

陈涛,孙军,谌芸,等,2019. 广州“5·7”局地突发特大暴雨过程的数值可预报性分析[J]. 气象,45(9):1199-1212. Chen T, Sun J, Chen Y, et al, 2019. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteor Mon, 45(9):1199-1212(in Chinese).

广州“5·7”局地突发特大暴雨过程的 数值可预报性分析^{*}

陈 涛^{1,2} 孙 军¹ 谌 芸^{1,2} 郭云谦¹ 徐 璐¹

1 国家气象中心,北京 100081

2 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),珠海 519082

提 要: 2017 年 5 月 6 日夜间至 7 日上午广州地区发生局地特大暴雨,分析表明对流触发与珠江口地区边界层南风增强等因素有密切关系。数值模式预报检验表明,ECMWF 集合预报的强降水预报成员在初始条件上具有更显著的辐合上升、水汽和不稳定性条件,而 GRAPES 区域模式对 6 日 20 时初始场分析以及对边界层南风增强过程的预报都更为准确。集合敏感性分析表明,降水预报高敏感区分布与江南地区高压、南海高压以及华南低槽等关键天气系统的相对强度和位置有密切关系;降水对温度的预报敏感区主要位于关键区边界层内,近地面层到边界层底部温度越高、边界层顶越冷,越有利于对流不稳定性增强,有利于关键区内对流发展。通过 3 组探空预报试验分析了对流尺度降水预报关于初值热扰动、低层风场扰动和降水物理方案的敏感性,结果表明在特定环境条件下,与低层风场扰动试验组对比,降水预报对于初始热力扰动更为敏感;降水微物理方案预报试验表明,在小成员数的集合预报中物理方案扰动能够有效增大预报离散度。以上结果表明,分析对流尺度集合预报中各类初值扰动、物理扰动导致的预报变化和预报敏感性,能够更为全面地估计暖季中小尺度强降水事件的可预报性。

关键词: 中尺度对流系统,预报检验,集合敏感性分析,可预报性

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.002

Study on the Numerical Predictivity of Localized Severe Mesoscale Rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017

CHEN Tao^{1,2} SUN Jun¹ CHEN Yun^{1,2} GUO Yunqian¹ XU Jun¹

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082

Abstract: Severe mesoscale rainstorm struck Guangzhou heavily from deep night of 6 May to early morning of 7 May 2017, and convection initiation was closely related to southerly wind enhancing in boundary layer near Pearl River Delta at night. Comparison between two sub-groups in ECWFM ensemble forecasts shows members with strong rainfall have significant low-level convergence, updraft, moist air and convective instability in initial conditions. GRAPES mesoscale model performed well in forecasting the dynamic process of southerly wind strengthening in lower level, producing good forecasts for the rainfall process. Ensemble sensitivity analysis reveals that the high sensitivity depends on the relative position, strength of key synoptic systems for high pressure in Yangtze River Basin, high pressure on South China Sea and low pressure trough residing on South China. Precipitation forecast sensitivity to temperature is closely relative to

^{*} 国家重点研发计划(2017YFC1502103)和中国气象局暴雨专家创新团队专项(CMACXTD002-3)共同资助

2018 年 11 月 9 日收稿; 2019 年 7 月 10 日收修定稿

第一作者:陈涛,主要从事短期定量降水预报、中尺度天气分析. Email:chentao@cma.gov.cn

convective instability in boundary layer, the boundary structure with warmer air in near-surface and colder air near the top of boundary layer would increase convective instability obviously. Three sets of convective-scale simulations are applied to analyze sensitivity of convective precipitation forecast to initial thermal disturbance, low-level wind disturbance, and cloud microphysical scheme differences. Convective precipitation forecast shows more sensitivities to initial thermal disturbance compared with low-level wind disturbance, and forecast uncertainty could be estimated comprehensively through different cloud microphysical schemes. By carefully analyzing forecast sensitivity due to perturbations in initial conditions and physical process in the convective-scale ensemble forecasts, the predictability of mesoscale heavy rainfall events in warm seasons could be improved.

Key words: mesoscale convective system, forecast verification, ensemble sensitivity analysis (ESA), predictability

引言

Lorenz(1963;1969)通过简化非线性模型提出了大气可预报性概念,指出由于大气内在的混沌本质,不同尺度大气运动的可预报性存在有理论极值。具体天气事件的实际可预报性通常与运动尺度和特定大气流型相关(Zhang,2005; Zhang et al,2007),针对初始条件的预报敏感性分析可以采用奇异向量(Buizza and Palmer,1995)、伴随技术(Errico et al,2003)、显式扰动(Crook,1996)等方法。近年来随着集合预报应用,集合转换(Bishop and Toth,1999)、集合转换卡尔曼滤波(Bishop et al,2001)、集合敏感性(ensemble sensitivity analysis,ESA)等多种分析预报矩阵和初始条件之间关系的技术逐步得到发展,并在适应性观测试验等方面得到应用。Ansell and Hakim(2007)分析了伴随敏感性和ESA之间的区别和联系;Torn and Hakim(2008;2009)应用ESA对中纬度气旋发展、台风变性等过程的可预报性进行了分析,指出ESA对于解释大气流型特征、评估预报影响方面具有重要意义;Hanley et al(2013)在对流尺度集合预报中使用ESA分析了初始位涡结构对于降水预报的影响。

对于内在可预报性的分析则相对较为困难,在暖季对流性降雨过程中,中小尺度误差增长与高度非线性的湿对流物理过程密切相关(Melhauser and Zhang,2012),这种误差增长限制了中尺度天气过程的可预报性和潜在预报准确率。近年来对流尺度集合预报是科学研究和业务发展重点,美国灾害性天气预报试验中有多个对流尺度集合预报模式参与预报试验,在中尺度模式检验、高分辨率集合产品应用等方面取得了令人鼓舞的结果(Clark et al,2012;

Gallo et al,2017)。国内在区域尺度集合预报模式初始扰动构建、数值可预报性分析等方面也有显著进展(陈静等,2005;袁月等,2016;张涵斌等,2017)。但暖季对流性降水在量级、落区上的预报误差目前仍然相当明显,在对流尺度集合预报的模式构建、产品解释应用上仍然有相当多的问题。

2017年5月6日23时至7日下午16时(北京时间,下同),广东珠三角地区出现一次突发极端强降雨天气过程,降水局地性强、降水强度大,个别站点降水强度超过历史极值;业务数值预报对于此次极端降雨过程中强降水落区、量级预报均有一定误差。针对此次过程,徐珺等(2018)、田付友等(2018)、伍志方等(2018)均指出中尺度对流触发与边界层南风增强、城市热岛、中尺度地形抬升等因素具有关系紧密,傅佩玲等(2018)利用双偏振雷达资料分析了此次过程中高强度降水的云微物理机制。本文将针对此次局地强降水事件开展中尺度天气分析和定量降水预报检验,重点分析预报偏差产生的可能原因,采用ESA方法分析预报敏感性信息,并通过多初值、多物理过程的对流预报试验,分析初值条件和对流尺度下云微物理过程对于中尺度对流系统和降水预报的影响。通过分析这次典型华南暖季背景下局地对流性暴雨预报误差,进一步发展分析中尺度暴雨可预报性信息的技术方法,提高针对中尺度暴雨过程的数值预报误差分析能力,探讨利用对流尺度集合预报提高中尺度局地降水可预报性的可能性。

1 数据与方法

1.1 观测与模式分析和预报数据

本文主要使用的观测数据包括2017年5月

6—7日华南区加密自动站、广州番禺多普勒雷达基数据、清远站探空、广州萝岗站风廓线雷达数据。参与分析的数值模式产品如表1所示,分析数据来自EC-Interim分析场(<http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/>),预报资料来自EC-MWF-IFS预报系统(版本号:CYCLE41r2),其中含

有确定性高分辨率模式预报EC-HR和集合预报EC-EPS。另外还对NCEP-GFS确定性模式预报、中国气象局数值预报中心GRAPES-3 km和GRAPES-RAFS中尺度区域模式预报产品进行了分析检验。

