

DOI:10.13232/j.cnki.jnju.2024.02.004

## 超强台风“舒力基”(2021)的尺度可预报性

黄雨婧, 谈哲敏\*

(中尺度灾害性天气教育部重点实验室, 南京大学大气科学学院, 南京, 210023)

**摘要:** 台风尺度表征了台风低层风场特定风速半径大小, 是台风灾害影响范围的重要度量。针对超强台风“舒力基”(2021), 对其尺度可预报性进行初步探讨。结果表明, 模式可以模拟出台风发展初期台风尺度(内核尺度 RMW、外围尺度 R17)的演变趋势。基于集合预报的模拟试验, 具体分析了内核尺度 RMW、外围尺度 R17 演变及其误差增长特征。台风预报总体误差主要出现在对流层下层 850 hPa, 距离台风中心 50~150 km。从初始环境场看, 初始相对湿度是影响台风尺度误差增长的重要因子, 初始高湿环境有利于台风发展阶段的台风尺度高离散度, 从而限制了台风尺度的可预报性。在一定程度上, 外围风圈半径的可预报性要高于内核风圈半径。

**关键词:** 台风, 内核尺度, 外围尺度, 可预报性, 环境湿度

中图分类号: P444

文献标志码: A

## On the size predictability of Super Typhoon Surigae (2021)

Huang Yujing, Tan Zheming\*

(Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather, Ministry of Education, and School of Atmospheric Sciences,  
Nanjing University, Nanjing, 210023, China)

**Abstract:** The typhoon size represents the specific wind speed radius of the typhoon, and is an important measure of the impact scope of the disaster. This study conducts a preliminary discussion on the scale predictability of Super Typhoon Surigae (2021). The results show that the numerical model simulates the evolution of typhoon scales, including the inner-core size (RMW), outer-core size (R17) in the early stages of typhoon development. Based on the simulation experiments of ensemble forecasts, the evolution of inner-core size RMW and outer-core size R17 and their error growth characteristics are specifically analyzed. The overall errors in typhoon forecast mainly occurs at 850 hPa in the lower troposphere, 50 to 150 km away from the typhoon center. From the perspective of the initial environmental field, the initial relative humidity is an important factor affecting the growth of typhoon size errors, and then to limit the predictability of typhoon size. The initial high humidity environment is conducive to the high dispersion of typhoon outer-core size in the typhoon development stage. To a certain extent, the predictability of the outer wind circle radius is higher than that of the inner-core wind circle radius.

**Key words:** typhoon, inner-core size, outer-core size, predictability, environmental humidity

台风是西北太平洋最具破坏性的自然灾害之一, 每年会给沿海地区带来严重的经济损失和人员伤亡。台风的强度和尺度是决定台风破坏力的两个重要因子, 前者表征台风的最大风速, 后者可

表征台风灾害影响半径。因此, 台风的路径、强度和尺度的准确预报对台风的减灾防灾至关重要。

台风尺度是一种台风特定风速下风圈半径大小的度量。在不同研究背景下, 台风的尺度有多

基金项目: 国家自然科学基金(42192555)

收稿日期: 2024-02-24

\* 通讯联系人, E-mail: zmtan@nju.edu.cn

种定义,不同尺度参数可能受不同要素的影响.广泛使用的尺度有两个,分别是内核尺度(RMW)和外围尺度(R17).RMW描述了台风内核区域的风速最大值的半径,R17描述了台风外围风速  $17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风圈半径.

近年来,台风尺度及其变化和相关物理机制受到越来越多的关注.一般来说,台风尺度受到初始涡旋和环境强迫的显著影响.多数研究认为成熟风暴的大小在很大程度上取决于初始扰动的大小<sup>[1-3]</sup>. Xu and Wang<sup>[4]</sup>研究了台风内核尺度对其初始涡旋尺度的敏感性,发现内核尺度在很大程度上取决于初始涡旋大小,并且比初始相对湿度更为重要.其中一个正反馈过程起着重要作用,更大的初始涡旋尺度意味着更大的表面熵通量和RMW外侧更大的绝对涡度,产生更强的螺旋雨带和非绝热加热,最终使得切向风向外扩张,获得更大的内核尺度.

环境条件对台风尺度及尺度变化也有重要影响.较多环境水汽通常有利于台风尺度的增大<sup>[5-8]</sup>. Hill and Lackmann<sup>[8]</sup>发现环境相对湿度对台风内核尺度有着重要影响,环境相对湿度越大台风内核尺度越大.环境高湿的试验伴随着更宽的螺旋雨带和更多的降水,导致了更宽的绝热位涡和风场的向外扩展.另外,对流层稳定性也可以影响台风尺度<sup>[9-12]</sup>. Tang et al<sup>[10]</sup>在日辐射变化影响飓风RMW收缩的研究中强调了对流活动的作用.观测研究表明,在北大西洋和西北太平洋,RMW和纬度有显著的相关性,在高纬度更容易出现更大尺度的台风<sup>[13-15]</sup>.理论研究和数值模拟表明,TC (Tropical Cyclone)大小与科氏参数 $f$ 成反比<sup>[16-19]</sup>. Chavas et al<sup>[19]</sup>指出  $V_p/f$  可以作为TC尺度的理论上限,其中  $V_p$  为最大潜在强度.尽管北大西洋平均纬度较高,但西北太平洋的TC尺度明显大于北大西洋,这表明其他环境条件对尺度的作用相对科氏力来说更加重要.此外,环境垂直风切变可以通过影响外雨带来控制台风尺度<sup>[20-21]</sup>.

与台风路径、强度的预报相比,台风尺度(包括RMW和R17)预报开展相对缓慢.目前主要采用的预报方法有:(1)在飞机探测或卫星资料推算

其实测结果的基础上,通过外推预报;(2)基于统计方法得到的风场分布经验模型进行预报.近年来,人工智能的发展推动了客观预测方法的研究<sup>[22]</sup>.然而到目前为止,对台风尺度可预报性的研究鲜有开展,而加深对台风尺度可预报性的认识无疑对开展和改进台风尺度预报具有重要的理论意义.本文通过一个西北太平洋台风个例,重点进行台风尺度可预报性初步研究,探讨不同风圈半径误差增长特征、初始涡旋及其环境影响台风尺度可预报性过程机制.

