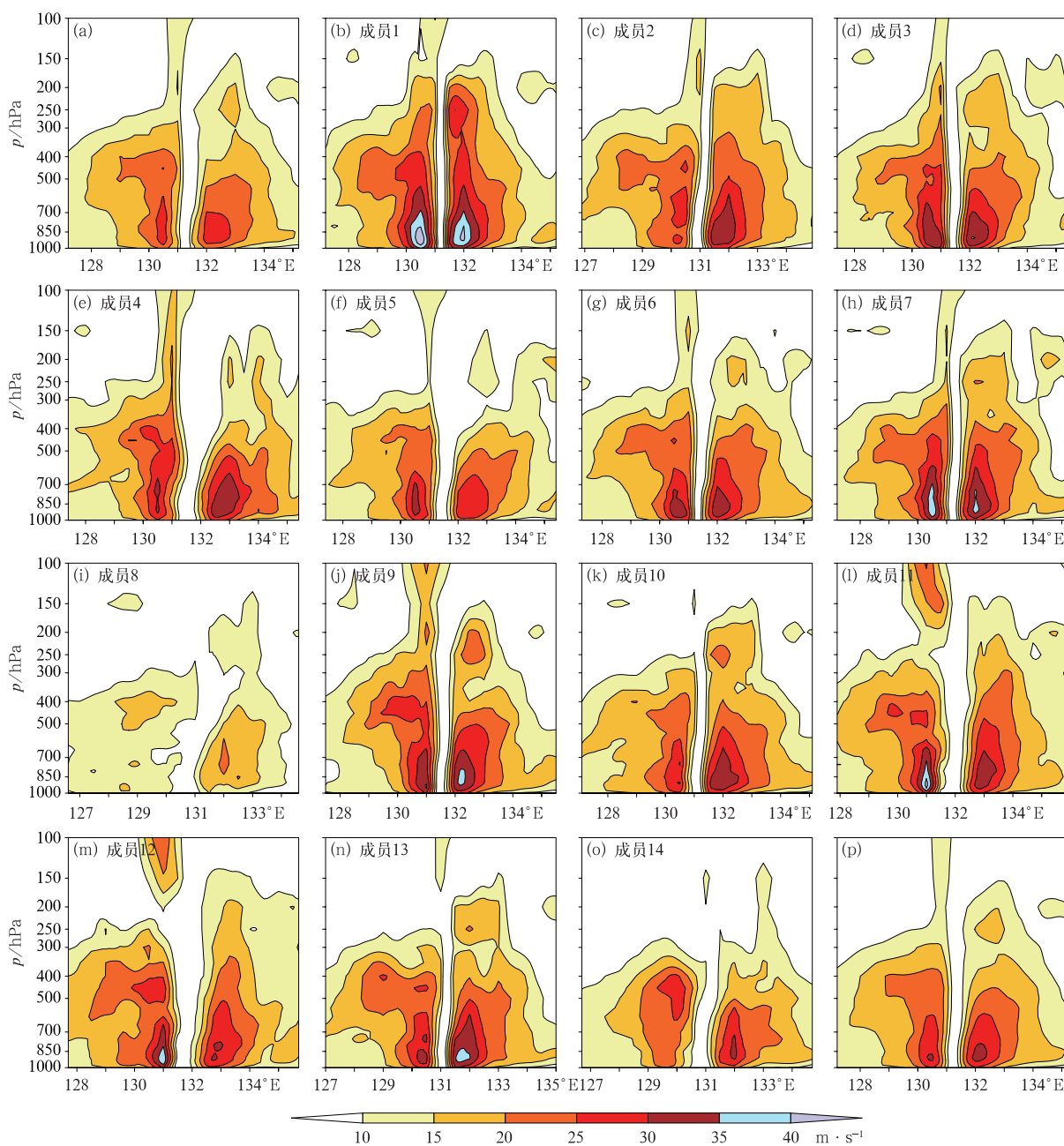


图 13 2021 年 7 月 19 日 12 时 ETKF 方法的初始时刻过台风中心纬度的切向风垂直剖面

(a)控制预报,(b~o)扰动集合成员 1~14,(p)集合平均

Fig. 13 West-east vertical cross-section of the initial tangential wind of Typhoon In-Fa at 12 UTC 19 July 2021 with ETKF