表1 数据集特征

Table 1 Characteristics of datasets

| 模式 | 水平格距 | 资料间隔/h | 起报时间 | 类型 |
|--------------|---------------|--------|-------------------|----------|
| EC-HR | O1280 (~9 km) | 3 | 6日08、20时 | 全球确定性预报 |
| EC-EPS(51成员) | N640 (~13 km) | 6 | 6日08、20时 | 全球集合预报 |
| NCEP-GFS | 0.25° | 3 | 6日08、14、20时 | 全球确定性预报 |
| GRAPES-RAFS | 0.1° | 3 | 6日08、11、14、17、20时 | 区域快速循环同化 |
| GRAPES-3 km | 3 km | 1 | 6日20时 | 区域模式预报 |
| EC-Interim | 0.75° | 6 | \ | 再分析 |

1.2 集合敏感性分析(ESA)

本文利用EC-EPS进行ESA分析,讨论此次广州局地降雨事件对于初始条件的敏感性。预报敏感性可定义为初始条件改变后,预报响应函数的变化。在集合空间中预报敏感性可定义为:

$$\frac{\partial J}{\partial x_t} = \frac{\text{cov}(J, x_t)}{\text{var}(x_t)}$$

式中, J 为预报响应函数, x_t 为 t 时刻的状态变量,

$\frac{\partial J}{\partial x_0}$ 即为预报量对初值的敏感性;公式右边在集合空间中进行计算,其中cov为协方差算子,var为方差算子。Ansell and Hakim(2007)指出在集合预报空间中ESA等价于利用伴随梯度方法计算预报敏感性,但由于不需要复杂的伴随计算,ESA能够显著提升预报敏感性分析效率。

1.3 探空模拟试验

探空模拟试验通过背景探空结合模拟热扰动启动对流,能够诊断分析环境条件对中尺度对流系统结构特征的影响,同时也能够用于检验对流降水物理过程的性能,如Weisman and Rotunno(2004)利用探空对流试验分析垂直切变、冷池强度相对变化对于对流系统结构的影响。本文使用WRF-ARW(Version 3.9)中尺度数值模式进行对流探空试验,主要参数设置如表2所示;具体试验设计参见第4节。

表2 对流探空试验基本参数

Table 2 Basic parameters used in convective sounding experiments

| 参数 | 值 |
|----------|-------------------|
| 水平格距 | 1.5 km |
| 模式网格点 | 221×221×41 |
| 模式顶层高度 | 18 km |
| 边界层方案 | MYJ |
| 积分时间 | 6 h, 7日02—08时 |
| 积分步长 | 6 s |
| 陆面过程 | Noah LSM |
| 启动热泡中心强度 | 3 K |
| 对流热泡尺度 | 水平2.5 km, 垂直500 m |

2 降水过程分析

2.1 降水与天气形势

图1a为广州地面自动站6日20时至7日20时累积降雨量,强降雨过程主要发生在6日深夜至7日上午,7日下午以后降水明显减弱;广州市中南部地区降雨量普遍超过100 mm,最强两个降水中心分布位于花都站附近以及增城到广州站附近(以下简称广州站);其中增城新塘镇435.4 mm、花都花东镇334.8 mm,黄埔九龙镇544.5 mm打破广州市日雨量历史极值。

7日02时华南地区天气形势分析表明(图1b),500 hPa为平直西风气流,低层850 hPa风场上从广西中部到广东中部地区有很弱的暖式切变线,华南

中南部地区偏南风风速为 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 降水过程期间广东珠江口地区无明显冷空气、天气尺度锋面和低空急流活动。在这种弱天气强迫环流背景下, 6 日后半夜至 7 日白天, 图 1b 中红框内的珠江口地区 ($22.5\sim 24^\circ\text{N}$, $112.5\sim 114.5^\circ\text{E}$, 将此区域定义为预报关键区 S0) 发生局地强降水过程。以下将简要分析此次局地突发强降水的对流触发、发展过程和环境条件特征, 重点对此次强降水过程的可预报性展开研究。

2.2 对流发展过程

图 2 为 6 日夜间至 7 日早上广州区域地面自动站风场客观分析以及番禺多普勒雷达组合反射率。从 6 日 20 时起, 从珠江口沿海地区的南风持续增强并向内陆推进, 在地面风场上表现为位于偏南风前沿的风场辐合线。22 时风场辐合线位于广州中部地区(图 2a), 23:30 风场辐合线推进到广州北部的花都—从化之间(图 2b); 7 日 00 时花都以北约 20 km 地区附近, 对流单体开始发展, 00:30 左右 MCS(meso scale convective system, 中尺度对流系统)中的最强回波达到 $55\sim 60\text{ dBz}$ (图 2c), 风场辐合线仍然稳定维持在花都—从化之间。在随后的 1 个多小时, 对流系统移动缓慢, 对流强度明显发展, 01:30 雷达监测表明 50 dBz 以上强回波区范围增长明显(图 2d), 花都—从化之间转为受 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 偏北风控制, 表明对流冷池机制开始发挥作用, 风场辐合线南压到花都站—广州站之间。04 时左右是降水最强时段, 风场辐合线已经南压到广州站附近, 具有较明显的冷池边界性质, MCS 主要位于冷区一侧(图 2e); 07 时 MCS 具有相对明显的准东西向线状组织结构(图 2f), 位于广州站—番禺站之间, 随后 MCS 加快向南移动, 降水过程趋于结束。

7 日 02 时广州北部 MCS 刚开始发展, 从附近清远站(站号: 59280)探空看(图 3a), 0°C 层较高、LCL 高度较低表明环境场上具有相对深厚的暖层, 并具有中等对流有效位能($1286\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}$)、中等程度的 $0\sim 6\text{ km}$ 风垂直切变($12\sim 14\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), Schumacher and Johnson(2005)研究表明这类暖湿环境条件下有利于产生密集的降雨粒子, 具有较高的降水效率。根据花都风廓线雷达观测(图 3b), 6 日 20—21 时 1000 m 以下以 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 偏东风为主, 21:30—22:30 边界层盛行风向转为东南风, 风速增加到 $4\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 22:30 以后南风分量进一步增

大, 与图 2 中地面南风加强过程基本一致。

总体而言, 此次降雨过程是一次 β 中尺度局地强降雨过程, 具备一定的暖区对流强降雨性质; 地面加密自动站观测和边界层风廓线观测都证实了夜间边界层南风加强特征, 随着南风推进到广州北部花都附近的中尺度山地地形, MCS 触发并迅速发展。徐珺等(2018)、田付友等(2018)对于此次过程中的对流发展、边界层物理过程、中尺度地形影响等方面已经做了较为细致的分析, 指出极端降雨量的产生与暖云高降水效率、MCS 组织和停滞少动等因素密切相关, 本文将重点对各类业务数值模式的预报信息进行分析, 并通过 ESA 和数值模拟分析降水预报敏感性。

3 降水预报检验与预报敏感性分析

3.1 数值模式降水预报检验

图 4a 为各家模式不同起报时刻的 S0 区域平均累积降水量预报(6 日 20 时至 7 日 08 时)。自动站观测表明 S0 区域平均降水量 31.4 mm , 最大单站降水 401.6 mm ; 6 日 08、20 时起报的全球模式 EC-HR、NCEP-GFS 降水量预报均远弱于实况。6 日 20 时起报的 EC-EPS 离散度增大, 集合成员降水量最大值也有增大, 从预报调整趋势上具有一定指示意义, 但降水量仍然较实况偏弱很多。随着预报时效临近, 区域快速循环同化模式 GRAPES-RAFS 在 6 日 14、17、20 时起报的区域平均降雨量预报提高到 $17\sim 22\text{ mm}$, 区域内最大单点降水值预报 (56 mm) 还是比实况降雨量弱很多。20 时起报的 GRAPES-3 km 模式于 7 日 00 时左右启动对流, 区域平均 12 h 累积降雨量接近 30 mm , 最大单点降雨量 353 mm 与实况较为接近(图 4b), 但降水落区较为偏向广州西北方向的中尺度地形区, 预报对流系统没有表现出明显的移动传播特征, 另外广西东南部降水也明显偏强。