## 1 数值模式及分析方法

**1.1 模拟试验方案设计** 2021年超强台风“舒力基”(Surigae)于4月14日00时(UTC,下同)在菲律宾以东洋面生成,中心气压为988 hPa,在有利的条件下,经历了快速增强过程,并向西北移动.于17日12时(84 h后)达到最大强度,中心气压降低至882 hPa,最大风速半径RMW缩小为10 km,各象限平均外围风圈半径R17增大为300 km,成为有气象记录以来的四月份全球最强台风.台风“舒力基”(2021)整个生命史的移动路径、强度及其尺度变化如图1所示.台风观测资料使用美国联合台风预警中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)提供的最优路径(Best Track)资料,包括台风路径、强度、RMW和R17.

数值模式采用中尺度天气预报模式WRF 4.0版本<sup>[23]</sup>,模拟时间为台风生成后60 h(2021年4月14日00时至2021年4月16日12时).模式的初始条件和边界条件采用美国国家气候环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)提供的FNL分析资料.时间间隔为6 h,水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ .模拟区域如图2所示,采用双层双向嵌套网格,模式垂直层数为45,水平分辨率分别为18 km和6 km,格点数分别为 $173 \times 173$ 和 $202 \times 163$ ,其中外网格D01中心位于( $135^\circ\text{E}$ ,  $15^\circ\text{N}$ ),覆盖菲律宾以东的大尺度洋面,内网格D02覆盖了台风生成后60 h的移动范围.采用浅对流Kain-Fritsch积云对流参数化方案<sup>[24]</sup>、Lin云微物理参数化方案<sup>[25]</sup>、YSU行星边界层方案<sup>[26]</sup>、Thermal diffusion陆面过程方案<sup>[27]</sup>、RRTM长波辐射方案<sup>[28]</sup>和Dudhia短波辐射方案<sup>[29]</sup>.

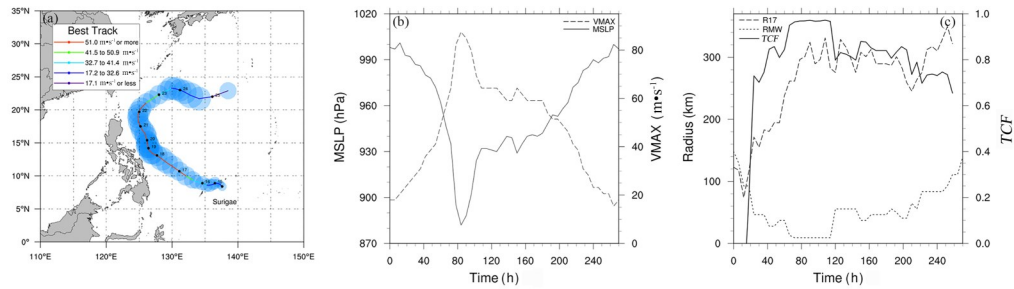


图 1 台风“舒力基”的(a)移动路径(彩色实线)和外围风圈半径 R17 覆盖范围(蓝色圆形),(b)中心气压(实线)和最大风速(虚线),(c)最大风速半径 RMW(短虚线)、外围风圈半径 R17(长虚线)和台风丰满度 TCF(实线)随时间的变化

Fig.1 (a) Track (colored line) and the radius of gale-force wind (R17, blue circle) of Surigae, (b) minimum sea level pressure (solid line, unit: hPa) and maximum wind speed (dashed, unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ), (c) the radius of maximum wind (RMW, short dashed, unit: km), the radius of gale-force wind (R17, long dashed line, unit: km) and tropical cyclone fullness (solid line) evolution with time

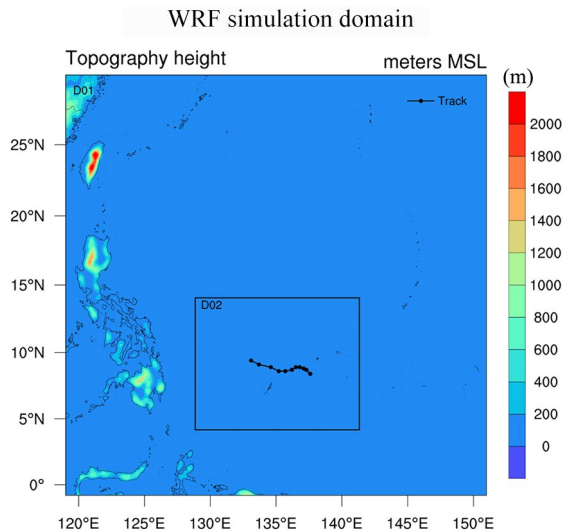


图 2 WRF 模拟区域,填色为地形高度,黑色点线为台风生成后 60 h 移动路径

Fig. 2 WRF simulation domain, topography height (shaded) and 60 h track after generation (dots and lines)

首先进行了一组确定性预报试验,其中包含四个模拟试验,从不同的起始时刻以 60, 48, 36 和 24 h 的预报时长积分至 2021 年 4 月 16 日 12 时,分别命名为 S60, S48, S36 和 S24,所有试验中模式配置相同。

为研究台风尺度可预报性,以 S60 作为控制试验(CTRL),利用 WRF 三维变分同化系统(3DVAR)中物理控制变量扰动方法(Random-CV)对 S60 中的初始场进行随机扰动,形成一组包含 30 个不同初始扰动的集合模拟。该集合初始

扰动方法已被应用于台风可预报性问题、强对流天气可预报性问题<sup>[30]</sup>。

**1.2 集合敏感性和误差分析** 本研究采用的集合预报结果分析方法包括相关性分析、总能量偏差(Difference Total Energy, DTE)估计和集合离散度分析。

相关性分析可了解变量可预报性,研究不同预测对象之间的关联性。计算台风尺度与要素场的相关系数为:

$$R = \frac{\sum_{n=1}^N (x_{ijk,n} - \bar{x}_{ijk})(y_{ijk,n} - \bar{y}_{ijk})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (x_{ijk,n} - \bar{x}_{ijk})^2 \sum_{n=1}^N (y_{ijk,n} - \bar{y}_{ijk})^2}}$$

其中,  $N$  为计算的格点总数,  $i, j, k$  分别为三维格点坐标,  $x$  为台风尺度,包括 RMW 和 R17,  $y$  为要素场变量,  $\bar{x}_{ijk}$  和  $\bar{y}_{ijk}$  代表了格点的集合平均值。相关系数的绝对值越大,表明尺度和要素场之间具有更强的关联性,对预报的指示意义也更强。

