## 一次粤西南暴雨过程的预报误差来源分析

## 卢楚翰<sup>1</sup> 林琳<sup>1,2</sup> 周菲凡<sup>2,3\*</sup>

 1 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合 实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044
 2 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
 3 中国科学院大学,北京 100049

**摘**要本文基于WRF模式研究了2015年5月16日-17日广东西南地区的一次暴雨过程的预报误差来源。首先比较了以NCEP\_FNL为初始资料的WRF模式的模拟预报(记为WRF\_FNL)和ECMWF关于该次暴雨过程的确定性预报。结果表明,ECMWF 具有较高的预报技巧。因此,认为ECMWF的模式和初始场都较为准确。进一步,以ECMWF的初值作为初始场,选用相同的物理参数化方案,再次用WRF模式进行预报(预报结果记为WRF\_EC)。结果表明相对WRF\_FNL,WRF\_EC的预报结果有明显改善。这表明,初始场的改进对预报有较大的影响,初始误差是预报误差的 重要来源。进一步,分析了初始误差的主要来源区域和变量。结果表明,南海北 部湾至广西西南区域为本次暴雨预报初始误差的主要来源区域,同时,初始温度 场误差和初始湿度场误差在此次暴雨预报中具有同等重要的作用,而初始风场和 气压场的误差次之。同时改进初始温度场和湿度场的精度可以较大程度提高本次 暴雨过程的预报技巧。

关键词 误差分析 华南暴雨 初始场 敏感区 敏感变量

# Analysis on the source of forecast errors for a heavy precipitation in southwest of Guangdong Province

Lu Chuhan<sup>1</sup> Lin Lin<sup>1,2</sup> Zhou Feifan<sup>2,3</sup>

**1** Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

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

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstracts Based on WRF model, this study investigates the source of forecast errors for an extreme precipitation in southwest of Guangdong Province occurred during May 16 to May 17, 2015. First, the forecasts by WRF model using NCEP\_FNL as

作者简介 卢楚翰, 男, 1981年出生, 副教授, 主要从事大气环流异常及气候变率方面研究。E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

<sup>\*</sup>资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507405, 2017YFC1501601

通讯作者 周菲凡, E-mail: zhouff04@163.com

initials (hereafter short for WRF\_FNL) has been compared with the deterministic forecasts generated by ECMWF. Results showed that ECMWF has higher forecast skills. Thus the model and the initials that used by ECMWF are deemed accurate. Then we generated a new forecast (hereafter short for WRF\_EC) that using WRF model but using the initials of ECMWF, and keeping the physical schemes same as the previous WRF simulations. Results showed that WRF\_EC has better forecast skills than WRF\_FNL. This indicates that the improvement of initial states has a large impact on the forecasts, so the initial error is a main source of the forecast errors. Furthermore, we analyzed the sensitive area and sensitive variables of the initial error. Results showed that the initial errors mainly come from the North Gulf of the South China Sea and the southwest of Guangxi Province, and both the initial temperature error and the initial humidity error played important role in this heavy precipitation forecast, while the error in the wind and pressure have small impacts. Improving the accuracy of the initial temperature and humidity could largely improve the forecast skill of this heavy precipitation.

**Key words**: Error analysis, Heavy precipitation in South China, Initial states, Sensitive areas, Sensitive variables

IN

1 引言

中国位于世界著名的亚洲季风区,春夏季的降水深受季风活动的影响。中国 的雨季常以夏季风的爆发开始,以季风的撤退告终(陶诗言,1980;史学丽和丁 一汇,2000)。华南位于中国南部地区,所处的纬度较低,受热带季风和副热带季 风的共同影响,是我国夏季风最早到达的地区,也是我国汛期开始最早的地区(刘 瑞鑫等,2019; Mu et al.,2004)。华南暴雨与夏季风环流联系密切。季风槽等天 气系统的直接影响更是华南后汛期产生暴雨的重要因素(李春晖等,2017)。华 南是我国降水最充沛的地区,与国内其他地区相比,其平均年雨量最大、暴雨次 数最多,暴雨是华南地区的重要灾害之一(Zhang and Meng,2018; Li et al.,2018; Zhong et al.,2019)。当前主流全球确定性数值模式在暴雨的落区、量级上仍然存 在相当大误差。目前的暴雨预报仍然不尽如人意,远远不能满足气象服务的需求 (杜钧和李俊,2014;张诚忠等,2008)。华南暴雨研究工作是预报业务中的难点 和热点问题,暴雨预报仍具有很强的不确定性(管勇等,2010;卞建春和杨培才, 2003;陈涛等,2019)。