从 6 日 20 时 GRAPES-3 km 模式的风场分析误差(图 5)看, 分析风场的冷切变线位置比预报风场的更为偏东偏南, S2 区域内分析风场的北风分量明显强于预报场; 海平面气压分析误差表明影响 S1 区域的大陆高压、影响 S2 区域的海上高压以及华南低槽区在天气系统相对位置、强度上都有一定调整, 其中大陆高压和海上高压分析场均较 12 h 预报场

增强,造成华南北部气压梯度增大以及 S0 关键区内边界层风场的东风分析增量明显。对比风廓线实况演变(图 3b),GRAPES-3 km 较好地反映了 6 日夜

间 S0 区域内边界层内东-东南风转为偏南风并增强的过程(图 6a),而 EC-HR 对于这一关键边界层动力过程没有明显反映(图 6b)。

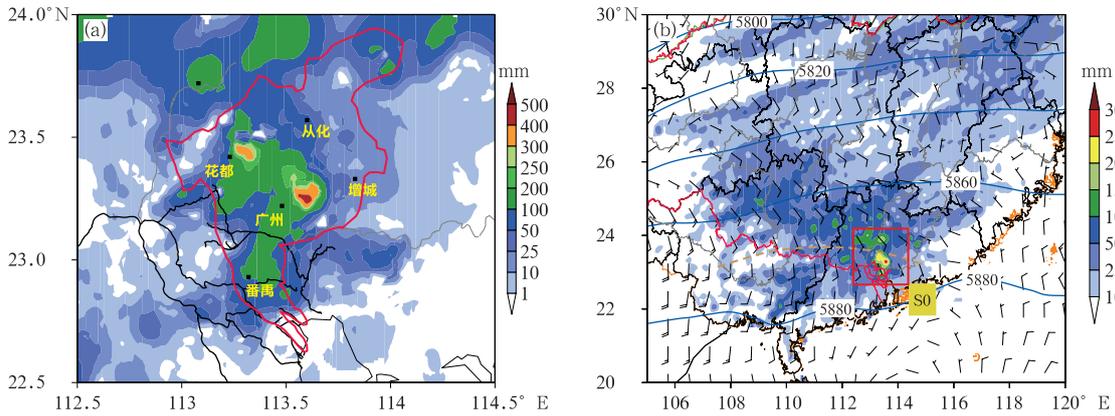


图 1 2017 年 5 月 6 日 20 时至 7 日 20 时广州地区累积降雨量(a),7 日 02 时 EC-Interim 分析 500 hPa 高度场(蓝色等值线,单位:gpm)和 850 hPa 风场(b)
(红色方框:珠江口关键降水区 S0,黄色断线:风场暖切变线,填色:6 日 20 时至 7 日 20 时自动站累积降水量)
Fig. 1 Accumulated precipitation (unit; mm) around Guangzhou from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 May 2017 (a), geopotential height (blue contour, unit; gpm) at 500 hPa and wind at 850 hPa from EC-Interim analysis at 02:00 BT 7 May 2017 (b)
(S0: forecast key area; yellow dashed line: wind shear line; shaded area: accumulated precipitation during the same timespan)

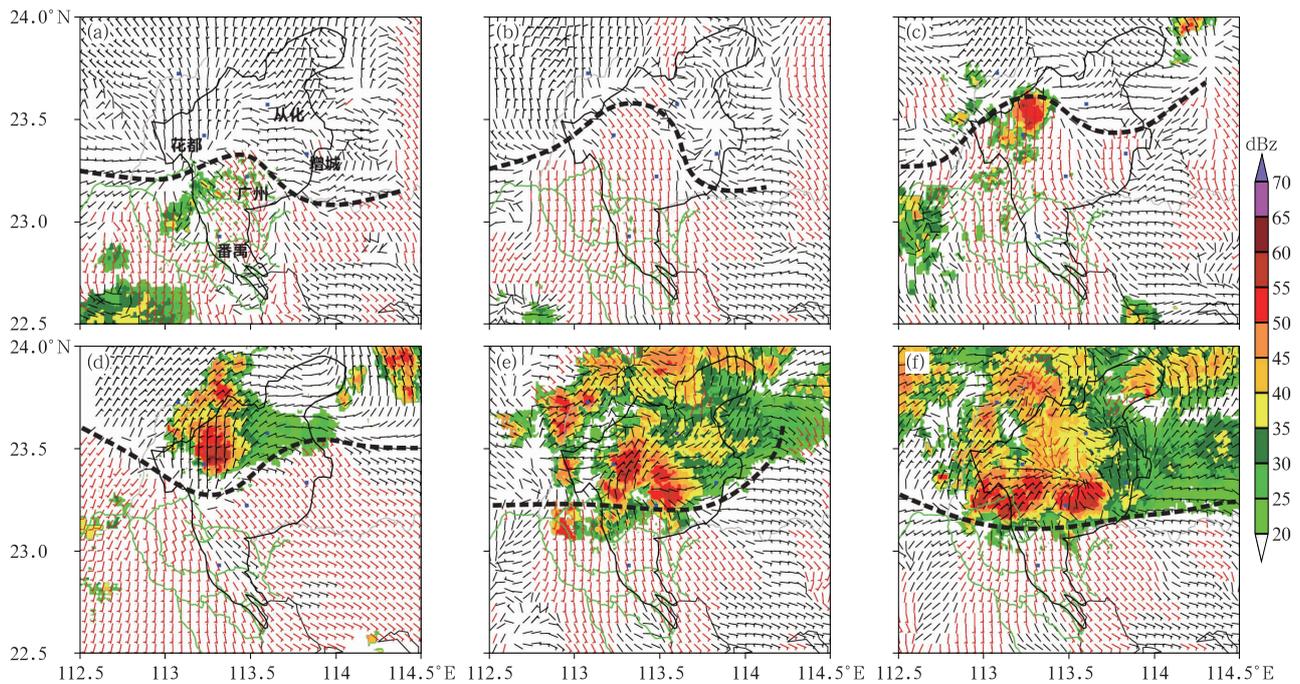


图 2 2017 年 5 月 6 日 22:00(a),23:30(b)和 7 日 00:30(c),01:30(d),04:00(e),07:00(f)番禺雷达组合反射率(填色)和加密自动站地面客观分析风场
(点断线:风场切变线,红色风矢量:大于 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的南风分量)

Fig. 2 Composite reflectivity from Fanyu Doppler Radar and surface wind analysis at 22:00 BT 6 (a), 23:30 BT 6 (b), 00:30 BT 7 (c), 01:30 BT 7 (d), 04:00 BT 7 (e), 07:00 BT 7 (f) May 2017
(short dashed line: wind shear zone, red barb: south component of wind speed over than $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

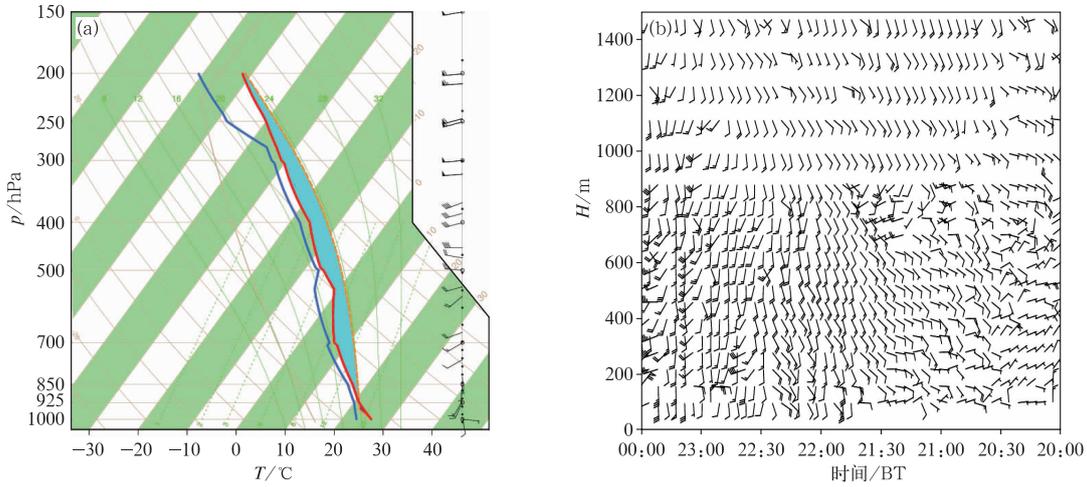


图 3 2017 年 5 月 7 日 02 时清远站 T - lgp 探空图(a),6 日 20 时至 7 日 00 时
花都站风廓线雷达观测 0~1500 m 高度水平风(b)