敏感性成员的总能量偏差也常用来度量集合的可预报性<sup>[31-32]</sup>, 计算为:

$$DTE = \frac{1}{2} \sum (U'_{ijk}{}^2 + V'_{ijk}{}^2 + \kappa T'_{ijk}{}^2)$$

其中,  $U'$ ,  $V'$ ,  $T'$  分别为集合成员的纬向风  $U$ 、经向风  $V$ 、温度  $T$  和集合平均或控制试验之间的差值,  $\kappa = c_p/T_r$  ( $c_p$  是定压比热容,  $T_r = 270 \text{ K}$ )。总能量偏差的计算范围是台风中心 300 km 以内,总能量偏差越小,表明集合成员的预报确定性越强。

集合离散度可以度量集合成员的分散情况,

常应用于台风强度可预报性研究<sup>[33]</sup>, 具体为:

$$spread = \frac{1}{N_x N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \left( \frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} (f_{i,j,m} - \bar{f}_{i,j})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

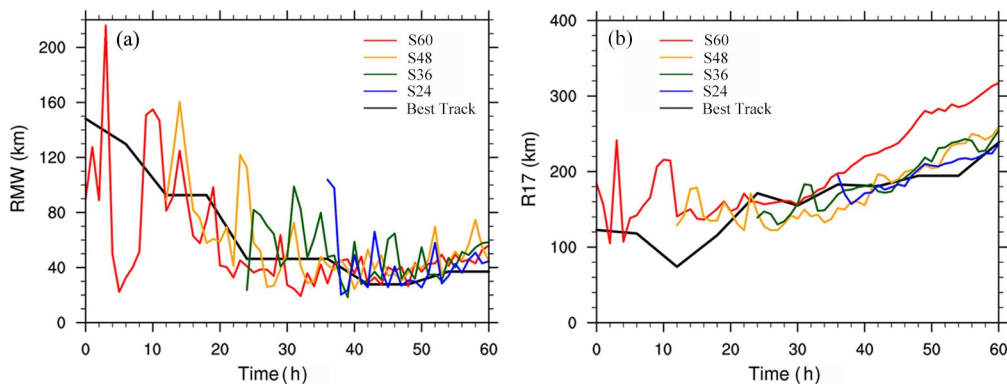
其中,  $N_x, N_y$  分别为  $x$  方向和  $y$  方向格点数,  $N_m$  为集合成员数,  $f$  为物理量,  $\bar{f}$  为物理量的集合平均. 集合离散度越大, 表明该物理量对初始扰动越敏感, 其可预报性越差.

## 2 台风尺度演变

为了验证模式对台风“舒力基”的模拟预报效果, 进行了四个预报时效分别为 60, 48, 36 和 24 h 的确定性模拟试验, 以不同的初始场分别积分到 16 日 12 时. 对于 S60 试验, 台风的模拟路径较观测资料显著偏北, 模拟误差可达 100 km. 随着预报时效的缩短, 模拟路径的北偏程度逐渐减小, S24 试验具有较好的模拟效果, 路径误差减小至

50 km 以内. 台风的强度模拟表明, S60 试验模拟的台风强度较观测偏高. 当预报时效缩短至 48 h 以内时, 三个试验对台风强度都取得了较好的模拟效果(图略). 这表明 WRF 可以一定程度上反映“舒力基”的发展状况, 可进一步用于研究尺度的可预报性.

图 3 为四个试验对 RMW 和 R17 的模拟结果. 总体上看, 所有试验均能模拟出 RMW 减小、R17 增大的趋势特征, 相应也表明台风在发展初期其丰满度(定义为<sup>[34]</sup>  $TCF = 1 - RMW/R17$ )增大、强度增强的特征(图 1c). 从四组试验尺度平均结果上看, 无论是内核尺度还是外围尺度在前 20 h 模拟中震荡明显, 这可能与模拟初期模式的不平衡因素有关. 在 20~40 h 模拟的 RMW 和 R17 与观测相比误差较小. 40 h 以后, R17 和 RMW 模拟均较观测高估.



The black line is the size observation data from JTWC.

图3 不同预报时效下, (a) RMW 和 (b) R17 (以 10 m 高度风场计算) 随时间的变化

Fig. 3 (a) RMW and (b) R17 (calculated at 10 m wind speed) evolution in four simulations with different lead time

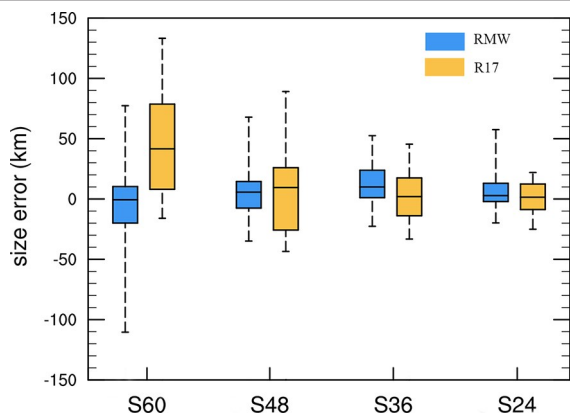
图 4 给出了四组试验模拟误差箱线图. 从图中可知, RMW 的误差均值在 10 km 左右, R17 高估更为明显, 在较长预报时效下的 R17 误差均值为 50 km, 远高于 RMW 误差, 但随着预报时效缩短, R17 误差均值逐步减小到 10 km 以内. 此外, S24 试验中 R17 误差相较于 RMW 其极差更小, 表明分散程度小.

上述结果表明, 模式可以较好模拟出台风发展初期尺度的演变趋势, 无论是 RMW, 还是 R17 大致上在 20~40 h 的误差增长较慢、模拟效果较好. 另外, 与 RMW 相比较, R17 的预报误差受预

报时效影响要大, 但分散程度小.

Wang and Lin<sup>[35]</sup>发现大气饱和状态可以影响台风入流层厚度, 进而显著影响台风尺度. 850 hPa 相对湿度可以反映大气的水汽供应情况, 为了探究不同预报时效试验对尺度模拟差异的来源, 图 5 给出了四个模拟试验 16 日 12 时 850 hPa 相对湿度和  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  外围风圈大小. 在四个试验中, S60 试验具备较好的水汽供应条件, 南北两侧存在宽广的高湿区, 水汽随着台风入流源源不断向风圈内输送, 相应地, 其具有更大的外围尺度 R17. 试验表明台风具有充足的水汽条件可保证





The upper, middle, and lower lines are the 25th, 50th, and 75th percentile lines, and the upper and lower short lines represent the maximum and minimum values.