许多学者针对华南暴雨的形成机制开展了一系列的研究。有学者就一次暴雨 过程探究其发展过程(林晓霞等,2017;鲁蓉等,2018;罗雨和张立凤,2010), 也有学者整理出近年来的多起强降水事件筛选并进行统计分析以寻求规律。胡亮 等(2007)从水汽、不稳定能量及抬升条件对1958年到2004年157个持续性强 降水过程进行分类,分类讨论不同类型强降水的形成原因。傅慎明等(2010)研 究了一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的原因,提出了一类华南前汛期低涡切 变型暴雨概念模型。李春晖等(2017)总结归纳1961到2008年的74个华南地 区持续性强降水个例并按影响分为两类:台风引起和季风引起,发现季风引起的 持续性强降水主要在7月。Zhang and Meng(2018)研究了华南的持续性强降水 过程中不同阶段天气尺度因素的不同影响,刘瑞鑫等(2019)对1982到2015 年的华南暖区暴雨过程进行筛选分类,并总结了产生华南暖区暴雨的四种天气形 势:切变线型、低涡型、南风型和回流型。Luo et al.(2019)总结季风强降雨 的降雨特性、物理机制并归纳了数值模拟及预测进展,Wu et al.(2019)研究发 现华南地区极端降水与快速城市化关系密切,Li et al.(2019)对华南地区夏初的 强降水过程做了统计分析并深入探究了相关的天气形势种类。针对本次文章选取

3

的 2015 年 5 月 16-17 日的粤西南暴雨过程,前人也进行了一些研究。吴亚丽等 (2018)发现增加模式模拟的初始云信息,可使数值模式有能力模拟出与实况接 近的降水。钟雄炎等(2017)对本次过程中的环境形势场发现有利的大尺度环流 场对强降水的落区影响很大,水汽输送、能量锋及地形增幅都是本次降水的成因。

华南暴雨预报具有很大的不确定性,其预报仍然具有较大的误差。因此,探 讨华南暴雨预报误差的来源至关重要。目前针对华南地区强降水的预报研究中数 值实验居多(Zhang et al .,2011;陈静等,2003),而对预报误差来源问题的研 究相对较少,因此研究夏季风背景下华南地区强降水的预报误差来源是很有必要 的。本文选取具有较大预报误差的此次粤西南暴雨过程,参照 Zhou et al.(2016, 2018)的误差来源识别方法,识别该次暴雨过程的预报误差来源。

### 2 资料与方法

### 2.1 资料选取

本文选用 NCEP\_FNL(Final Global Data Assimilation System)再分析资料产 生 WRF 模式的初边值,选用全球交互集合预报中欧洲中心的 TIGGE\_EC 对照预 报资料做参考,同时采用 TIGGE\_EC 控制预报的初值作为 WRF 模式的初值,观 测值则选取中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集(1.0 版)(以下简称 OBS)作为降水真值。

### 2.2 模拟实验设计

本文运用 WRF (Weather Research and Forecasting Model) V3.6.1 数值模式 对选取的强降水个例进行数值模拟。初始场和侧边界场采用时间间隔 6 小时、分 辨率 1 °×1 °的 FNL 资料。模拟网格格距为 3km,水平格点数约 1100×700,覆盖 整个华南区域。垂直方向 60 层,模拟区域中心为个例降水中心,积分时间步长 15 s,模拟未采用嵌套。地图投影采用兰波托投影。物理参数化方案的设置中,短 波辐射方案采用 Goddard 短波方案,长波辐射方案采用 Rapid Radiative Transfer Model (RRTM)方案,边界层采用 EtaMellor-Yamada-JanjicTKE (湍流动能)方 案,陆面过程方案采用 Noah land-surface model 方案,不使用积云参数化方案。 2.3 个例选取 2015年5月16-17日,广东省西南市县出现了一次强降水过程如图1(a),江门、阳江、茂名等多个沿海观测站24h累积降水达到了暴雨、局部特大暴雨的量级,本文选取该次华南暴雨过程进行深入研究。

## 2.4 误差来源识别方法



根据 Huang and Luo(2017)对 2013-2015 年华南前汛期的 5 天降水预报分析, ECMWF(以下简称 EC)总体来说具有很高的预报技巧,因此我们可初步假定 EC 的初值和模式都是较为准确的。通过分析 EC 对于本文所选的个例的预报情况(记为 TIGGE\_EC),结果表明,TIGEE\_EC 对该次暴雨过程确实具有较好的 预报能力(图 1b)。因此,我们将 EC 所用的预报初值作为较为准确的初值。

## 3 模拟结果分析

首先考察以 NCEP\_FNL 为初值, WRF 模式对该暴雨过程的 24 小时累积降水的模拟结果(以下记为 WRF\_FNL,图 1c)。与观测(图 1a)相比,不论在降水强度还是强降水中心的落区上, WRF FNL 的模拟预报能力都较差。

图 1 2015 年 5 月 16 日 00 时至 17 日 00 时华南地区降水分布: (a) OBS (西侧、北侧、 南侧的黑框区域分别为敏感性试验中的区域一、二、三); (b) TIGGE\_EC(step=24) 、(c)