(a) control forecast, (b-o) ensemble members 1 to 14, (p) ensemble mean

报前 24 h 均表现为集合平均误差明显大于离散度,这是由控制预报初始强度误差过大造成的(图 7)。暖心结构对台风强度变化有重要作用(王尚宏等, 2018)。通过计算和对比台风暖心离散度可以发现,ETKF\_R 预报至 24 h 的台风结构离散度与 ETKF 的差距比初始时刻明显缩小(图 14),其离散度的快

速增长有助于提高集合成员包含台风观测强度的能力(图 11 和图 12)。

相较 ETKF,ETKF\_R 还能改善台风降水预报的集合离散度和预报技巧。以“烟花”登陆初期在浙北和苏南等地的强降水(图 15a)为例,对比 ETKF 和 ETKF\_R 的 7 月 24 日 12 时起报的 12~36 h 预报



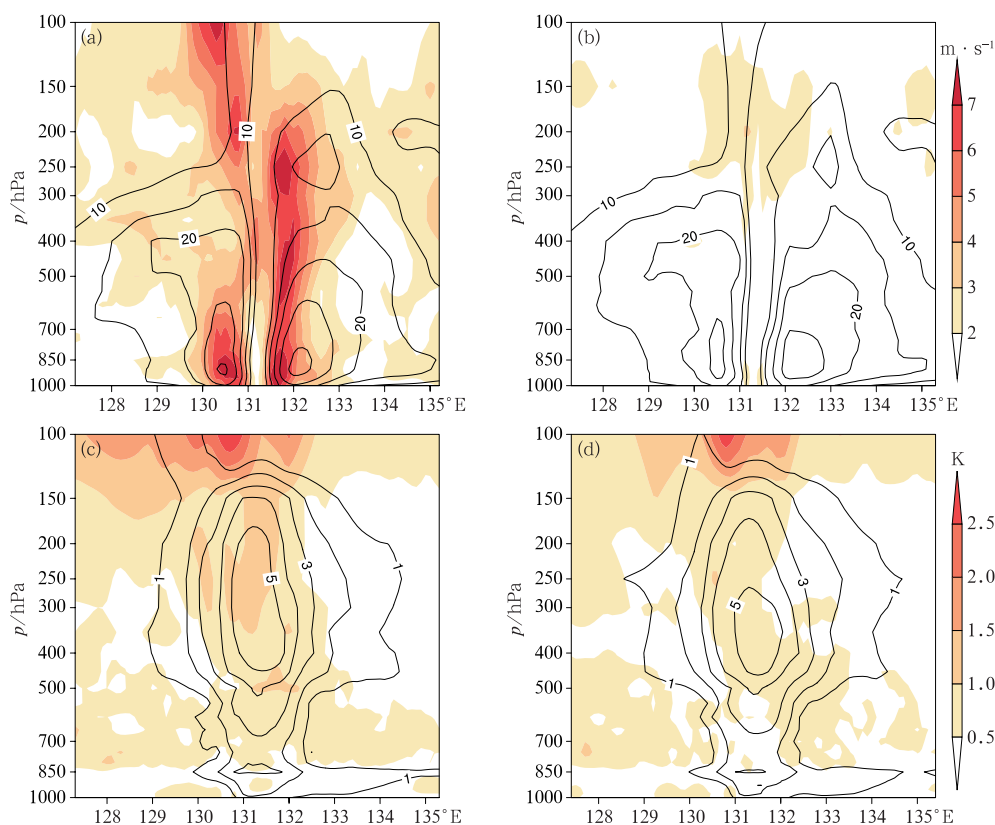


图 14 2021 年 7 月 19 日 12 时起报的(a,b)初始时刻过台风中心纬度的切向风离散度(填色)和集合平均(等值线,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (c,d)积分 24 h 的过台风中心纬度的温度距平离散度(填色)和集合平均(等值线,单位:K)  
(a,c)ETKF 方法, (b,d)ETKF\_R 方法

Fig. 14 Ensemble spread (colored) and ensemble mean (contour) of the west-east vertical cross-sections of (a, b) initial tangential wind (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and (c, d) the 24 h temperature anomaly (unit: K) forecast of Typhoon In-Fa initialized at 12 UTC 19 July 2021 with (a, c) ETKF and (b, d) ETKF\_R