图 4 不同预报时效 RMW 和 R17 模拟误差分布

Fig. 4 Size error distribution in four simulations with different lead time

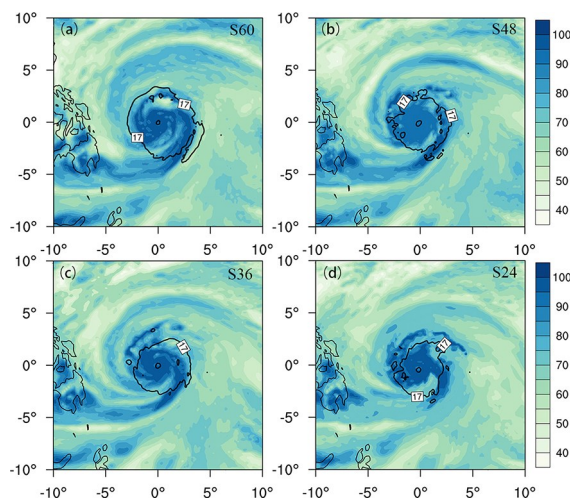


图 5 16 日 12 时 850 hPa 相对湿度 (填色, %) 和 10 m 高度  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  风速 (等值线), (a~d) 依次为 S60, S48, S36, S24

Fig. 5 Relative humidity on 850 hPa (shaded, %) and 10 m wind speed at  $17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  at 12:00 16<sup>th</sup>, (a~d) are S60, S48, S36 and S24, respectively

其外围尺度向外扩展. 而 S24 试验中, 相对湿度大于 80% 的高湿区主要集中在外围风圈内侧, 不利于风速的持续加强. 所以, 台风所处环境的水汽条件对台风外围尺度有着重要的影响作用.

由此可见, 不同预报时效的试验对台风外围尺度的模拟误差主要受到台风周围的水汽供应条件的影响. 环境相对湿度越高, 外围高湿度区域越宽广, 台风越有可能获得更大外围尺度.

### 3 台风尺度误差特征

**3.1 台风总能量误差增长特征** 为了研究初始涡旋及其所处环境对台风尺度模拟的影响, 以 S60 为控制试验, 利用 RandomCV 方法在台风生成时刻生成了 30 个初始扰动场, 形成一组集合预报试验. 集合成员的平均台风路径误差相对控制试验大大改善 (图略). 在具体分析台风尺度误差增长特征前, 首先需对台风误差增长有一个整体认识, 为此采用总能量误差来分析误差特征. 图 6 给出了所有成员和不同等压面上的总能量偏差随时间的变化. 可以看到各个成员的 DTE 在模拟前 20 h 快速增长, 随后误差增长缓慢, 成员间的增长率变化几乎一致. 图 6b 为各层集合平均与控制试验之间差异的 DTE 随时间增长. 在整体上, 误差 DTE 在低层主要以 850 hPa 为主, 与其他层次相比其增长率最大, 在 30 h 后成为误差最大贡献. 在高层, DTE 增长主要以 100 hPa 最为显著, 100 hPa 误差在 30 h 后趋于饱和. 此外, 500 hPa 的误差最小, 表明对台风引导气流的模拟更加可信, 表明台风路径具有更高的可预报性.

图 7 为集合平均相对控制试验的 850 hPa 总能量偏差的水平分布演变. 在模拟运行 24 h 时, 初期误差主要集中在台风中心 50~150 km, 主要分布在其东南象限. 随着台风发展, 误差在增大的同时逐渐向外扩散. 至 48 h 时, 距离台风中心 50 km 处的误差增长迅速. 总能量偏差的大值区与初始时刻的位置相比几乎不变.

由此可见, 从 DTE 的演变和分布来看, DTE 误差主要出现在对流层下层 850 hPa, 台风中心 50~150 km, 其大值区向外扩散不明显. 台风发展初期以 100 hPa 误差增长为主, 后期低层误差增长逐渐占据上风, 对流层中层 500 hPa 的误差始终维持较低水平.

为了进一步认识 DTE 增长特征, 以 R17 的预报误差作为主要选择依据, 确定了优成员 mem1、劣成员 mem12. 针对两个集合成员, 重点考察其 DTE 分布及其演变特征. 由前分析可知, 850 hPa 的 DTE 误差增长最显著. 图 8 为两成员 850 hPa DTE 的水平分布. 可见, mem1 的初始误差主要在内核区 (50 km 以内) 增长, 随着时间向外略微

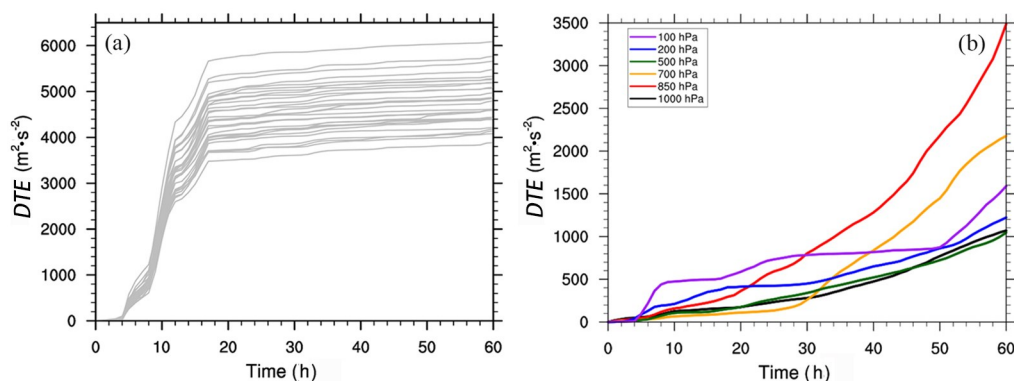


图6 (a)台风中心300 km范围所有成员整层的总能量偏差和(b)不同等压面上的总能量偏差( $DTE$ )随时间的变化  
(a)为所有成员相对CTRL;(b)为集合平均相对CTRL)

Fig.6 (a)  $DTE$  of all ensemble members and (b)  $DTE$  on several levels within 300 km radius of the center evolution with time ((a) for all ensemble members to CTRL, and (b) for ensemble mean to CTRL)

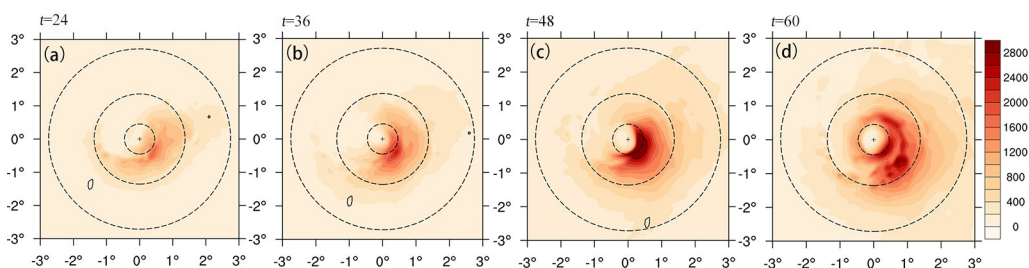


图7 集合平均的850 hPa总能量偏差( $DTE$ ,单位: $m^2 \cdot s^{-2}$ )水平分布随时间的演变,同心圆从内向外依次表示半径为50, 150, 300 km范围,(a~d)运行时间分别为24, 36, 48, 60 h