WRF\_FNL、(d) WRF\_EC 预报降水(单位: mm)

Fig. 1 Distribution of precipitation in South

China from 0000 BJT (Beijing time) 16 May to 0000 BJT 17 May 2015(unit: mm): (a)Observed (black boxes on the west, north, and south sides are areas 1, 2, and 3 respectively); Forecast

precipitation of (b) TIGGE\_EC(step=24), (c) WRF\_FNL, (d)WRF\_EC

接着,我们考察TIGGE\_EC对本次暴雨个例的预报能力。从图1(b)可以看出: 与观测真值相比,TIGGE\_EC预报的24小时累积降水强度比WRF\_FNL强,更接近观测真值。而在降水落区方面,TIGGE\_EC预报的降水中心更为准确,与观测的降水中心落区更符合。为进一步定量分析预报情况,求取WRF\_FNL、

TIGGE\_EC 的降水分布与 OBS 华南区域降水分布的空间相关,同时采用格点对格点的方法计算 TS 评分,由于本次过程重点关注强降水,因此,计算大雨以上量级(24 小时降水量>25mm)的 TS 评分。TS 评分公式如下:

$$TS = \frac{N_A}{N_A + N_B + N_C},$$

(1)

式中分子 $N_A$ 表示预报的降水和观测的降水同在大雨以上量级的格点数,分母中 $N_B$ 为空报的格点数, $N_C$ 为漏报的格点数。相关系数及强降水的 TS 评分见表 1。表 1 可看出,TIGGE\_EC 与 OBS 的相关系数与 TS 评分值均高于 WRF\_FNL。可见,对于本文所选取的暴雨个例,TIGGE\_EC 的 24 小时预报效果优于 WRF\_FNL。因此,对于该个例,TIGGE\_EC 的预报是较为准确的预报,可以将 TIGGE\_EC 预报的初值(TIGGE\_EC(step=00))作为较准确的初值。

表 1 WRF\_FNL、WRF\_EC、TIGGE\_EC 分别与 OBS 对应的相关系数及 TS 评分表 Table 1 Correlation coefficient and TS score of OBS and WRF\_FNL、WRF\_EC、TIGGE\_EC

	WRF_FNL	WRF_EC	TIGGE_EC
相关系数	0.333	0.363	0. 478
TS 评分	0.0889	0.1393	0.1639

进一步,我们用更为准确的初值(TIGGE\_EC(step=00))作为 WRF 模式的初值 场,重新对本次暴雨事件进行预报,预报结果记为 WRF\_EC(图 1d)。可见, 相比于 WRF\_FNL, WRF\_EC 在降水分布、以及降水强度上都要与观测值更为接 近。同样计算 WRF\_EC 降水分布与 OBS 场的空间相关及强降水的 TS 评分见表 1。对比可看出,WRF\_EC 与 OBS 的相关系数与 TS 评分均高于 WRF\_FNL。结 合图 1 及表 1 可见,采用更为准确的初始场后,WRF 模式对于本次暴雨过程的 模拟预报能力有所提高。

因此可得出初步结论:对本次过程而言,改进初始场确实可改进预报效果。 所以初始误差是本次暴雨过程预报误差的重要来源之一。为深入探究初始误差的 来源,探讨预报效果改进的原因,下面具体分析 WRF\_EC 与 WRF\_FNL 对应的 初始场的差异,并通过敏感性试验寻找对预报有重要影响的关键区域和关键的物 理变量。

4 初始误差的来源分析

4.1.1 物理量场配置及环流结构分析

首先对比分析 WRF\_EC 和 WRF\_FNL 对应预报初始场(以下分别简称 EC、FNL)中的各类基础要素场,分别画出初始场中温、压、湿、风的高低层配置。 温度的高低层配置如图 2,不论是 EC 还是 FNL,500hPa、850hPa 及地面三层场 内都有明显的热量输送,在降水区上游都有较强的暖平流,其中 500hPa 和 850hPa 降水区及降水区上游均受槽前较强的西南气流控制。500hPa 两风场在北部湾区 域均有一槽,槽前有正的涡度平流,EC 槽前有暖平流,有利于上升运动产生降 水;FNL 槽前有冷平流,与涡度平流作用有所抵消。

图 2 FNL、EC 两初始场对应的不同层次温度场(单位: ℃)叠加同层次风场(单位: m/s): FNL 对应(a)500hPa、(c)850hPa、(e)地面的温度场叠加同层次风场; EC 对应(b)500hPa、

(d)850hPa、(f)地面的温度场叠加同层次风场

Fig. 2 The temperature fields of different levels (unit: °C) corresponding to the two initial fields are superimposed on the wind field of the same level (unit: m/s): FNL of (a) 500hPa<sub>3</sub> (c) 850hPa<sub>3</sub> (e) surface; EC of (b) 500hPa<sub>3</sub> (d) 850hPa<sub>3</sub> (f) surface