时效的 24 h 累计降水可以发现,虽然二者的集合平均相似(图 15b,15c),但 ETKF\_R 中降水落区和量级与观测更接近的集合成员比例有所提高。暴雨( $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ )TS 评分(图 15d)显示,ETKF\_R 中有 71.4% 的扰动集合成员 TS 评分比 ETKF 更高,所有集合成员的 TS 评分均值提高了 10.4%,而方差降低了 40%。进一步分析(图 15e,15f)发现,ETKF\_R 的降水离散度分布与降水实况落区更吻合,其值随着降水量级的增加而增大,能更合理地表征台风降水的预报不确定性,对于集合预报技巧的提高有重要作用。

## 2.4 多中心比较

与国际先进的全球集合预报相比,我国区域集

合预报系统的台风路径预报具有业务参考价值。ECMWF 集合在“烟花”登陆前的路径预报总体差于 ETKF\_R,但对台风陆上滞留期间(7 月 25 日以后)的移速和移向预报准确性更高;而 NCEP 集合对“烟花”从西行缓慢转为西北行阶段的移速和移向预报准确性高,但对 7 月 22—25 日起报的台风登陆预报效果比 ETKF\_R 差(图 4)。在对“烟花”登陆时间和地点的首次预报中,ETKF\_R 的路径集合预报技巧明显高于 ECMWF 和 NCEP 集合,说明合理的初值扰动方法可以在一定程度上弥补集合成员数较少的不足(图 9)。从统计平均来看,ETKF\_R 的台风路径预报误差在 0~2 d 与 ECMWF 集合相当, NCEP 集合的 0~2 d 路径预报误差最小,但 48 h 后误差增长最快;ECMWF 和 NCEP 集合的路径预报

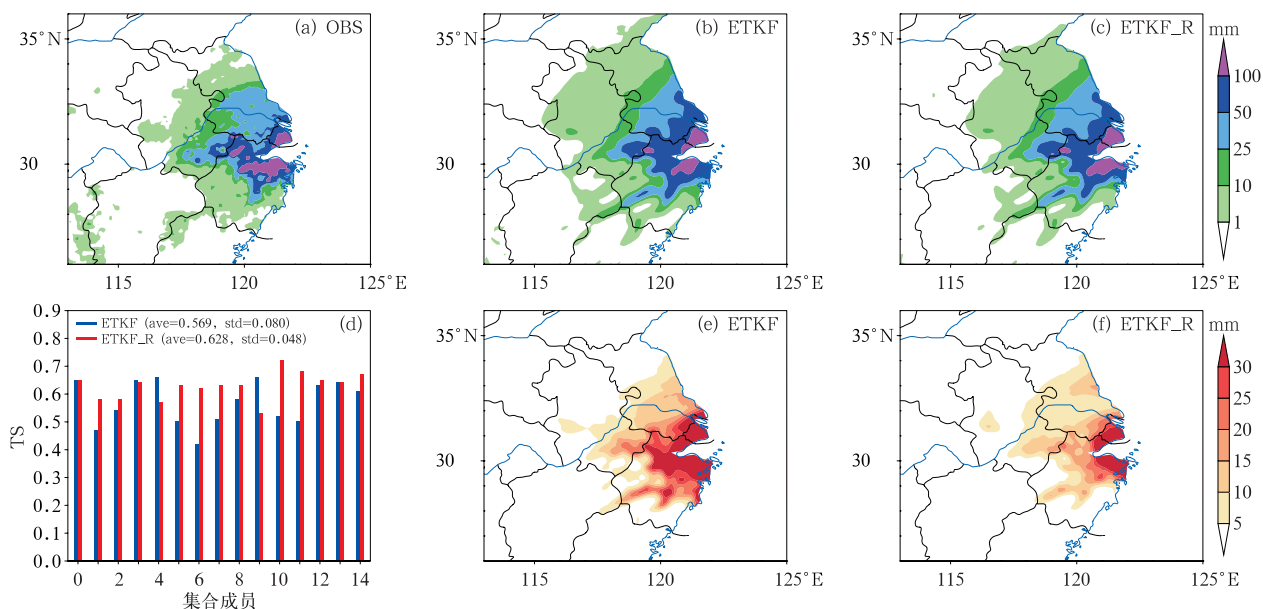


图 15 2021 年 7 月 24 日 12 时起报的 12~36 h 预报时效的 24 h 累计降水的 (a) 实况, (b, c) 集合平均, (d) 暴雨 ( $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) TS 评分, (e, f) 离散度