Fig.7  $DTE$  (unit: $m^2 \cdot s^{-2}$ ) of ensemble mean on 850 hPa evolution with time, the concentric circles represent the radius ranges of 50, 150, and 300 km from center,the lead times (a~d) are 24, 36, 48, and 60 h, respectively

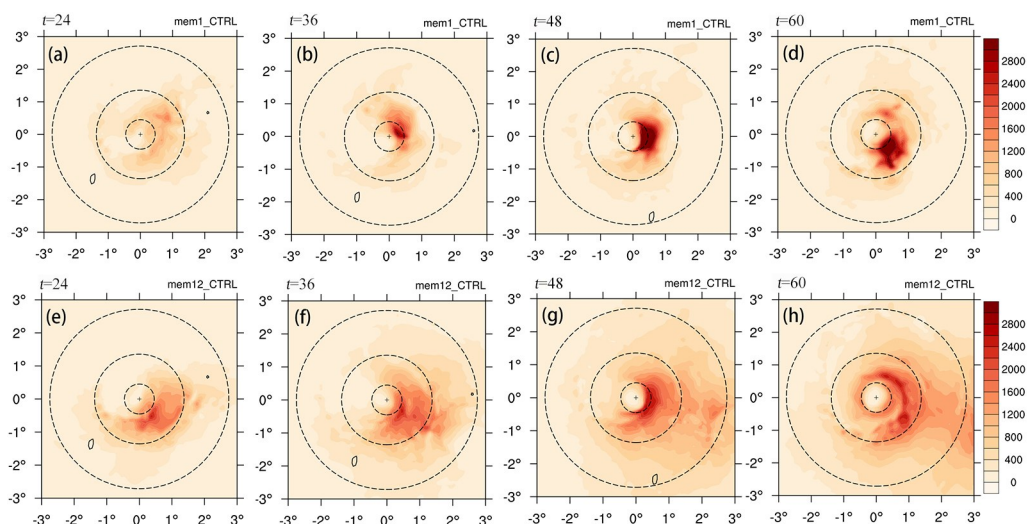


图8 mem1和mem12的850 hPa总能量偏差( $DTE$ ,单位: $m^2 \cdot s^{-2}$ )水平分布随时间的演变:(a~d)为mem1,(e~h)为mem12  
Fig. 8  $DTE$  (unit: $m^2 \cdot s^{-2}$ ) of mem1 and mem12 on 850 hPa, (a~d) for mem1, (e~h) for mem12

扩散增长,且集中在 150 km 以内的东北或东南象限.然而,尽管 mem12 中在 36~60 h 的 *DTE* 最大值更小,但其初始误差出现在 50~150 km 的东北和东南两个象限内,并且随着时间迅速向台风外围扩散至 300 km 以外.显然,*DTE* 增长特征同样可以反映出台风尺度误差特征.

图 9 为模拟 0, 12 和 24 h 两成员中心 300 km 范围的总能量偏差的垂直分布.分析发现在 0 时刻,初始误差集中在对流层中下层,两成员整层误差差别不大,而 850 hPa 处 mem1 的误差更小.随后各层误差增长,其中低层 850 hPa 和高层约 150 hPa 的增长尤为明显,并且前期以高层误差增长为主.尽管 24 h 后,高层 *DTE* 增长更为剧烈,但低层是影响台风尺度和水汽的主要区域,应作为关注重点.对比优劣成员,mem1 在低层的误差始终小于 mem12.

上述分析表明,在台风生成后 0~24 h,以高层误差增长为主.24 h 后误差增长发生在 850 hPa 的内核区外围,且优成员的误差更为集中,随时间

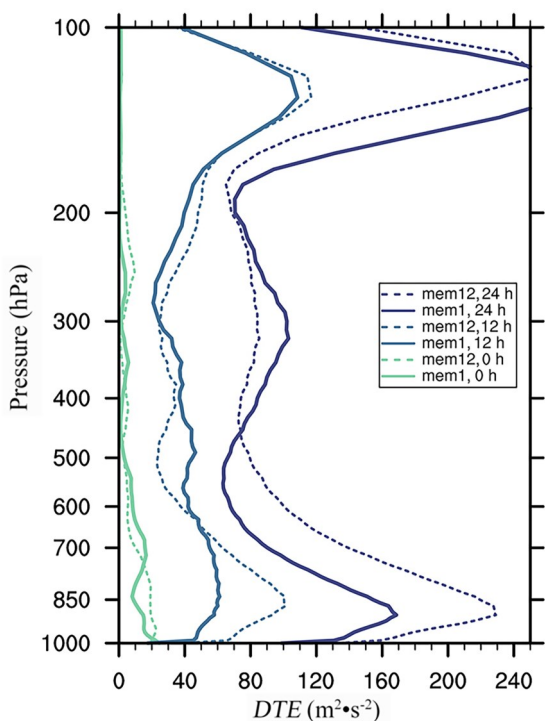


图 9 mem1 和 mem12 中心 300 km 范围的总能量偏差 (*DTE*) 垂直分布随时间的演变

Fig. 9 The vertical distribution of *DTE* within 300 km range of center

向外扩展范围要小,使外围尺度模拟效果更好.

**3.2 台风尺度误差增长特征** 图 10 是所有集合成员模拟的 RMW 和 R17 及其误差变化,红线是尺度的集合平均.可见, RMW 的模拟误差控制在 40 km 以内.在模拟稳定后, RMW 集合平均预报误差在 0 附近摆动.与控制试验相反,所有集合成员的 R17 预报被大幅低估,这可能与台风强度被低估有关.综合看来,集合预报对两个台风尺度参数的预报能力表现出差异性,对 RMW 做出了较为精确的预报,但对 R17 出现较大偏差.