Fig. 3 T - lgp diagram from Qingyuan Sounding Station at 02:00 BT 7 May 2017 (a),
0—1500 m horizontal wind profile from Huadu wind profiler from
20:00 BT 6 to 00:00 BT 7 May 2017 (b)

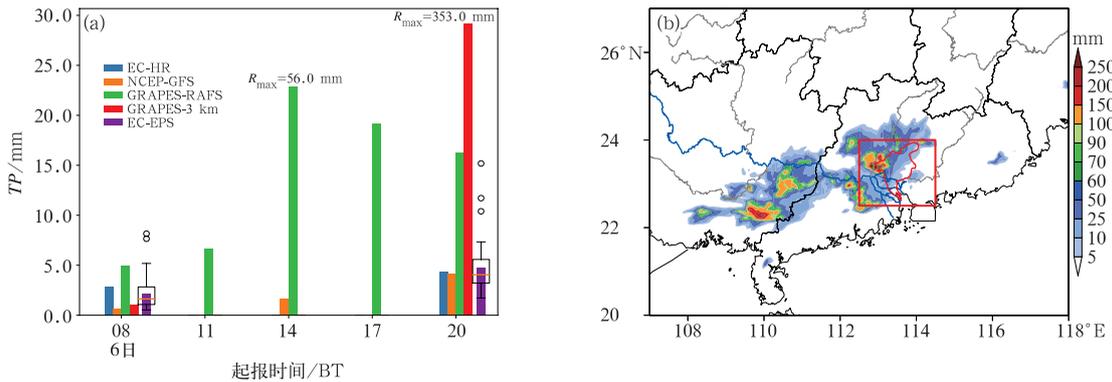


图 4 不同模式 2017 年 5 月 6 日 20 时至 7 日 08 时 S0 区域平均降水量预报(TP)(a; R_{max} :对应模式
预报 S0 区域内最大单点降水量)和 6 日 20 时至 7 日 08 时 GRAPES-3 km 累积降水量预报(b)

Fig. 4 Averaged accumulated precipitation forecast for Area S0 (TP) from 20:00 BT 6
to 08:00 BT 7 May 2017 (a; R_{max} means maximum point precipitation forecast),
and accumulated precipitation forecast from GRAEPS-3 km from
20:00 BT 6 to 08:00 BT 7 May 2017 (b)

此次广州强降水事件中天气尺度强迫较弱,边界层内南风增强过程是对流触发的关键过程之一;GRAPES-3 km/RAFS 等区域尺度模式对于对流发生前边界层南风增强过程做出了正确预报,其对流启动时间、最大降水强度等关键预报指标与实况降水过程较为接近。GRAPES-3 km 模式初始场的分析增量定性表明了关键天气系统位置、强度变化对于降水预报的潜在影响,借助集合预报检验和集合敏感性分析,能够对预报目标与初始场之间的相关

做进一步定量分析。

3.2 EC-EPS 降水预报检验和集合敏感性分析

EC-EPS 降水预报对于此次强降水过程具有一定的预报指示意义,S0 区域内集合平均降水量出现了 20~30 mm 的降水中心(图 7a),其中大多数集合成员在珠江口地区预报有 10 mm 左右的平均降雨量,7 个成员预报有超过 20 mm 的区域平均降雨量,分别为集合成员 EPS 04、09、11、19、21、27、39

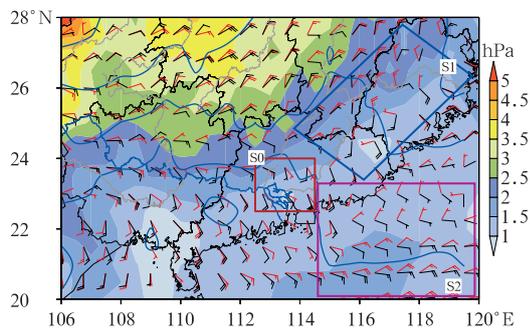


图 5 2017 年 5 月 6 日 20 时 GRAPES-3 km 模式 925 hPa 分析风场(红色风向杆)和预报风场(黑色风向杆,6 日 08 时起报),海平面气压分析场(蓝色等值线)和分析误差(填色)(S1、S2 区域为根据显著分析误差确定的预报敏感区)

Fig. 5 The 925 hPa wind analysis at 20:00 BT 6 May 2017 (red barb) and wind forecast (black barb, starting at 08:00 BT 6 May 2017), sea surface pressure (blue contour) and analysis error (shaded area) from GRAPES-3 km (S1, S2 represent sensitive area according to dominant analysis error)

(图 7b)。

表 3 为 S0 关键预报区内 EC-EPS 中强、弱组降水成员的诊断量对比。分组集合成员在 6 日 20 时初始场上大气整层可降水含量(total precipitable water, TPW)、对流有效位能(convective available potential energy, CAPE)较为接近,但强降水成员组的低层上升运动和辐合都要明显强于弱降水成员集合,动力条件更有利于在 S0 区域产生明显降水;另外强降水成员组的 S2 与 S0 区域平均气压差值、

925 hPa 东风分量明显都大于弱降水集合。到 7 日 02 时,强、弱降水集合成员之间的环流特征差异更为显著,强降水成员组在 S0 区域内具有较为明显的气旋式切变,区域平均南风风速明显较大;弱降水成员组在 S0 区为较为一致的偏南风,没有明显的切变辐合。以上结果表明,在初始条件上倾向于产生明显降水的集合成员经过 6 h 模式预报后,模式预报动力条件上更有利产生降水;在初始条件上不利于产生明显降水的集合成员经过 6 h 预报后,环境场条件仍然不利于产生强降水。通过集合预报和集合预报敏感性分析,可进一步定量分析初始场上的各类动力、热力因子时空分布对预报量的影响。

3.3 集合预报敏感性分析

对于此次过程,定义 6 日 20 时至 7 日 20 时 S0 区域平均降雨量(total precipitation, TP)作为关键预报量。Doswell III et al(1996)提出与对流性降水密切相关的预报因子主要包括水汽、抬升和层结不稳定性,因此以下主要针对 TPW、海平面气压 SLP、850 hPa 风场 u/v 、温度场 T 集合模式 EC-EPS 预报量进行预报敏感性分析,相应的集合预报敏感性可定量表达为 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial TPW}$ 、 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial SLP}$ 、 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial u}$ 、 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ 、 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial T}$ 。

6 日 20 时至 7 日 02 时之间随着低层西南风和东南风向 S0 区域的水汽输送(图 8), $\frac{\partial J_{TP}}{\partial TPW}$ 高值区主要分布在 S0 区域 200 km 西南方向和偏东方向(图 8a,8b);7 日 08 时正敏感区位于预报目标区域内部(图 8c),负值高敏感区位于 S0 区域北侧,并且

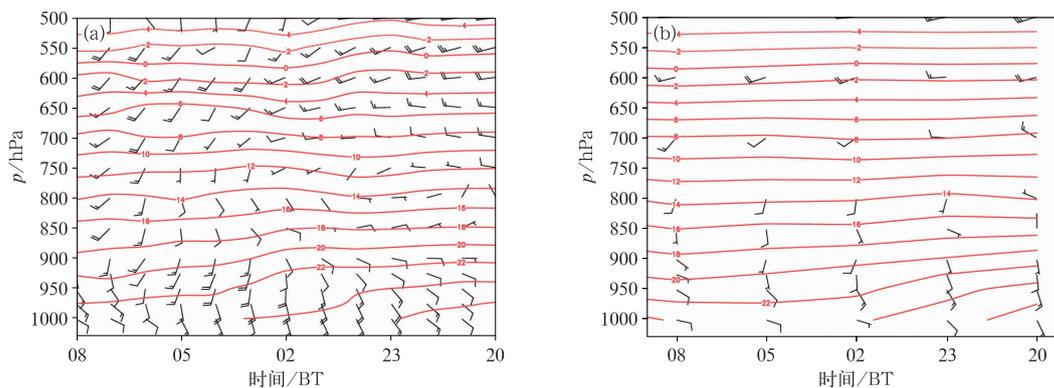


图 6 2017 年 5 月 6 日 20 时至 7 日 08 时 GRAPES-3 km(a)和 EC-HR(b)模式预报 S0 区域平均水平风场垂直廓线和温度演变(红色等值线,单位: °C)