Fig. 15 The 24 h accumulated precipitation at 12–36 h forecast lead time initialized from 12 UTC 24 July 2021

(a) observation, (b, c) ensemble mean forecast, (d) threat score of precipitation ( $\geq 50 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ), (e, f) ensemble spread

均呈现过度发散特征,尤其是 NCEP 集合的台风路径一致性关系明显比 ETKF\_R 差(图 5)。

除了路径预报,我国区域集合预报系统的台风强度预报也具有业务参考价值。ECMWF 集合对“烟花”的强度预报总体严重偏弱,无法预报出台风加强的过程;而 NCEP 集合对预报台风最大强度的准确性较高,但预报的台风增强速度比 ETKF\_R 慢(图 6)。ECMWF 和 NCEP 集合的台风强度初始扰动幅度和离散度过大,且大多数集合成员的扰动初值比控制预报偏强,容易引起预报前 6 h 的不合理 spin-down 现象(图 11 和图 12)。从统计平均来看(图 7),ETKF\_R 的 0~3 d 台风强度预报明显优于 ECMWF 集合,而 NCEP 集合的 0~2 d 台风强度预报误差与 ETKF\_R 相当,48 h 后其误差虽有所下降,但一致性关系随预报时效变差。

### 3 结论及讨论

集合预报是提高台风预报水平的重要技术方法,合理地表征初值不确定性对提高集合预报技巧至关重要。本文针对基于历史统计 ECMWF 再分

析尺度化因子的 ETKF\_R 初值扰动改进方案,利用 2021 年 7 月 18—29 日的 CMA-REPS 回算对比试验,考察初值扰动结构对登陆我国并造成严重灾害的台风烟花路径和强度预报的影响,并与 ECMWF 和 NCEP 全球集合预报进行对比分析。得出以下结论:

(1)与 ETKF 过度发散的扰动初值相比,ETKF\_R 方法改善了初始三维风场的扰动幅度和结构,但台风初始位置和强度的离散度偏小。

(2)ETKF\_R 方法能合理降低西北太平洋副热带高压的集合离散度,从而限制台风移速和移向的过度发散。与 ETKF 相比,ETKF\_R 方法对“烟花”全生命史的路径集合平均预报有改进,并改善台风路径集合平均误差与离散度关系,也能更合理地表征台风降水的预报不确定性。

(3)CMA-REPS 控制预报的台风初始强度通常偏弱,而得益于 ETKF\_R 预报前 24 h 台风结构和强度离散度的快速增长,其 24 h 后台风强度集合平均预报效果与 ETKF 基本相当。

(4)与国际先进的全球集合预报相比,CMA-REPS 的台风路径和强度预报具有业务参考价值。

ETKF\_R对“烟花”登陆的预报效果最优,其统计平均的0~2 d路径预报误差与ECMWF集合相当,而NCEP集合的0~2 d路径预报误差最小,但一致性关系明显比ETKF\_R差;同时,ETKF\_R的0~2 d台风强度预报误差与NCEP集合相当,而ECMWF集合对“烟花”的强度预报总体严重偏弱。

尽管ETKF\_R方法能有效提高台风预报技巧,但预报的台风路径和强度欠发散特征较明显,有待改进。以上结论基于台风烟花单个例得到,未来还需对突变台风、弱台风等更多台风个例检验评估。本研究可为集合预报系统研发改进提供参考,并推动集合预报技术的业务应用。需要说明的是,基于再分析尺度化因子的初值扰动技术已于2022年应用于CMA-REPS V3.2业务升级版本中,并采用了我国自主研发的CMA-RA再分析资料来估计分析误差。