## 4 初始环境水汽对尺度误差增长的影响

前面的分析表明台风尺度及其误差与环境水汽密切相关.图 11 计算了所有成员的 R17, RMW 与初始时刻、末时刻相对湿度和海平面气压的相关系数随时间的变化.图 11a 可见, R17 与初始相对湿度在 24 h 后(台风尺度稳定)呈现出稳定的正相关关系.相较于 R17, RMW 与初始相关性的相关性不明显.此外,无论是 R17 还是 RMW,与末时刻相对湿度的相关性都不高(低于 0.4),表明相对湿度对尺度的影响主要在初始阶段,初始水汽条件对台风尺度及其变化有重要的影响,且对台风外围尺度的影响较大.显然,环境相对湿度越大,台风越有可能拥有更大的外围尺度,该影响主要发生在台风发展初期.对于与台风强度关系密切的海平面气压,台风尺度和初始时刻海平面气压的相关性都不明显.

为进一步讨论初始环境水汽对台风尺度预报的影响,按照台风初始时刻距台风中心 300 km 范围 1000~500 hPa 平均相对湿度大小,将 30 个集合成员分成高相对湿度集合(高 RH 组)和低相对湿度集合(低 RH 组),各包含 15 个集合成员.图 12 为两组集合成员集合平均的台风尺度随时间演变.尽管两组集合初始相对湿度差别较小,但 24 h 后,高 RH 组的台风具有更大的外围尺度 R17, 60 h 后要高于低 RH 组的外围尺度大约 30 km.然而,两类集合中的内核尺度没有明显差异,表明初始环境水汽对台风尺度的影响主要发生在外围区域.



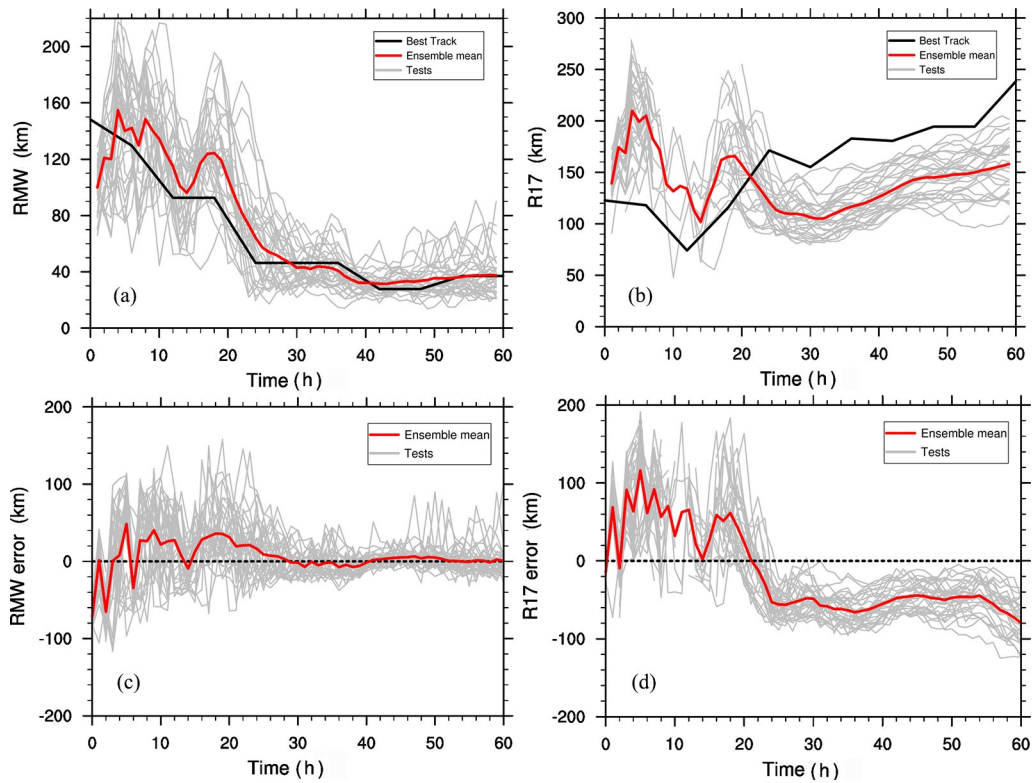


图 10 集合预报成员(a, c) RMW 和(b, d) R17 及其(c, d)模拟误差随时间的变化

Fig.10 (a, c) RMW and (b, d) R17 of all ensemble members, and (c, d) their errors evolution with time

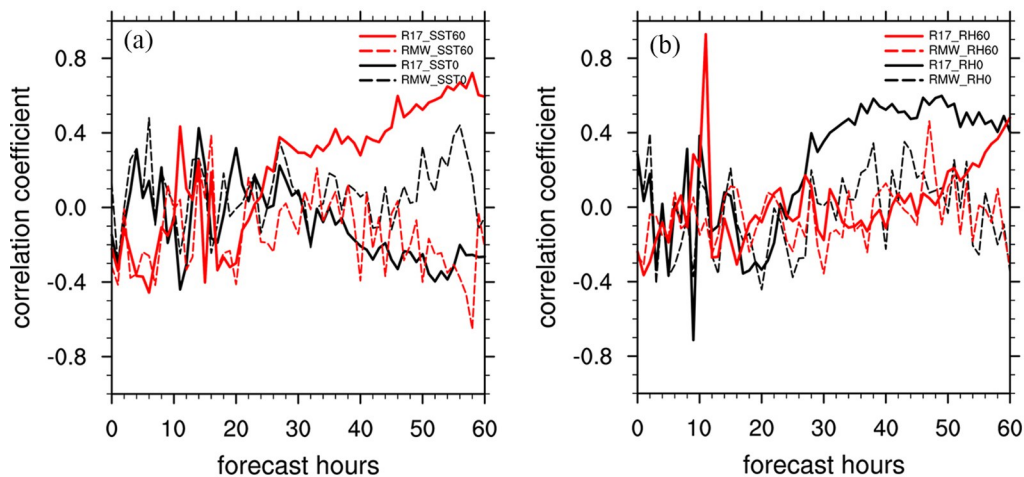
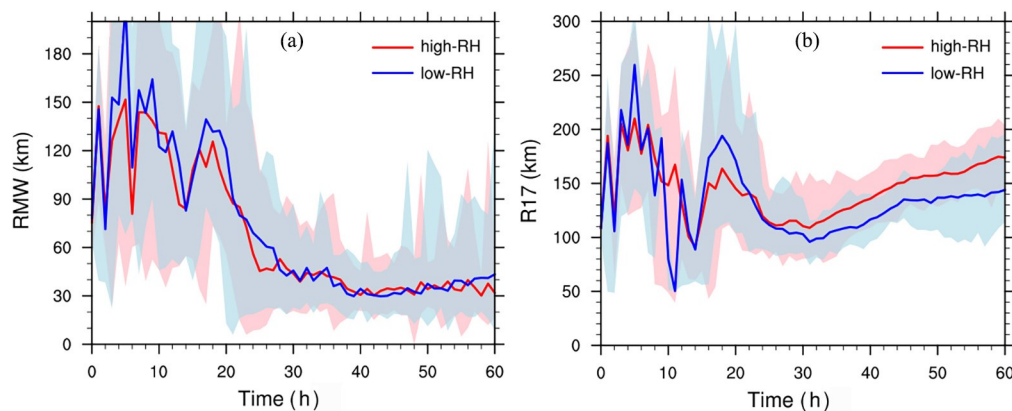