Fig. 6 Area-averaged horizontal wind and temperature (red contour, unit: °C) profile for Area S0 from GRAPES-3 km (a) and EC-HR (b) from 20:00 BT 6 to 08:00 BT 7 May 2017

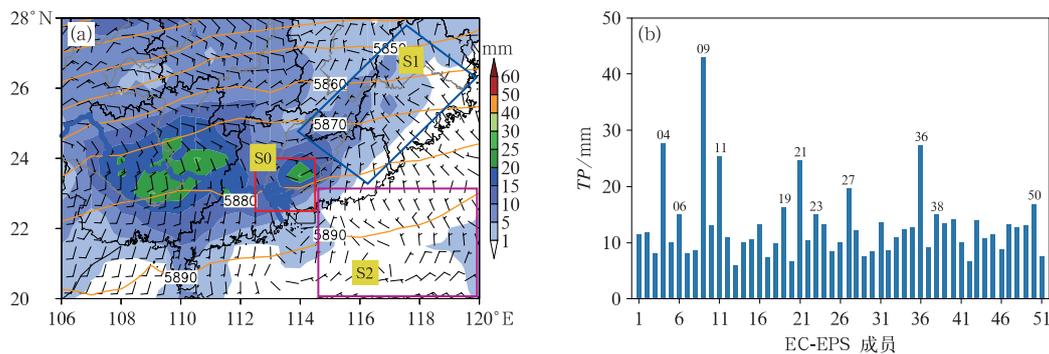


图 7 2017 年 5 月 6 日 20 时起报的 EC-EPS 集合平均 500 hPa 高度场(蓝色等值线,单位: gpm)和 850 hPa 风场(a;填色为 6 日 20 时至 7 日 20 时集合平均降水量),S0 区域平均的所有 EC-EPS 集合成员降水量演变(b;数字为成员编号)

Fig. 7 Ensemble mean geopotential height at 500 hPa (blue contour, unit: gpm) and wind at 850 hPa from EC-EPS forecast at 20:00 BT 6 May 2017 (a; shaded area is for accumulated precipitation from 20:00 BT 6 to 20:00 BT 7 May 2017); and area-averaged precipitation in Area S0 from all members of EC-EPS (b)

表 3 EC-EPS 分组成员诊断量与清远探空观测对比

Table 3 Area-averaged diagnostics for two sub-classes from EC-EPS and sounding at Qingyuan Station

| 物理诊断量 | 强降水成员集合 | 弱降水成员集合 | 探空观测/地面观测 |
|--|---------|---------|-----------|
| 6 日 20 时至 7 日 20 时区域平均降雨量/mm | 22.8 | 8.2 | 35 |
| 最大单点降雨量/mm | 86.0 | 18.0 | 453 |
| 6 日 20 时 TPW/mm | 49.6 | 45.5 | 56 |
| 6 日 20 时 CAPE/J · kg ⁻¹ | 552.6 | 513.8 | 1367 |
| 6 日 20 时 850 hPa 上升运动/Pa · s ⁻¹ | -0.24 | -0.21 | \ |
| 6 日 20 时 850 hPa 散度/s ⁻¹ | -6.6 | -1.3 | \ |
| 6 日 20 时 S0 区域 925 hPa 平均 u 风 /m · s ⁻¹ | -2.4 | -1.1 | \ |
| 6 日 20 时 S2-S0 区域气压差/hPa | 2.2 | 1.2 | \ |
| 7 日 02 时 S0 区域平均 v 风/m · s ⁻¹ | 4.8 | 3.2 | \ |

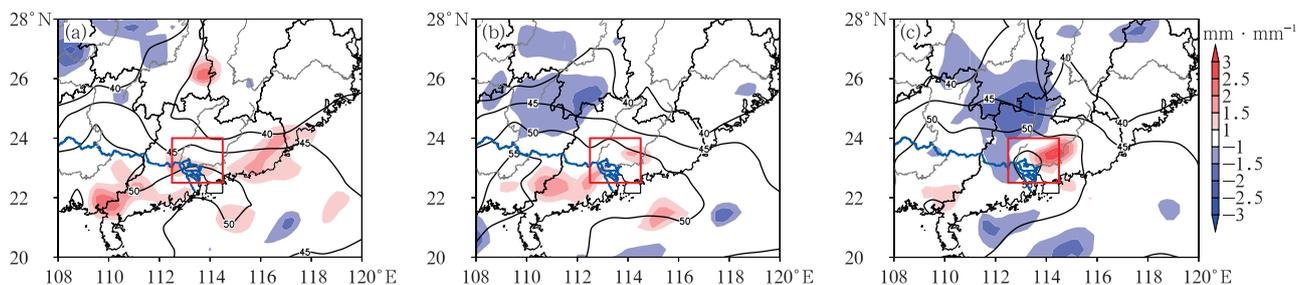


图 8 2017 年 5 月 6 日 20 时(a),7 日 02 时(b),08 时(c)集合预报敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial TPW}$ (填色)

(等值线为集合平均 TPW,单位: mm)

Fig. 8 Ensemble sensitivity $\frac{\partial J_{TP}}{\partial TPW}$ (shaded area) at 20:00 BT 6 (a), 02:00 BT 7 (b), 08:00 BT 7 (c) May 2017

(Contour stands for ensemble mean of TPW, unit: mm)

预报敏感性绝对值相对初始时刻有所增强,主要原因是 7 日 02 时之后珠三角地区 MCS 进入迅速发展阶段,紧邻 MCS 周边的环境场水汽供应与强降雨

相关最为密切;广东北部—湖南南部的负相关区表明如果华南北部降水区具有更好的水汽条件,则会对目标区域内的降水总量产生不利影响。

TP 对 SLP 的集合预报敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial SLP}$ 分布 (图 9) 表明, 6 日 20 时高敏感区主要位于目标区外围华南北部—江南南部以及南海海面上 (图 9a), 并且都是正值区, 这表明在 S_0 区域北侧的大陆高压和 S_0 区域东南侧的南海高压区越强, 越有利于低槽区 S_0 区域内辐合和南风增强, 形成有利于降雨的动力条件。7 日 02—08 时预报敏感区主要位于 S_0 区域内部 (图 9b, 9c), 高预报敏感性的产生原因在于华

南中南部地区的低压槽越强, 越有利于在 S_0 区域内产生较明显的辐合, 从而有利于 S_0 区域内的对流系统发展并形成强降水。

从 TP 对 850 hPa 纬向风 u 和经向风 v 的集合预报敏感性 ($\frac{\partial J_{TP}}{\partial u}$ 和 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$) 来看 (图 10), 6 日 20 时 TP 对 u 的正敏感区主要分布在 S_0 区域西南方 (图 10a), 主要原因在于 TP 与来自西南方向的水汽、动量输送相关紧密。 TP 对 v 的正敏感区主要

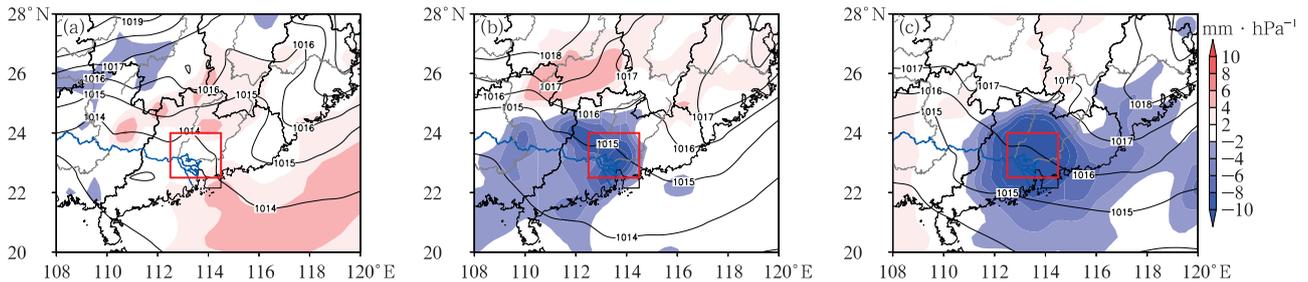


图 9 2017 年 5 月 6 日 20 时 (a), 7 日 02 时 (b), 7 日 08 时 (c) 集合预报敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial SLP}$ (填色)
(等值线为 EC-EPS 集合平均 SLP, 单位: hPa)