## 参考文献

- 陈国民,杨梦琪,张喜平,等,2022. 2020年西北太平洋和南海台风预报精度评定[J]. 气象,48(4):516-525. Chen G M, Yang M Q, Zhang X P, et al, 2022. Verification on forecasts of typhoons over Western North Pacific and South China Sea in 2020[J]. Meteor Mon, 48(4):516-525(in Chinese).
- 陈静,李晓莉,2020. GRAPES全球/区域集合预报系统10年发展回顾及展望[J]. 气象科技进展,10(2):9-18, 29. Chen J, Li X L, 2020. The review of 10 years development of the GRAPES global/regional ensemble prediction[J]. Adv Meteor Sci Technol, 10(2):9-18, 29(in Chinese).
- 国家市场监督管理总局,国家标准化管理委员会,2019. 天气预报检验 台风预报:GB/T 38308—2019[S]. 北京:中国标准出版社:1-4. State Administration of Market Supervision and Administration of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China, 2019. Weather forecast verification-Typhoon forecast:GB/T 38308—2019[S]. Beijing:Standards Press of China:1-4(in Chinese).
- 黄小刚,费建芳,陆汉城,2007. 基于集合Kalman滤波数据同化的热带气旋路径集合预报研究[J]. 大气科学,31(3):468-478. Huang X G, Fei J F, Lu H C, 2007. The ensemble forecasting of tropical cyclone track based on ensemble Kalman filter data assimilation[J]. Chin J Atmos Sci, 31(3):468-478(in Chinese).
- 黄小刚,费建芳,陆汉城,等,2010. 基于集合Kalman滤波数据同化与偏差修正的热带气旋强度集合预报研究[J]. 气象学报,68(1):79-87. Huang X G, Fei J F, Lu H C, et al, 2010. The ensemble forecasting of tropical cyclone intensity based on EnKF data assimilation and bias-correction[J]. Acta Meteor Sin, 68(1):79-87(in Chinese).
- 吕心艳,许映龙,董林,等,2021. 2018年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. 气象,47(3):359-372. Lyu X Y, Xu Y L, Dong L, et al, 2021. Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs over Northwestern Pacific in 2018[J]. Meteor Mon, 47(3):359-372(in Chinese).
- 麻巨慧,朱跃建,王盘兴,等,2011. NCEP、ECMWF及CMC全球集合预报业务系统发展综述[J]. 大气科学学报,34(3):370-380. Ma J H, Zhu Y J, Wang P X, et al, 2011. A review on the developments of NCEP, ECMWF and CMC global ensemble forecast system[J]. Trans Atmos Sci, 34(3):370-380(in Chinese).
- 麻素红,张进,瞿安祥,等,2021. 垂直分层加密和预报区域扩大对GRAPES\_TYM台风预报的影响[J]. 气象学报,79(1):94-103. Ma S H, Zhang J, Qu A X, et al, 2021. Impacts to tropical cyclone prediction of GRAPES\_TYM from increasing of model vertical levels and enlargement of model forecast domain[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):94-103(in Chinese).
- 马旭林,计霞霞,周勃旸,等,2018. GRAPES区域集合预报尺度混合初始扰动构造的新方案[J]. 大气科学学报,41(2):248-257. Ma X L, Ji Y X, Zhou B Y, et al, 2018. A new scheme of blending initial perturbation of the GRAPES regional ensemble prediction system[J]. Trans Atmos Sci, 41(2):248-257(in Chinese).
- 潘贤,王秋萍,张瑜,等,2021. 分析约束的集合预报初始扰动构造方案的研究[J]. 大气科学,45(6):1327-1344. Pan X, Wang Q P, Zhang Y, et al, 2021. Analysis constraints scheme of initial perturbation of ensemble prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 45(6):1327-1344(in Chinese).
- 沈越婷,钱传海,李泽椿,等,2015. 热带气旋集合预报技术的应用情况简介[J]. 气象科技进展,5(5):33-42. Shen Y T, Qian C H, Li Z C, et al, 2015. A review on applications of tropical cyclones ensemble prediction technologies[J]. Adv Meteor Sci Technol, 5(5):33-42(in Chinese).
- 王晨稀,2013. 热带气旋集合预报研究进展[J]. 热带气象学报,29(4):698-704. Wang C X, 2013. Advances in tropical cyclone ensemble prediction[J]. J Trop Meteor, 29(4):698-704(in Chinese).
- 王静,陈静,钟有亮,等,2017. GRAPES-REPS西南低涡预报检验评估[J]. 气象,43(4):385-401. Wang J, Chen J, Zhong Y L, et al, 2017. Verification and evaluation of the southwest vortex forecast by GRAPES-REPS[J]. Meteor Mon, 43(4):385-401(in Chinese).
- 王婧卓,陈法敬,陈静,等,2021. GRAPES区域集合预报对2019年中国汛期降水预报评估[J]. 大气科学,45(3):664-682. Wang J Z, Chen F J, Chen J, et al, 2021. Verification of GRAPES-REPS model precipitation forecasts over China during 2019 flood season[J]. Chin J Atmos Sci, 45(3):664-682(in Chinese).
- 王婧卓,陈静,庄照荣,等,2018. GRAPES区域集合预报模式的初值扰动增长特征[J]. 大气科学,42(2):367-382. Wang J Z, Chen J, Zhuang Z R, et al, 2018. Characteristics of initial perturbation growth rate in the regional ensemble prediction system of