图 3 为 850hPa 对应的 FNL、EC 的相对湿度场叠加同层次风场,两场在降水 区上游及降水区附近水汽混合比约 16g/kg,远大于 2000-2016 年同期 5 月中旬华 南地区 850hPa 平均值 12-13g/kg,因此,两场水汽均较为充足,有利于降水发生。 同时两场均有明显的湿平流,有利于降水区比湿增加及水汽输送。

图 3 FNL、EC 两初始场对应的 850hPa 相对湿度场 (单位:%)叠加风场 (单位:m/s):

(a)FNL; (b)EC

Fig.3 850hPa relative humidity field (unit: %) corresponding to the two initial fields superimposed wind field (unit: m/s): (a) FNL; (b)EC

图 4 为 FNL、EC 两初始场的海平面气压及 500hPa 位势高度场,两场在北部 湾区域高空槽前有正的涡度平流,地面均对应低压,有利于上升运动。同时 EC 的低压范围更大,更有利于偏南气流的输送。降水区位于 588 线以南,且 588 线有较为明显的槽线,降水区以北的偏北风冷空气与降水区以南的偏南风暖空气 相遇易产生降水,且降水区上游位势高度场有明显的槽线(如图 4a、b)。 图 4 初始 500hPa 位势高度场(单位: gpm): (a) FNL、(b) EC; 初始海平面气压场(单

位: hPa) 叠加初始风场(单位: m/s): (c) FNL、(d) EC

Fig.4 500hPa potential height at initial time (unit: gpm):(a) FNL、 (b) EC; sea level pressure

(unit: hPa)superimposed wind (unit: m/s): (c) FNL, (d) EC

从物理量场配置及环流结构可看出,采用两种资料做初值均存在有利于强降 水发生发展的基础要素场配合,但 EC 场中温度平流更强,水汽更充沛,同时热 量和水汽输送更明显,更有利于强降水的发生发展。为验证这一猜想,对比两种 资料的垂直速度场如图 5,850hPa EC 相对于 FNL 在降水区及降水区上游区域局 地抬升更明显,垂直运动更剧烈,降水强度可能更强,更易形成局地暴雨。

图 5 01 时刻 FNL、EC 两初始场对应的 850hPa 垂直速度场: (a) FNL; (b) EC Fig.5 The vertical velocity field of 850hPa corresponding to the two initial fields at time 01(unit:

m/s): (a)FNL; (b)EC

## 4.1.2 EC 与 FNL 两初始场差异

进一步对比分析 FNL 和 EC 两初始场中的物理量场配置及环流结构,分别画 出不同层次温度、湿度及垂直速度的差值场,可看出初始场的差异明显在温度和 湿度方面非常显著如图 6。

图 6 EC 与 FNL 不同要素的差值场叠加同层次 EC 风场: (a) 500hPa、(b) 850hPa、(c)地面温 度的差值场(单位: ℃)叠加同层次 EC 风场(单位: m/s); (d) 850hPa 相对湿度的差 值场(单位: %)叠加同层次 EC 风场(单位: m/s); (e)为01 时刻 850hPa 垂直速度的

## 差值场(单位:m/s)

Fig.6 Difference fields of different basic elements of EC and FNL fields superimpose the same level EC wind field: (a) 500hPa、(b) 850hPa、(c) ground temperature difference field superimposed on the same level EC wind field (unit: °C; m/s); (d) 850hPa relative humidity difference field superimposed on the same level EC wind field (unit:%; m/s); (e) 850hPa vertical velocity

difference field (unit: m/s)

在强降水的上游区域(南海北部湾至广西西南区域),从低层到高层,有一明显的温度场与水汽场的异常中心。结合前面的图 2(a)、(b)与(c):降水区上游区域 EC 中高层暖中心更暖, EC 低层暖中心较冷,上下层温差较大,对应 EC

场内热成风更强,两层间厚度更大;同时考虑ω方程中温度平流随高度变化项, 有以下关系式:

## $-V_g \cdot \nabla T > 0, \tag{2}$

式中左侧为温度平流,表征风场对温度的输送。降水区及其上游对应暖平流区, 有上升运动,厚度增加,等压面升高,温压场不平衡,在气压梯度力作用下低层 辐散补偿上升,因此 EC 上升运动更强。图 6(e)验证了这一结论, EC 相对于 FNL 确实更利于上升运动。同时图 6(d)中 EC 在降水区及降水区上游水汽更加充沛。 而当采用 FNL 资料作为初值时,上下层温差更小、垂直运动较弱、槽前向降水 区输送的湿度平流也较弱。由此可见, EC 更有利于降水的发生和发展,较易形 成明显的降水中心。