Fig. 9 Ensemble sensitivity $\frac{\partial J_{TP}}{\partial SLP}$ (shaded area) at 20:00 BT 6 (a), 02:00 BT 7 (b), 08:00 BT 7 (c) May 2017
(Contour stands for ensemble mean of SLP from EC-EPS, unit: hPa)

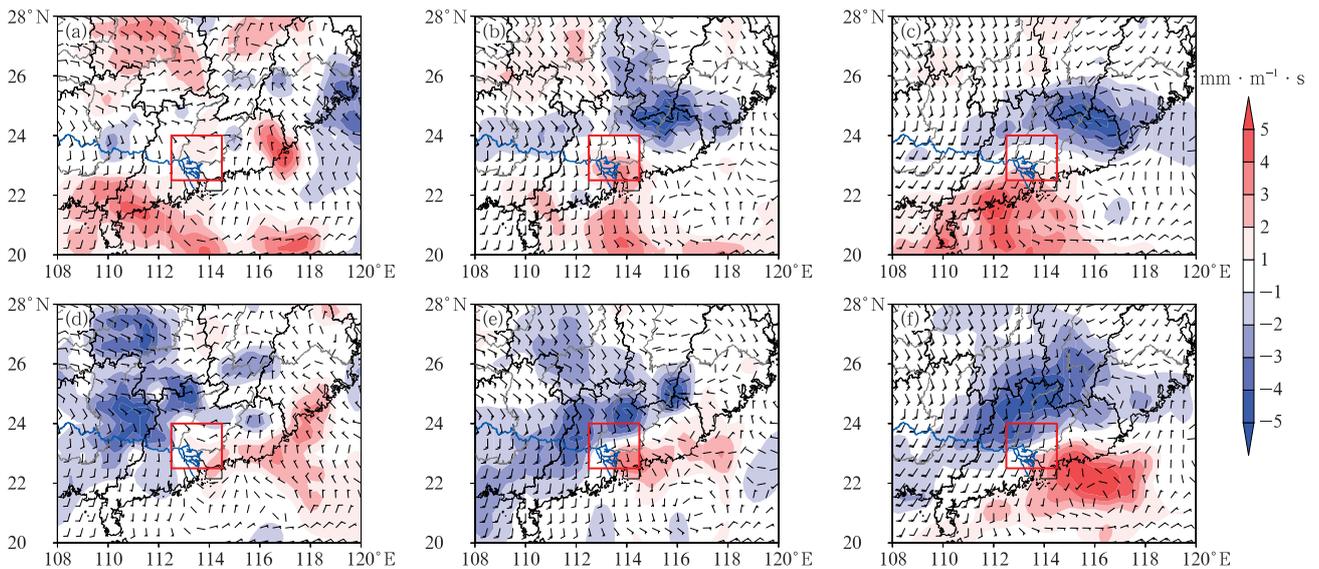


图 10 2017 年 5 月 6 日 20 时 (a, d), 7 日 02 时 (b, e), 08 时 (c, f) 集合预报敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial u}$ (a, b, c; 填色) 和 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ (d, e, f; 填色)
(风向杆为 EC-EPS 集合平均 850 hPa 风场)

Fig. 10 Ensemble sensitivity (shaded area) for $\frac{\partial J_{TP}}{\partial u}$ (a, b, c) and $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ (d, e, f) at 20:00 BT 6 (a, d), 02:00 BT 7 (b, e), 08:00 BT 7 (c, f) May 2017
(Wind barb stands for ensemble mean at 850 hPa from EC-EPS)

位于华南西部(图 10d),这一带地区偏南风增强有利于水汽输送,对 S0 区域降水较为有利;负敏感区主要位于南海东北部海区,这一带地区偏北风风速分量越大,对于 S0 区域内的降水越有利,这与对于入海高压的预报敏感性分析以及关于风场预报偏差的分析结果一致。

从 7 日 02 时风场集合预报敏感性分析看, TP 对 u 的负敏感区主要分布在华南中部暖切变北侧的偏东风气流中(图 10b), TP 对 v 的敏感区主要位于目标区南北两侧(图 10e); 08 时的风场敏感性结构(图 10c, 10f)与 02 时较为相似,但预报敏感性更为显著。总体来说,当 S0 关键预报区南侧的西风、南风分量越大,北侧的南风分量越小、东风分量越大时, S0 区域内的辐合、旋转越强,越有利于目标区 TP 增长,当南风风速增加 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,关键区平均降水量可增加 $3 \sim 5 \text{ mm}$ 。

7 日 02 时 TP 对于经向风的敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ 垂直分布(图 11a)表明,高值区主要分布在 850 hPa 以下低层, $1000 \sim 850 \text{ hPa}$ 之间敏感性随高度逐步降低; 24°N 以南为显著正敏感区,以北为显著负敏感区。从敏感区结构特征看,当目标区 S0 区域南侧的南风

和区域北侧的北风较强时,在目标区内将产生较强辐合,利于形成较强降水。

TP 对温度的集合预报敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial T}$ 垂直分布(图 11b)表明,高值区主要分布在 700 hPa 以下,其中在 900 hPa 以下为正敏感区,而在 $850 \sim 700 \text{ hPa}$ 的边界层顶附近呈现负敏感区;意味着关键区边界层底部到近地面层温度越高、边界层顶越冷时,有利于对流不稳定性加强,进一步降低对流启动条件;计算表明边界层温度增加 1°C ,关键区区域平均降水可增加 $8 \sim 10 \text{ mm}$ 。

4 探空对流敏感性试验

4.1 试验设计

为定量分析局地对流性降水关于初值和物理过程的敏感性,使用探空对流试验是一种计算代价较小的方法。以 7 日 02 时关键预报区 S0 的区域平均环境廓线作为预报起始背景条件,设计 3 组对流探空试验:

第 1 组试验 SND_VPERT: 针对低层风场扰动

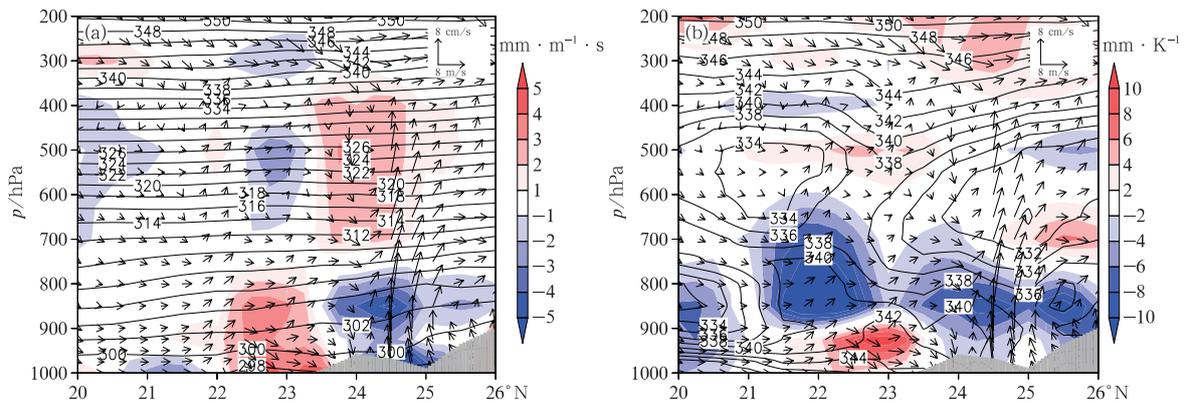


图 11 2017 年 7 日 02 时过 114°E 垂直剖面的集合敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ (填色)和 EC-EPS 集合