图 11 (a)所有成员 R17, RMW 和初始时刻、末时刻相对湿度相关系数变化,红线表示 R17(实线)、RMW(虚线)和末时刻相对湿度的相关系数,黑线表示 R17(实线)、RMW(虚线)和初始时刻相对湿度的相关系数;

(b)与(a)相同,但是为 R17, RMW 和海平面气压的相关系数

Fig. 11 (a) Correlation coefficients evolution with time between R17, RMW and relative humidity at initial and final time; Red line for R17 (solid lines) and RMW (dashed lines) at final time, black line for R17 (solid lines) and RMW (dashed lines) at initial time; (b) As in (a), but for sea level pressure





The red lines for the high-RH ensemble, the blue lines for the low-RH ensemble, and the boundary of the shaded area are the envelope lines of the corresponding ensemble.

图 12 两组集合(a) RMW 和(b) R17 随时间的演变

Fig. 12 The evolution of (a) RMW and (b) R17 in two ensembles

图 13 给出了两组集合 RMW 和 R17 的离散度随时间演变. 从图中可知, 无论初始环境水汽大小, 台风在后续发展中都出现较大的尺度离散度. 在初期 24 h, 尺度离散度震荡较大. 24~40 h, 两组集合尺度离散度降低至 20 km 左右. 与高 RH 组相比, 低 RH 组的台风外围尺度离散度更

小, 同时整体上 RMW 的离散度略低于 R17. 在 40 h 后, 低 RH 组的尺度离散度有明显增大趋势, RMW 离散度在 20 h 内从 10 km 增大至 30 km, 高 RH 组的两个尺度离散度维持在 20 km 左右. 可见, 在初始高湿环境下, 台风外围尺度在 48 h 内误差更大.

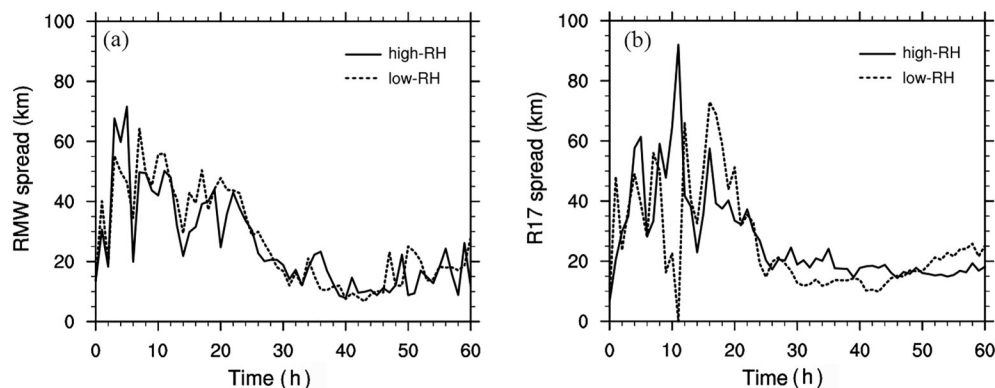


图 13 两组集合(a) RMW 和(b) R17 离散度随时间的演变

Fig. 13 The evolution of (a) RMW and (b) R17 spreads in two ensembles

为了进一步明晰初始水汽对 RMW 和 R17 离散度的影响的差异性, 图 14 分别给出了两组集合台风外围、内核区域的相对湿度、海表面潜热通量和海平面气压的离散度变化. 无论在内核区域, 还是在外围区域, 在整体上高 RH 组的三个物理量的离散度都要高于低 RH 组的离散度, 这个与尺度离散度特征相一致. 在初期 24 h, 相对湿度离散度变化无论哪种情况都较为一致, 与尺度离

散度特征相似, 主要与模式的调整相关. 在 24~40 h, 高 RH 组的地表潜热通量、海平面气压离散度要明显高于低 RH 组情况. 初始较多水汽、地表潜热输送有利于台风海平面气压的下降、台风外围尺度增大, 同样台风尺度离散度也偏高. 40 h 后, 两组的各物理量的离散度趋于相近, 同样尺度离散度变化也相类似. 由此说明, 初始环境水汽对台风尺度误差相关的误差增长起着重要作用,

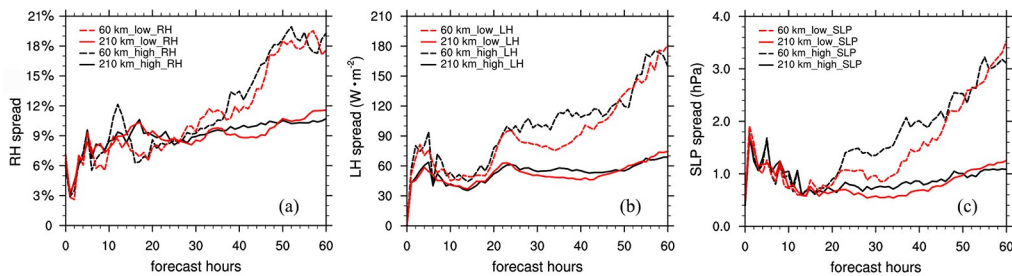


图14 (a)相对湿度、(b)地表潜热通量和(c)海平面气压的离散度随时间演变

Fig. 14 (a) Relative humidity, (b) surface latent heat flux, and (c) sea level pressure spreads

到台风发展的后期,其影响作用减弱.对比不同范围的离散度可以发现,24 h后台风中心较大范围的相对湿度、地表潜热输送和海平面气压的离散度更小,使外围尺度可预报性相对较高.

由上述分析可知,初始环境水汽可以影响尺度可预报性,初始高相对湿度有利于台风发展阶段高的尺度离散度.另外,外围区域相对湿度的离散度明显小于内核区域,使得R17和RMW在发展增强阶段离散度较为接近,在一定程度上,外围风圈半径的可预报性要高于内核风圈半径.