结合图 6 可看出变量差值场在降水区上游南海北部湾至广西西南区域均存在 一个大值中心,结合图 4 中的气压场和位势高度场进行分析,发现该异常场区位 于高空槽、地面低压区域,因此大致可确定此区域为本次暴雨预报的敏感区。然 而,如果仔细分析图 6 可以发现,不同变量之间以及同一变量在不同层次之间, 要素差值场的大值区位置也会有所不同。因此,为综合考虑各类要素差异对预报 效果的综合影响,寻找对预报效果综合影响较大的区域,下面引入湿能量的计算 公式(周菲凡,2009):

 $(\delta X_0)^T C_1(\delta X_0) = \frac{1}{D_1} \iint_0^1 \left[ u_0'^2 + v_0'^2 + \frac{c_p}{T_r} T_0'^2 + R_a T_r \left( \frac{P'_{s0}}{p_r} \right)^2 + \frac{\iota^2}{c_p T_r} q_0'^2 \right] d\sigma dD_1$  (3) 其中 $D_1$ 为验证区域,  $\sigma$ 为垂直方向坐标,  $C_p$ 为定压比热,  $C_P = 1005.7kg^{-1}K^{-1}$ ,  $R_a$ 为干空气气体常数,  $R_a = 287.04Jkg^{-1}K^{-1}$ 。 $u_0'$ ,  $v_0'$ ,  $T_0'$ ,  $p_{s0}'$ ,  $q_0'$ 为 $\delta X_0$ 的分 量场, 分别为两初始场中经向风、纬向风、温度、地表气压及水汽混合比等变量 的差值场。此外 $p_r = 1000hPa$ ,  $T_r = 270K$ 。湿能量在干能量(动能和有效位能) 的基础上增加了水汽项, 公式右端第一、二项之和为总扰动动能; 第三、四项之 和为总有效位能; 第五项为水汽项, 一、二、三、四项之和为扰动干能量。根据 上述公式计算得到的扰动湿能量分布如图 7。扰动湿能量的大值区主要位于南海 北部湾至广西西南区域。因此, 可确定该区域为初始误差的主要来源区域, 也即 对预报效果综合影响较大的区域, 这里我们称其为本次暴雨预报的敏感区。

图 7 EC 与 FNL 的差值场对应整层大气的扰动湿能量场(单位: 1×10<sup>6</sup>J)

Fig.7 The difference between EC and FNL corresponds to the disturbance wet energy field of the entire atmosphere (unit:  $1 \times 10^{6}$ J)

#### 4.2 敏感性实验设计

在 4.1 中比较了 EC 和 FNL 中各种基础气象要素场(温、压、湿、风等), 表明 EC 相对 FNL 确实更有利于降水的发生发展。同时,我们也找到了本次暴 雨预报中初始误差的主要来源区域,也即南海北部湾至广西西南区域。接下来我 们将一方面验证初始误差来源区域的正确性,一方面考察初始误差来源的主要物 理量,也即在之前确定的敏感区的基础上进一步考察本次暴雨过程的敏感性变量。

首先验证 4.1 节所确定的敏感区的准确性。选取相同范围的区域:分别在降水区上方、下方选取与敏感区同等大小的区域,如图 1(a)。这里设计三组对比实验,分别用 EC 替换 FNL 在三个区域内的温度、湿度、风场、气压场等要素场,同时保证边界场、其他区域的场及 WRF 模式设置不变,重新进行预报并分析敏感区实验的预报结果。

如图 1(a),区域一是敏感区(20-24 N, 102-110 E),包括南海北部湾、广 西西南、云贵高原南侧以及中南半岛北侧区域,在此区域两初始场有十分明显的 基础要素场差异,同时也是整层大气扰动湿能量的大值区;区域二是降水区上方 (24-28°N,110-118°E)的江南丘陵地区;区域三是降水区下方(16-20°N, 110-118°E)的南海中部至北部区域。得到三个预报降水结果并分别与 OBS 进 行比较如图 8,并分别求出区域一、二、三模拟降水结果与 OBS 降水分布的场 相关系数及强降水的 TS 评分如表 2。结合图 8 中替换三个区域后的预报结果及 表 2 中的 TS 评分及相关系数可看出:替换区域一(敏感区)内的基础要素场相 对可以最大程度提高预报技巧,这验证了前面 4.1 中敏感区的准确性,说明该区 域确实为初始误差的主要来源区域。

图 8 敏感区实验的预报降水分布(单位: mm): (a) WRF\_FNL 预报降水分布; EC 分别替换 FNL 中(b)区域一、(c) 区域二、(d) 区域三内基础要素场后的预报降水分布

Fig.8 Forecast precipitation distribution in sensitive area experiment (unit: mm): (a) distribution of WRF\_FNL; forecast precipitation after EC replacing the FNL of(b) area one、 (c) area two、 (d) area three basic element field