平均位温(等值线,单位: K)(a), $\frac{\partial J_{TP}}{\partial T}$ (填色)和相当位温(等值线,单位: K)(b)

(矢量箭头为集合平均垂直风场)

Fig. 11 Ensemble sensitivity for meridional wind $\frac{\partial J_{TP}}{\partial v}$ (shaded area) with ensemble

mean of potential temperature (contour, unit: K) (a), and $\frac{\partial J_{TP}}{\partial T}$ (shaded area)

with equivalent potential temperature (contour, unit: K) (b) on the vertical section across 114°E ,

with ensemble mean wind vector from EC-EPS at 02:00 BT 7 May 2017

设计敏感性预报试验,讨论在给定对流启动条件下,低层环境风场结构对于对流发展强度、总降水量的影响。初值来自 EC-EPS 控制预报,在 925 hPa 经向风上加上 $[-1, 5]$ 的扰动,间隔 0.5,单位: $m \cdot s^{-1}$,共计 12 个子成员。

第 2 组试验 SND_WB;针对初始热力扰动进行敏感性试验,主要讨论在给定环境动力条件下,初始热力扰动对于对流发展强度、总降水量的影响。初值来自 EC-EPS 的控制预报,热泡中心强度在 $[1.0, 6.0]$,间隔 0.5,单位:K,共计 11 个子成员。

第 3 组试验 SND_MP;针对降水物理过程设计预报敏感性试验,由于计算资源限制,初值来自于 EC-EPS 集合预报中随机挑选的 5 个成员廓线,分别对 14 个降水物理方案进行预报试验,共计 70 个试验成员(表 4)。

4.2 SND_VPERT 和 SND_WB 试验分析

图 12a 为 SND_VPERT 的区域平均降水量变化,925 hPa 上的南风扰动从 $-1.0 m \cdot s^{-1}$ 增长到 $5.0 m \cdot s^{-1}$,随着南风分量的增长,区域平均降水量也随之增长,当南风扰动增长到 $4.5 m \cdot s^{-1}$ 时,模拟降水量单点最大值增长到 57 mm。计算表明区域平均降水对于 925 hPa 经向风敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial u_{925 \text{ hPa}}}$ 为 $5.8 \text{ mm} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}$,接近利用 EC-EPS 集合敏感性的分析结论。

图 12b 为 SND_WB 试验的区域平均总降水,当热泡中心强度低于 2.5 K 时,浮力扰动不能克服对流抑制能量对流无法启动,总降水接近 0 mm;当

初始热泡中心强度从 3.0 K 增加到 3.5 K 时,对流活动增强明显,单点降水最大值从 9 mm 增长到 44 mm;当热泡中心强度增强到 6 K 时,单点最大降水为 114 mm。计算表明区域平均降水 TP 对 925 hPa 位温的敏感性 $\frac{\partial J_{TP}}{\partial \theta_{925 \text{ hPa}}}$ 为 $10.6 \text{ mm} \cdot \text{K}^{-1}$ 。理想情况下的预报敏感性分析表明,相比较于风场初始扰动,TP 对于对初始温度扰动的响应更为明显,在达到足够的浮力扰动启动对流后,0.5 K 的温度扰动增幅能够形成 10~35 mm 的最大降水量变化,明显高于风场扰动能够形成的降水量变化。

表 4 集合预报物理敏感性试验 SND_MP
Table 4 Sensitive experiments of SND_MP using 14 kinds of microphysics schemes initialized by 4 random SND_EPS, sounding profiles

| SND_MP_EPS, ($i=0, 4, 13, 25, 39$) 试验组成员 | 降水微物理方案 |
|--|------------------|
| PHYS00 | Ferrier(New ETA) |
| PHYS01 | Goddard GCE |
| PHYS02 | Thompson |
| PHYS03 | Milbrandt-Yau |
| PHYS04 | Morrison |
| PHYS05 | WDM-5class |
| PHYS06 | WDM-6class |
| PHYS07 | NSSL-2m |
| PHYS08 | NSSL-CCN |
| PHYS09 | NSSL-1m7c |
| PHYS10 | NSSL-1m6c |
| PHYS11 | P3 |
| PHYS12 | CAM5.1 |
| PHYS13 | WSM6 |

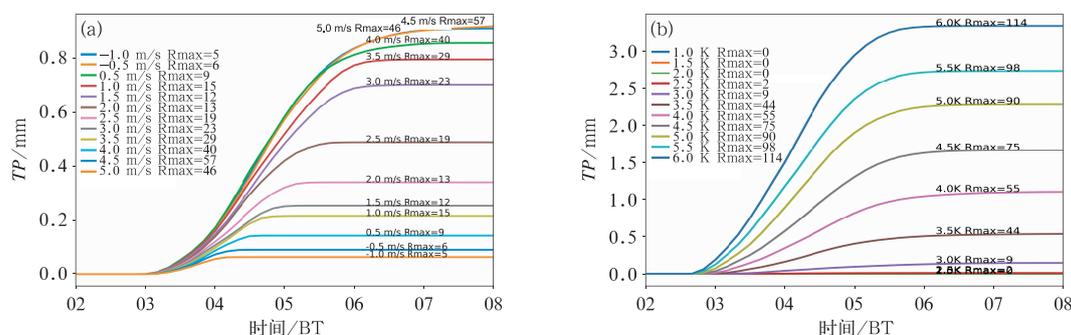


图 12 2017 年 5 月 7 日 02—08 时 SND_VPERT(a) 和 SND_WB(b) 试验模拟区域平均降水量和最大降水量

Fig. 12 Evolution of area-averaged simulated precipitation of SND_VPERT (a) and SND_WB (b) with maximum hourly grid precipitation from 02:00 BT to 08:00 BT 7 May 2017

4.3 SND_MP 降水云微物理试验分析

在小成员数的对流尺度集合预报中,采用差异化对流物理过程能够快速增大预报离散度,在 EC-IFS 预报系统中,已经实施 SKEB、SPPT 等多种模式物理扰动方案(Buizza et al,1999);在 TIGGE 项目中,使用多模式“超级集合”也是集合预报研究的热点;在短时-临近时段的对流性天气预报中,使用多模式集成预报、超级集合或者设计更为合理的初值能够对预报不确定性进行更为充分地估计。图 13a 为 SND_MP 试验中区域平均降水演变,在 14 个预报成员中,采用 P3、Ferrier、GCE 降水物理方

案的成员产生了较强的降水,而采用 MY2、WDM 等双通量降水物理方案的成员降水量预报相对较小。图 13b 蓝色虚线为 SND_MP 中 5 个控制成员区域平均降水预报离散度,红色实线为所有试验成员(5×14=70 成员)降水离散度变化;到达 6 h 积分终点后,SND_MP 的总离散度是原始成员离散度的 1.42 倍。但对比 SND_WB 试验看,物理方案扰动造成总降水离散度还是要弱于热泡扰动集合试验的离散度,因此在本次对流性降水过程预报试验中,初始条件扰动尤其是热力扰动对于预报离散度方面的贡献更为重要。

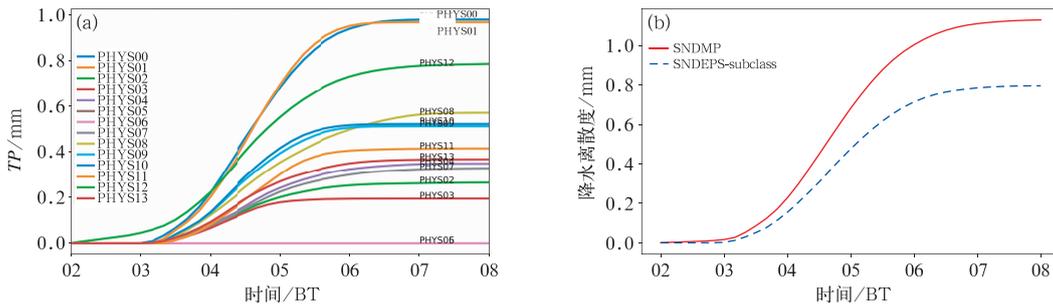


图 13 SND_MP 各成员区域平均累积降水量时间变化(a),SND_EPS 试验 5 成员子集合与 SND_MP 试验 70 成员的降水离散度时间变化(b)

