卢楚翰, 林琳, 周菲凡. 2020. 一次粤西南暴雨过程的预报误差来源分析 [J]. 大气科学, 44(6): 1337−1348. LU Chuhan, LIN Lin, ZHOU Feifan. 2020. Analysis of the Source of Forecast Errors for a Heavy Precipitation in the Southwest of Guangdong Province [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6): 1337−1348. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20130

一次粤西南暴雨过程的预报误差来源分析

卢楚翰[1] 林琳[1,2] 周菲凡[2,3]

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 16～17 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（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）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来源变量。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，而初始温度场和初始湿度场则为此次暴雨预报初始误差的主要来源变量。同时改进初始温度场和湿度场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
文章编号 1006-9895(2020)06-1337-12 **中图分类号** P457 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.20130

Analysis of the Source of Forecast Errors for a Heavy Precipitation in the Southwest of Guangdong Province

LU Chuhan[1], LIN Lin[1,2], and ZHOU Feifan[2,3]

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

Abstract Based on the WRF model, in this study, the authors investigated the source of forecast errors for an extreme precipitation event in the southwest of Guangdong Province that occurred from 16 May to 17 May 2015. First, forecasts using the WRF model with the initials NCEP_FNL (hereinafter WRF_FNL) were compared with the deterministic forecasts generated by ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts), and the results showed that

收稿日期 2020-03-11；**网络预出版日期** 2020-08-15
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
通讯作者 周菲凡，E-mail: zhouff04@163.com
资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1507405、2017YFC1501601
Funded by National Key Research and Development Program of China (Grants 2018YFC1507405, 2017YFC1501601)

ECMWF had good forecast skills. Thus, the model and initials used by ECMWF are deemed to be accurate. Then, the authors generated a new forecast (hereinafter WRF_EC) using the WRF model with the ECMWF initials, keeping the same physical schemes as those in the previous WRF simulations. The results showed that WRF_EC has better forecast skills than WRF_FNL. This indicates that the improvement of initial states has a significant impact on forecasts, and thus the initial error is the main source of the forecast errors. The authors also analyzed the sensitive area and sensitive variables. The results showed that the initial errors mainly came from the North Gulf of the South China Sea and southwest of Guangxi Province. Both the initial temperature and the initial humidity played an important role in the heavy precipitation forecast. Thus, improving the accuracy of initial temperature and humidity could greatly improve the skills in forecasting this heavy precipitation phenomenon.

Keywords Error analysis, Heavy precipitation in South China, Initial states, Sensitive areas, Sensitive variables

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（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）。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，其平均年降雨量最大、暴雨（华南地区的重要灾害之一）次数最多（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的误差。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（张诚忠等, 2008; 杜钧和李俊, 2014）。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（卞建春和杨培才, 2003; 管勇等, 2010; 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（罗雨和张立凤, 2010; 林晓霞等, 2017; 鲁蓉等, 2018），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 1958～2004 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成因。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 1961～2008 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 1982～2015 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.（2020）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）研究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试验居多（陈静等, 2003; Zhang et al., 2011），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一次粤西南暴雨过程，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（THORPEX Interactive Grand Global Ensemble from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）对照预报资料做参考，同时采用 TIGGE_EC 对照预报的初值作为 WRF 模式的初值，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）作为观测值（以下简称 OBS）。

2.2　模拟试验设计

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 h、分辨率为 1°×1°的 FNL 资料。模拟网格格距为 3 km，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（图 1a），江门、阳江、茂名等多个沿海观测站 24 h 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