	区域一	区域二	区域三
相关系数	0.512	0.241	0. 323
TS 评分	0.1287	0.0639	0.0948

Table 2 Correlation coefficients and TS scores of experimental forecast results and OBS in

确定敏感区后,下面我们进一步考察初始误差来源的主要物理量。考察敏感 区内不同要素差异对预报的影响,设计了三组对比试验:分别用更为准确的初始 场(EC)中敏感区内的温度、湿度、风场、气压场以及同时用温度和湿度场替 换 FNL 中对应的物理要素,保持边界场、以及初始场中的其他条件和模式设置 不变,重新进行模拟预报,开展敏感变量实验。通过考察不同变量的改进对预报 效果的影响,探讨本次暴雨预报误差来源的主要变量,也即本次暴雨过程中的敏 感性变量。

图 9 敏感变量实验的预报降水分布(单位: mm):分别替换 FNL 敏感区内(a)温度、 (b)湿度、(c)风场、(d)气压场后的降水预报降水分布;(e)同时替换温度和湿度后的预报降

#### 水分布

Fig.9 Forecast precipitation distribution of sensitive variable experiment (unit: mm): forecast precipitation distribution after replacing (a) temperature, (b) humidity, (c) wind field, (d)

pressure field; (e)temperature and humidity fields in the sensitive area of FNL

图 9 即为分别替换敏感区内不同变量后新的预报结果。可见,仅仅改进温度场并不能提高预报技巧(图 9a),改进敏感区内的湿度场后可以明显提高总降水量(图 9b),但是降水落区有所偏移,单独改进风场、气压场预报效果较差

(图 9c,d),而当同时改进温度场和湿度场后,则可以非常明显地改进预报技巧。 对比图 9(e)与图 1(d)可以看到,当同时改进敏感区内的温度场和湿度场后,不论 在降水量还是降水落区上,都与观测值较为接近。为定量化验证此结论,类似前 面分别计算几种预报结果与 OBS 的相关系数与 TS 评分如表 3。表 3 可看出:单 一替换某种基础要素场并不能改进预报效果,但同时替换温度场和湿度场后预报 效果有了明显改善。而分别替换了敏感区内的温度场和风场、湿度场和风场,两 种预报结果均优于替换单一的基础要素场,但均差于同时替换敏感区内温度场和 湿度场的预报结果。这说明温度场和湿度场的误差确实是本次个例初始误差的主 要来源,温度和湿度是本次暴雨预报的初始敏感性变量。对于夏季风背景下华南 的强降水过程,改进初始场确实可以减小预报误差,提高预报技巧。

表3敏感变量实验预报结果与OBS的相关系数及TS评分

Table 3 Correlation coefficients and TS scores of experimental prediction results and OBS of

sensitive variables							
N	替换温度	替换湿度	替换风场	替换气	替换温度场		
	场	场	X	压场	和湿度场		
相关系数	0.182	0.112	0.094	0.099	0.487		
TS 评分	0.0520	0.0937	0.0322	0.0329	0.1713		
-							

### 5 总结与讨论

当前,华南暴雨预报普遍具有较大的预报误差,探讨华南暴雨预报误差的来 源,从而有针对性地采取措施,可以高效地减小误差,提高预报技巧。也即探讨 如何在有限的资源下,最大程度地提高预报技巧。目前对于华南地区强降水的预 报误差来源问题的研究相对较少,因此研究夏季风背景下华南地区强降水的预报 误差来源具有重要的意义。

本文选取粤西南地区的一次暴雨过程,重点研究分析了 WRF 模式预报该暴 雨过程时影响预报技巧的误差来源。首先,根据 Huang and Luo (2017)对 2013-2015 年华南前汛期的 5 天降水预报分析,EC 总体来说具有很高的预报技 巧,因此可假定 EC 的初值和模式都较为准确。在此基础上,根据 Zhou et al.(2016, 2018)识别误差来源的方法,首先确定了初始误差是本次暴雨预报的重要误差来 源。最后考察了初始误差来源的重要区域及重要的物理量场。结果表明,南海北 部湾至广西西南区域为本次暴雨预报初始误差的主要来源区域,同时,初始温度 场误差和初始湿度场误差在此次暴雨预报中具有同等重要的作用,而初始风场和 气压场的误差次之。同时改进敏感区内的初始温度场和湿度场,可以较大程度地 改善预报技巧。



卞建春,杨培才. 2003. 关于大气过程可预报性问题的一些讨论 [J]. 高原气象, (04): 315-323. Bian Jianchun, Yang Peicai. 2003. Some discussions on the

predictability of atmospheric processes [J]. Plateau Meteor.(in Chinese), (04): 315-323.