Fig. 13 Area-averaged precipitation evolution of 14 members in SND_MP (a), area-averaged precipitation spread evolution from 5 members in SND_EPS subclass and all 70 members in SND_MP (b)

5 结 论

(1) 2017 年 5 月 6 日夜间的广州局地特大暴雨过程中,中尺度对流系统触发与 6 日夜间近地面层南风增强、地形动力抬升等因素有紧密联系。分析表明 GRAPES-3 km 区域模式在初始场分析、边界层南风增强过程等方面更为准确,在对流启动时间、最大降水量预报方面取得了较好的预报效果。

(2) EC-EPS 集合预报针对此次强降水事件表现了一定可预报性,采用集合敏感性分析了关键区降水预报与水汽、动力、热力关键物理量的预报相关。图 14 简要总结了关键区降水与初始时刻预报敏感区、预报分析误差的关系,其中海平面气压场分析误差主要体现在江南大陆高压以及南海高压增强,同时华南低槽强度相对增强;在质量场和风场平衡约束关系下,关键区北部出现增强东风、南部出现

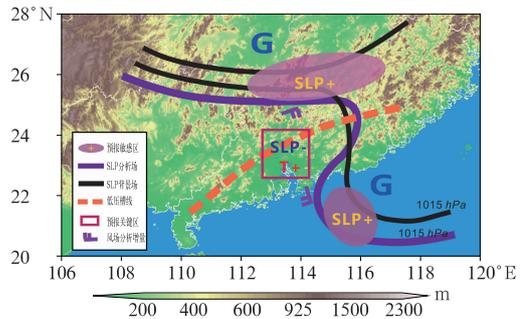


图 14 华南关键区强降水预报敏感性概念模型 (“SLP+”“SLP-”为海平面气压预报敏感区位置, “T+”为地面 2 m 温度预报敏感区中心位置)
Fig. 14 Conceptual model for forecast sensitivity of precipitation in South China (“SLP+”“SLP-” indicate the sensitive area for SLP forecast and “T+” for the surface temperature forecast)

增强南风,从而造成关键预报区内辐合增强;关键区内近地面层温度升高也有利于加强夜间边界层对流不稳定性,对于关键区对流发展有直接影响。

(3) 通过对流探空试验进一步分析了各类初值条件、降水云微物理过程对于此次中小尺度强降水过程的预报影响。分析表明在给定环境探空条件下,当足够强度浮力扰动启动对流后,与边界层背景风场廓线变化的数值试验比较,初始热扰动在对流发展强度上造成的影响更为直接和明显,对于降水预报而言具有更显著的敏感性。降水云物理过程预报试验表明,基于物理方案扰动的小成员集合预报虽然有效扩大预报离散度,进一步提高对中尺度强降水事件的可预报性,但总体还是弱于初值扰动对于预报离散度方面的贡献。

本文针对广州局地对流性强降水过程,讨论了业务数值预报模式的预报偏差产生原因,并重点利用集合预报开展预报检验和集合敏感性分析;使用了理想化的探空数值试验进行预报敏感性分析,其中降水预报对于各类预报因子的敏感性尤其是中尺度预报敏感性还有待于更深入的分析;对于此次过程中的复杂边界层过程、地形影响、云微物理结构等方面的强降水形成机制仍然需要更深入的分析。

参考文献

- 陈静,薛纪善,颜宏,2005.一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J].大气科学,29(5):717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble mesoscale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5): 717-726(in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018.2017年5月7日广州特大暴雨微物理特征及其触发维持机制分析[J].气象,44(4):500-510. Fu P L, Hu D M, Zhang Y, et al, 2018. Microphysical characteristics, initiation and maintenance of record heavy rainfall over Guangzhou Region on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 500-510(in Chinese).
- 田付友,郑永光,张小玲,等,2018.2017年5月7日广州极端强降水对流系统结构、触发和维持机制[J].气象,44(4):469-484. Tian F Y, Zheng Y G, Zhang X L, et al, 2018. Structure, triggering and maintenance mechanism of convective systems during the Guangzhou extreme rainfall on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 469-484(in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018.2017年广州“5·7”暖区特大暴雨的中尺度系统和可预报性[J].气象,44(4):485-499. Wu Z F, Cai J J, Lin L X, et al, 2018. Analysis of mesoscale systems and predictability of the torrential rain process in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 44(4): 485-499(in Chinese).
- 徐珺,毕宝贵,湛芸,等,2018.“5·7”广州局地突发特大暴雨中尺度特征及成因分析[J].气象学报,76(4):511-524. Xu J, Bi B G, Chen Y, et al, 2018. Mesoscale characteristics and mechanism analysis of the unexpected local torrential rain in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Acta Meteor Sin, 76(4): 511-524(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).
- 张涵斌,李玉焕,范水勇,等,2017.基于动力降尺度的区域集合预报初值扰动构建方法研究[J].气象,43(12):1461-1472. Zhang H B, Li Y H, Fan S Y, et al, 2017. Study on initial perturbation construction method for regional ensemble forecast based on dynamical downscaling[J]. Meteor Mon, 43(12): 1461-1472(in Chinese).
- Ancell B, Hakim G J, 2007. Comparing adjoint- and ensemble-sensitivity analysis with applications to observation targeting[J]. Mon Wea Rev, 135(12): 4117-4134.
- Bishop C H, Etherton B J, Majumdar S J, 2001. Adaptive sampling with the ensemble transform Kalman filter. Part I: theoretical aspects[J]. Mon Wea Rev, 129(3): 420-436.
- Bishop C H, Toth Z, 1999. Ensemble transformation and adaptive observations[J]. J Atmos Sci, 56(11): 1748-1765.
- Buizza R, Miller M, Palmer T N, 1999. Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system [J]. Quart J Roy Meteor Soc, 125(560): 2887-2908.
- Buizza R, Palmer T N, 1995. The singular-vector structure of the atmospheric global circulation[J]. J Atmos Sci, 52(9): 1434-1456.
- Clark A J, Weiss S J, Kain J S, et al, 2012. An overview of the 2010 hazardous weather testbed experimental forecast program spring experiment[J]. Bull Amer Meteor Soc, 93(1): 55-74.
- Crook N A, 1996. Sensitivity of moist convection forced by boundary layer processes to low-level thermodynamic fields[J]. Mon Wea Rev, 124(8): 1767-1785.
- Doswell III C A, Brooks H E, Maddox R A, 1996. Flash flood forecasting: an ingredients-based methodology[J]. Wea Forecasting, 11(4): 560-581.
- Errico R M, Raeder K D, Fillion L, 2003. Examination of the sensitivity of forecast precipitation rates to possible perturbations of initial conditions[J]. Tellus A, 55(1): 88-105.
- Gallo B T, Clark A J, Jirak I, et al, 2017. Breaking new ground in severe weather prediction: the 2015 noaa/hazardous weather testbed spring forecasting experiment[J]. Wea Forecasting, 32(4): 1541-1568.
- Hanley K E, Kirshbaum D J, Roberts N M, et al, 2013. Sensitivities

- of a squall line over central Europe in a convective-scale ensemble[J]. *Mon Wea Rev*, 141(1):112-133.
- Lorenz E N, 1963. Deterministic nonperiodic flow[J]. *J Atmos Sci*, 20(2):130-141.
- Lorenz E N, 1969. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues[J]. *J Atmos Sci*, 26(4):636-646.
- Melhauser C, Zhang F Q, 2012. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales[J]. *J Atmos Sci*, 69(11):3350-3371.
- Schumacher R S, Johnson R H, 2005. Organization and environmental properties of extreme-rain-producing mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 133(4):961-976.
- Torn R D, Hakim G J, 2008. Ensemble-based sensitivity analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 136(2):663-677.
- 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.
- Weisman M L, Rotunno R, 2004. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited[J]. *J Atmos Sci*, 61(4):361-382.
- Zhang F Q, 2005. Dynamics and structure of mesoscale error covariance of a winter cyclone estimated through short-range ensemble forecasts[J]. *Mon Wea Rev*, 133(10):2876-2893.
- 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.