- GRAPES[J]. *Chin J Atmos Sci*, 42(2):367-382(in Chinese).
- 王尚宏, 汤杰, 雷小途, 2018. 登陆过程中台风高层暖心结构演变特征分析[J]. *气象*, 44(5):612-620. Wang S H, Tang J, Lei X T, 2018. Evolution of warm-core structure in upper level of land-falling typhoons[J]. *Meteor Mon*, 44(5):612-620(in Chinese).
- 王秀荣, 张立生, 李维邦, 2018. 台风灾害综合等级评判模型改进及应用分析[J]. *气象*, 44(2):304-312. Wang X R, Zhang L S, Li W B, 2018. Improvement and application analysis of the comprehensive grade evaluation model of typhoon disaster[J]. *Meteor Mon*, 44(2):304-312(in Chinese).
- 吴影, 陈佩燕, 雷小途, 2017. 登陆热带气旋路径和强度预报的效益评估初步研究[J]. *热带气象学报*, 33(5):675-682. Wu Y, Chen P Y, Lei X T, 2017. A preliminary study on the benefit assessment of track and intensity forecast of landfall tropical cyclones[J]. *J Trop Meteor*, 33(5):675-682(in Chinese).
- 吴政秋, 张进, 陈静, 等, 2020. GRAPES 区域集合预报条件性台风涡旋重定位方法研究[J]. *气象学报*, 78(2):163-176. Wu Z Q, Zhang J, Chen J, et al, 2020. The study on the method of conditional typhoon vortex relocation for GRAPES regional ensemble prediction[J]. *Acta Meteor Sin*, 78(2):163-176(in Chinese).
- 袁月, 李晓莉, 陈静, 等, 2016. GRAPES 区域集合预报系统模式不确定性的随机扰动技术研究[J]. *气象*, 42(10):1161-1175. Yuan Y, Li X L, Chen J, et al, 2016. Stochastic parameterization toward model uncertainty for the GRAPES mesoscale ensemble prediction system[J]. *Meteor Mon*, 42(10):1161-1175(in Chinese).
- 钟有亮, 陈静, 王静, 等, 2017. GRAPES 区域集合预报系统对登陆台风预报的检验评估[J]. *热带气象学报*, 33(6):953-964. Zhong Y L, Chen J, Wang J, et al, 2017. Evaluation of the forecast for landed typhoons by GRAPES-REPS regional ensemble prediction system[J]. *J Trop Meteor*, 33(6):953-964(in Chinese).
- 周冠博, 柳龙生, 董林, 等, 2022. 2020 年西北太平洋台风活动特征和预报难点分析[J]. *气象*, 48(4):504-515. Zhou G B, Liu L S, Dong L, et al, 2022. The Analysis of characteristics and forecast difficulties of TCs in Western North Pacific in 2020[J]. *Meteor Mon*, 48(4):504-515(in Chinese).
- Bauer P, Thorpe A, Brunet G, 2015. The quiet revolution of numerical weather prediction[J]. *Nature*, 525(7567):47-55.
- Bowler N E, Arribas A, Mylne K R, et al, 2008. The MOGREPS short-range ensemble prediction system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 134(632):703-722.
- Cangialosi J P, Blake E, DeMaria M, et al, 2020. Recent progress in tropical cyclone intensity forecasting at the National Hurricane Center[J]. *Wea Forecasting*, 35(5):1913-1922.
- Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. New generation of multi-scale NWP system (GRAPES): general scientific design[J]. *Chin Sci Bull*, 53(22):3433-3445.
- Chen F, Dudhia J, 2001. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. *Mon Wea Rev*, 129(4):569-585.
- Duan W S, Huo Z H, 2016. An approach to generating mutually independent initial perturbations for ensemble forecasts: orthogonal conditional nonlinear optimal perturbations[J]. *J Atmos Sci*, 73(3):997-1014.
- Dudhia J, 1989. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *J Atmos Sci*, 46(20):3077-3107.
- Emanuel K, Zhang F Q, 2016. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. *J Atmos Sci*, 73(9):3739-3747.
- Hong S Y, Lim J H, Lim J O, et al, 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *J Korean Meteor Soc*, 42(2):129-151.
- Hong S Y, Pan H L, 1996. Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model[J]. *Mon Wea Rev*, 124(10):2322-2339.
- Houtekamer P L, Lefaiivre L, Derome J, et al, 1996. A system simulation approach to ensemble prediction[J]. *Mon Wea Rev*, 124(6):1225-1242.
- Kain J S, 2004. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 43(1):170-181.
- Leroux M D, Wood K, Elsberry R L, et al, 2018. Recent advances in research and forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall[J]. *Trop Cyclone Res Rev*, 7(2):85-105.
- Lorenz E N, 1965. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model[J]. *Tellus*, 17(3):321-333.
- Lu X Q, Yu H, Ying M, et al, 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration[J]. *Adv Atmos Sci*, 38(4):690-699.
- Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al, 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *J Geophys Res: Atmos*, 102(D14):16663-16682.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al, 1996. The ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 122(529):73-119.
- Nie Y B, Sun J Q, 2022. Moisture sources and transport for extreme precipitation over Henan in July 2021[J]. *Geophys Res Lett*, 49(4):e2021GL097446.
- Noilhan J, Planton S, 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models[J]. *Mon Wea Rev*, 117(3):536-549.
- Palmer T, 2019. The ECMWF ensemble prediction system: looking back (more than) 25 years and projecting forward 25 years[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 145(S1):12-24.
- Raynaud L, Bouttier F, 2016. Comparison of initial perturbation methods for ensemble prediction at convective scale[J]. *Quart J*