- 陈静, 薛纪善, 颜宏. 2003. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验 [J]. 气象学报, (04): 432-446. Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. The uncertainty of Mesoscale Rainstorm numerical forecast in South China and ensemble forecast experiment [J]. Acta Meteor. Sin.(in Chinese), (04): 432-446.
- 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(09): 1199-1212. Chen Tao, Sun Jun, Shen Yun, et al. 2019. Numerical predictability analysis of the sudden rainstorm process in Guangzhou "5.7" [J]. Meteor.Mon.(in Chinese), 45(09): 1199-1212.
- 杜钧, 李俊. 2014. 集合预报方法在暴雨研究和预报中的应用 [J]. 气象科技进展, 4(05): 6-20. Du Jun, Li Jun. 2014. Application of ensemble forecast method in rainstorm research and forecast [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 4(05): 6-20.
- 傅慎明,赵思雄,孙建华,等. 2010. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析 研究 [J]. 大气科学, 34(2): 235-252. Fu Shenming, Zhao Sixiong, Sun Jianhua, et al. 2010. One kind of vortex causing heavy rainfall during pre-rainy Season in South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34(2): 235-252.
- 管勇, 刘玉明, 胡丽华, 等. 2010. 广东两次特大暴雨成因的诊断对比 [J]. 气象 科技, 38(05): 565-571. Guan Yong, Liu Yuming, Hu Lihua, et al. 2010. Diagnosis and comparison of the causes of two rainstorms in Guangdong Province [J]. Meteorological Science and Technology, 38(05): 565-571.
- 胡亮,何金海,高守亭. 2007. 华南持续性暴雨的大尺度降水条件分析 [J]. 南京 气象学院学报, (03): 345-351. Hu Liang, He Jinhai, Gao Shouting. 2007. Large scale precipitation condition analysis of persistent rainstorm in South China [J]. Journal of Nanjing institute of meteorology, (03): 345-351.
- Huang Ling, Luo Yali. 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for south China during the pre-summer rainy season [J]. Journal of Geophysical Research. Atmospheres, 122(16).
- 李春晖, 吴志伟, 蒙伟光, 等. 2017. 影响华南后汛期季风持续性暴雨和热带气旋 持续性暴雨的大尺度环流背景分析 [J]. 热带气象学报, 33(01): 11-20. Li Chunhui, Wu Zhiwei, Meng Weiguang, et al. 2017. Large scale circulation background analysis of monsoon persistent rainstorm and tropical cyclone persistent rainstorm in the post flood period of South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(01): 11-20.
- Li Shuwen, Yang Shuai, Liu Haiwen. 2018. Sensitivity of warm-sector heavy precipitation to the impact of anthropogenic heating in South China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 11(03): 236-245.
- Li Zhenghui, Luo Yali, Du Yu. 2019. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over south China and associated synoptic conditions [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(11).

- 林晓霞, 冯业荣, 张诚忠, 等. 2017. 华南一次暴雨过程热力和动力特征的诊断分析 [J]. 热带气象学报, 33(06): 975-984. Lin Xiaoxia, Feng Yerong, Zhang Chengzhong, et al. 2017. Diagnostic analysis of thermal and dynamic characteristics of a rainstorm in South China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(06): 975-984.
- 刘瑞鑫, 孙建华, 陈鲍发. 2019. 华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究 [J]. 大气 科学, 43(01): 119-130. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa. 2019. Screening and classification of rainstorm events in warm region of South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(01): 119-130.
- 鲁蓉, 孙建华, 傅慎明. 2018. 近海水汽初值和对流影响一次华南前汛期沿海强 降水对流系统发展过程的机理研究 [J]. 大气科学, 42(01): 1-15. Lu Rong, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2018. A study on the mechanism of the development of the convective system of the coastal heavy rainfall in the pre flood period of South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(01): 1-15.
- Luo Yali, Li Liye, Richard H. Johnson, et al. 2019. Science and prediction of monsoon heavy rainfall [J]. Science Bulletin, 64(21): 1557-1561.
- 罗雨, 张立凤. 2010. 一次梅雨暴雨预报中的误差演变及可预报性分析 [J]. 气象 学报, 68(03): 411-420. Luo Yu, Zhang Lifeng. 2010. Error evolution and predictability analysis of a Meiyu rainstorm forecast [J]. Acta Meteor. Sin.(in Chinese), 68(03): 411-420.
- Mu Mu, Duan Wansuo, Chou Jifan. 2004. Recent Advances in Predictability Studies in China (1999-2002) [J]. Advances in Atmospheric Sciences, (03): 437-443.
- 史学丽, 丁一汇. 2000. 1994 年中国华南大范围暴雨过程的形成与夏季风活动的 研究 [J]. 气象学报, (06): 666-678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. Study on the formation of heavy rainfall and summer monsoon activity in South China in 1994 [J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), (06): 666-678.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京:科学出版社, 45 46. Tao Shiyan. 1980. Rainstorm in China [M]. Beijing:Science Press, 45-46.
- Wu Mengwen, Luo Yali, Chen Fei, et al. 2019. Observed Link of Extreme Hourly Precipitation Changes to Urbanization over Coastal South China [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 58(8).
- 吴亚丽, 蒙伟光, 陈德辉, 等. 2018. 一次华南暖区暴雨过程可预报性的初值影响 研究 [J]. 气象学报, 76(03): 323-342. Wu Yali, Meng Weiguang, Chen Dehui, et al. 2018. The influence of initial value on the predictability of a rainstorm process in the warm region of South China [J]. Acta Meteor. Sin.(in Chinese), 76(03): 323-342.
- 张诚忠, 万齐林, 黄燕燕, 等. 2008. 华南暖区降水数值预报的初值同化试验 [J]. 热带气象学报, 24(06): 576-589. Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Huang Yanyan, et al. 2008. Initial value assimilation experiment of precipitation numerical forecast in warm region of South China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 24(06): 576-589.