## 5 结论

本文利用数值模式WRF,以超强台风“舒力基”(2021)作为切入点,研究了台风尺度可预报性问题.结合集合预报方法,分析了两类台风尺度RMW和R17的误差增长特征,并探究了初始环境水汽对台风尺度可预报性的影响.

对确定性预报来说,模式可以较好地模拟出台风发展初期尺度的演变趋势,反映出数值模式对台风尺度具有一定的预报能力.无论是内核尺度RMW还是外围尺度R17,大致上在20~40 h台风发展阶段其尺度误差增长较慢、误差较小.台风周围的水汽供应条件对台风外围尺度误差有较大的影响.对集合预报结果的研究表明,台风预报误差主要出现在对流层下层850 hPa,距离台风中心50~150 km.在台风生成后0~24 h,以高层误差增长为主.24 h后误差增长发生在850 hPa的内核区外围.从初始环境场上看,初始相对湿度是影响台风尺度及其误差增长的重要因子,初始高湿环境有利于台风发展阶段的尺度高离散度.在一定程度上,外围风圈半径的可预报性要

高于内核风圈半径.

## 参考文献

- [1] Rotunno R, Emanuel K A. An air - sea interaction theory for tropical cyclones. Part II : Evolutionary study using a nonhydrostatic axisymmetric numerical model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1987, 44 (3):542—561.
- [2] Cocks S B, Gray W M. Variability of the outer wind profiles of western North Pacific typhoons: Classifications and techniques for analysis and forecasting. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(8): 1989—2005.
- [3] Lee C S, Cheung K K W, Fang W T, et al. Initial maintenance of tropical cyclone size in the western North Pacific. *Monthly Weather Review*, 2010, 138 (8):3207—3223.
- [4] Xu J, Wang Y Q. Sensitivity of the simulated tropical cyclone inner-core size to the initial vortex size. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(11):4135—4157.
- [5] Ying Y, Zhang Q H. A modeling study on tropical cyclone structural changes in response to ambient moisture variations. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 2012, 90(5):755—770.
- [6] Lin Y L, Zhao M, Zhang M H. Tropical cyclone rainfall area controlled by relative sea surface temperature. *Nature Communications*, 2015, 6:6591.
- [7] Emanuel K A, Neelin J D, Bretherton C S. On large-scale circulations in convecting atmospheres. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1994, 120(519):1111—1143.
- [8] Hill K A, Lackmann G M. Influence of environmental humidity on tropical cyclone size. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(10):3294—3315.

- [9] Wang Y Q. How do outer spiral rainbands affect tropical cyclone structure and intensity?. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2009, 66(5): 1250—1273.
- [10] Tang X D, Tan Z M, Fang J, et al. Impact of the diurnal radiation contrast on the contraction of radius of maximum wind during intensification of Hurricane Edouard (2014). *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 76(2): 421—432.
- [11] Zhao C F, Lin Y L, Wu F, et al. Enlarging rainfall area of tropical cyclones by atmospheric aerosols. *Geophysical Research Letters*, 2018, 45(16): 8604—8611.
- [12] Jones S C, Harr P A, Abraham J, et al. The extratropical transition of tropical cyclones: Forecast challenges, current understanding, and future directions. *Weather and Forecasting*, 2003, 18(6): 1052—1092.
- [13] Pérez-Alarcón A, SoríR, Fernández-Alvarez J C, et al. Comparative climatology of outer tropical cyclone size using radial wind profiles. *Weather and Climate Extremes*, 2021, 33: 100366.
- [14] Knaff J A, Longmore S P, Molenaar D A. An objective satellite-based tropical cyclone size climatology. *Journal of Climate*, 2014, 27(1): 455—476.
- [15] Carr III L E, Elsberry R L. Models of tropical cyclone wind distribution and beta - effect propagation for application to tropical cyclone track forecasting. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(12): 3190—3209.
- [16] Weatherford C L, Gray W M. Typhoon structure as revealed by aircraft reconnaissance. Part I : Data analysis and climatology. *Monthly Weather Review*, 1988, 116(5): 1032—1043.
- [17] Chavas D R, Emanuel K. Equilibrium tropical cyclone size in an idealized state of axisymmetric radiative - convective equilibrium. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2014, 71(5): 1663—1680.
- [18] Khairoutdinov M, Emanuel K. Rotating radiative - convective equilibrium simulated by a cloud-resolving model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2013, 5(4): 816—825.
- [19] Chavas D R, Lin N, Dong W H, et al. Observed tropical cyclone size revisited. *Journal of Climate*, 2016, 29(8): 2923—2939.
- [20] Chen B F, Davis C A, Kuo Y H. An idealized numerical study of shear-relative low-level mean flow on tropical cyclone intensity and size. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2019, 76(8): 2309—2334.
- [21] 向纯怡, 吴立广, 田伟, 等. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用. *气象*, 2016, 42(11): 1315—1324. (Xiang C Y, Wu L G, Tian W, et al. Applications of MTCSPA data to the characteristic analysis of tropical cyclone structure. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(11): 1315—1324.)
- [22] Zhuo J Y, Tan Z M. Physics - augmented deep learning to improve tropical cyclone intensity and size estimation from satellite imagery. *Monthly Weather Review*, 2021, 149(7): 2097—2113.
- [23] Skamarock W C, Klemp J B. A time - split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(7): 3465—3485.
- [24] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(23): 2784—2802.
- [25] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *Journal of Applied Meteorology*, 1983, 22(6): 1065—1092.
- [26] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(9): 2318—2341.
- [27] Dudhia J. A multi-layer soil temperature model for MM5//The 6<sup>th</sup> Annual PSU/NCAR Mesoscale Model Users' Workshop. Boulder, CO, USA: NCAR, 1996: 49—50.
- [28] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated - k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, 102(D14): 16663—16682.
- [29] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two - dimensional model. *Journal of Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077—3107.
- [30] Melhauser C, Zhang F Q. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(11): 3350—3371.



- [31] Mitchell H L, Houtekamer P L, Pellerin G. Ensemble size, balance, and model - error representation in an Ensemble Kalman Filter. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(11): 2791—2808.
- [32] Zhang F Q, Meng Z Y, Aksoy A. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I : Perfect model experiments. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(2): 722—736.
- [33] Li D Y, Tan Z M. The Role of ocean - atmosphere interactions in tropical cyclone intensity predictability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2023, 80(5): 1213—1226.
- [34] Guo X, Tan Z M. Tropical cyclone fullness: A new concept for interpreting storm intensity. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(9): 4324—4331.
- [35] Wang D Y, Lin Y L. Size and structure of dry and moist reversible tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2020, 77(6): 2091—2114.

(责任编辑 杨贞)