- Roy Meteor Soc, 142(695):854-866.
- Ryglicki D R, Hart R E, 2015. An investigation of center-finding techniques for tropical cyclones in mesoscale models[J]. J Appl Meteor Climatol, 54(4):825-846.
- Toth Z, Kalnay E, 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method[J]. Mon Wea Rev, 125(12):3297-3319.
- Wang J Z, Chen J, Zhang H B, et al, 2021. Initial perturbations based on ensemble transform Kalman filter with rescaling method for ensemble forecasting[J]. Wea Forecasting, 36(3):823-842.
- Wang X G, Bishop C H, 2003. A comparison of breeding and ensemble transform Kalman filter ensemble forecast schemes[J]. J Atmos Sci, 60(9):1140-1158.
- Yamaguchi M, Majumdar S J, 2010. Using TIGGE data to diagnose initial perturbations and their growth for tropical cyclone ensemble forecasts[J]. Mon Wea Rev, 138(9):3634-3655.
- Yamaguchi M, Nakazawa T, Aonashi K, 2012. Tropical cyclone track forecasts using JMA model with ECMWF and JMA initial conditions[J]. Geophys Res Lett, 39(9):L09801.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Ocean Technol, 31(2):287-301.
- Yu H, Chen G M, Zhou C, et al, 2022. Are we reaching the limit of tropical cyclone track predictability in the Western North Pacific? [J]. Bull Amer Meteor Soc, 103(2):E410-E428.
- Yue J, Meng Z Y, 2017. Impact of assimilating Taiwan's coastal radar radial velocity on forecasting Typhoon Morakot (2009) in southeastern China using a WRF-based EnKF [J]. Sci China Earth Sci, 60(2):315-327.
- Yue J, Meng Z Y, Yu C K, et al, 2017. Impact of coastal radar observability on the forecast of the track and rainfall of Typhoon Morakot (2009) using WRF-based ensemble Kalman filter data assimilation[J]. Adv Atmos Sci, 34(1):66-78.
- Zhang Z, Krishnamurti T N, 1997. Ensemble forecasting of hurricane tracks[J]. Bull Amer Meteor Soc, 78(12):2785-2796.
- 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.
- Zhou X Q, Zhu Y J, Hou D C, et al, 2022. The development of the NCEP global ensemble forecast system version 12 [J]. Wea Forecasting, 37(6):1069-1084.

(本文责编:俞卫平)