- Zhang Murong, Meng Zhiyong. 2018. Impact of Synoptic-Scale Factors on Rainfall Forecast in Different Stages of a Persistent Heavy Rainfall Event in South China [J]. Journal of Geophysical Research. Atmospheres, 123(7).
- Zhang Renhe, Ni Yongqi, Liu Liping, et al. 2011. South China heavy rainfall experiments (SCHeREX). J. Meteor. Soc. Japan, 89A(SI): 153-166.
- 钟雄炎,张东,管勇. 2017. 2015 年 5 月 16—17 日粤西南沿海暴雨过程分析 [J]. 广东气象, 39(01): 14-18. Zhong Xiongyan, Zhang Dong, Guan Yong. 2017. Analysis of rainstorm process in the southwest coast of Guangdong Province from May 16 to 17,2015 [J]. Guangdong Meteorology, 39(01): 14-18.
- 周菲凡.2009.条件非线性最优扰动方法在台风目标观测中的应用研究 [D].中国 科学院研究生院博士学位论文. Zhou Feifan. 2009. Application of conditional nonlinear optimal disturbance method in typhoon target observation[D]. Ph.D.dissertation(in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Zhou Feifan, YAMAGUCHI Munehiko, Qin Xiaohao. 2016. Possible Sources of Forecast Errors Generated by the Global/Regional Assimilation and Prediction System for Landfalling Tropical Cyclones. Part I: Initial Uncertainties [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33(07): 841-851.
- Zhou Feifan, Duan Wansuo, Zhang He, 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]. Advances in Atmospheric Sciences, 35(10): 1277-1290.
- Zhong S X, Yang S, Guo C Y, Chen Z T. 2019. Capabilities and limitations of GRAPES simulations of extreme precipitation in the warm sector over a complex orography. J. Trop. Meteor, 25(2): 180-191.



China from 0000 BJT (Beijing time) 16 May to 0000 BJT 17 May 2015(unit: mm): (a)Observed (black boxes on the west, north, and south sides are areas 1, 2, and 3 respectively); Forecast precipitation of (b) TIGGE\_EC(step=24), (c) WRF\_FNL, (d)WRF\_EC





Fig. 2 The temperature fields of different levels (unit: °C) corresponding to the two initial fields are superimposed on the wind field of the same level (unit: m/s): FNL of (a) 500hPa、 (c) 850hPa、
(e) surface; EC of (b) 500hPa、 (d) 850hPa、 (f) surface





Fig.3 850hPa relative humidity field (unit: %) corresponding to the two initial fields superimposed



Fig.4 500hPa potential height at initial time (unit: gpm):(a)  $FNL_{\gamma}$  (b) EC; sea level pressure (unit: hPa)superimposed wind (unit: m/s): (c)  $FNL_{\gamma}$  (d) EC





Fig.5 The vertical velocity field of 850hPa corresponding to the two initial fields at time 01(unit: m/s): (a)FNL; (b)EC





Fig.6 Difference fields of different basic elements of EC and FNL fields superimpose the same level EC wind field: (a) 500hPa,(b) 850hPa,(c) ground temperature difference field superimposed on the same level EC wind field (unit: °C; m/s); (d) 850hPa relative humidity difference field superimposed on the same level EC wind field (unit:%; m/s); (e) 850hPa vertical velocity difference field (unit: m/s)







Fig.7 The difference between EC and FNL corresponds to the disturbance wet energy field of the entire atmosphere (unit:  $1 \times 10^{6}$ J)



Fig.8 Forecast precipitation distribution in sensitive area experiment (unit: mm): (a) distribution of



WRF\_FNL; forecast precipitation after EC replacing the FNL of(b) area one (c) area two (d) area

three basic element field

Fig.9 Forecast precipitation distribution of sensitive variable experiment (unit: mm): forecast precipitation distribution after replacing (a) temperature, (b) humidity, (c) wind field, (d) pressure field; (e)temperature and humidity fields in the sensitive area of FNL