本文采用 Zhou et al.（2016, 2018）的误差来源识别方法。选择一个较为准确的预报为参考，将该

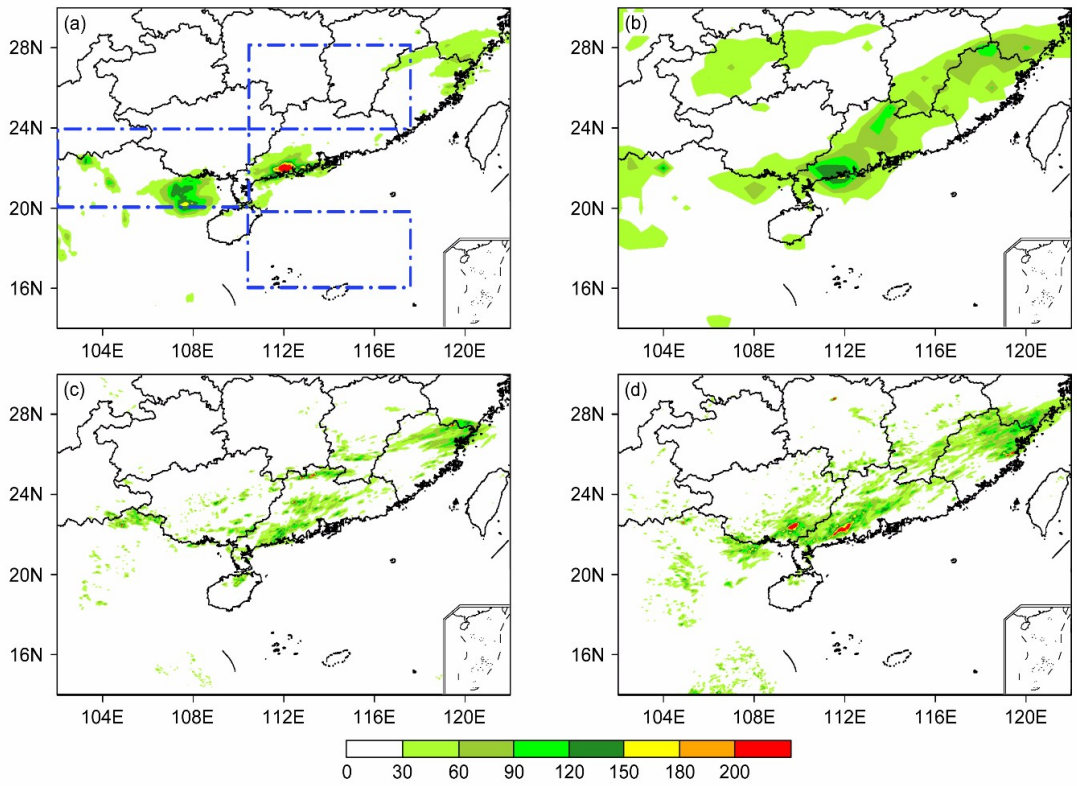

图 1　2015 年 5 月 16 日 00 时（北京时，下同）至 17 日 00 时华南地区降水量（单位：mm）分布：（a）OBS；（b）TIGGE_EC；（c）WRF_FNL；（d）WRF_EC。图 a 中西侧、北侧、南侧的黑色虚线框区分别为敏感性试验中的区域一、二、三

Fig. 1　Distribution of precipitation (units: mm) in South China from 0000 BJT (Beijing time) 16 May to 0000 BJT 17 May 2015: (a) OBS (hourly precipitation grid data set (version 1.0) fused by China automatic station and CMORPH precipitation products); (b) TIGGE_EC [TIGGE (THORPEX Interactive Grand Global Ensemble) ensemble forecast data from ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)]; (c) WRF_FNL [forecasts using the WRF model with the initials NCEP_FNL (Final Global Data Assimilation System) data]; (d) WRF_EC (forecasts using the WRF model with the initials ECMWF data). In Fig. a, black boxes on the west, north, and south sides are areas 1, 2, and 3 in sensitive experiments, respectively

预报所用初值认定为较为准确的初值。通过分析采用该较准确的初值后预报的改善程度，考察初始误差对预报误差的贡献。再进一步利用敏感性试验考察初始误差的主要来源区域和变量。

根据 Huang and Luo（2017）对 2013～2015 年华南前汛期的 5 d 降水预报分析，ECMWF（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts）总体来说具有很高的预报技巧，因此我们可初步假定 ECMWF 的初值和模式都是较为准确的。通过分析 ECMWF 对于本文所选的个例的 24 h 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 TIGEE_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 h 累积降水量的模拟结果（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。

接着，我们考察 TIGGE_EC 对本次暴雨个例的预报能力。从图 1b 可以看出：与观测真值相比，TIGGE_EC 预报的 24 h 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 h 降水量>25 mm）的 TS 评分。TS 评分（T_S）公式如下：

$$T_S=\frac{N_A}{N_A+N_B+N_C}, \qquad (1)$$

式中，N_A表示预报的降水量和观测的降水量同在大雨以上量级的格点数，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 h 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 2015 年 5 月 16 日 00 时至 17 日 00 时华南地区 WRF_FNL、WRF_EC、TIGGE_EC 24 h 累积预报降水量分别与 OBS 的相关系数及 TS 评分

Table 1 Correlation coefficients and TS scores between OBS and WRF_FNL, WRF_EC, TIGGE_EC 24-h accumulative precipitation forecast in South China from 0000 BJT (Beijing time) 16 May to 0000 BJT 17 May 2015

	相关系数	TS评分
WRF_FNL	0.333	0.0889
WRF_EC	0.363	0.1393
TIGGE_EC	0.478	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 在降水量分布、以及降水强度上都要与观测值更为接近。同样计算 WRF_EC 降水量分布与 OBS 场的空间相关及强降水的 TS 评分，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，改进初始场确实可以改进预报效果。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 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度、压强、湿度、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，500 hPa、850 hPa 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 500 hPa 和 850 hPa 降水区及降水区上游均受槽前较强的西南气流控制。500 hPa 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 3 为 850 hPa 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为 16 g kg^{-1}，远大于 2000～2016 年同期 5 月中旬华南地区 850 hPa 平均值 12～13 g kg^{-1}，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 4 为 FNL、EC 两初始场的海平面气压及 500 hPa 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 dagpm 线以南，且 588 dagpm 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（图 4a、b）。

从物理量场配置及环流结构可以看出，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置，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（图 5），850 hPa 的 EC 相对于 FNL

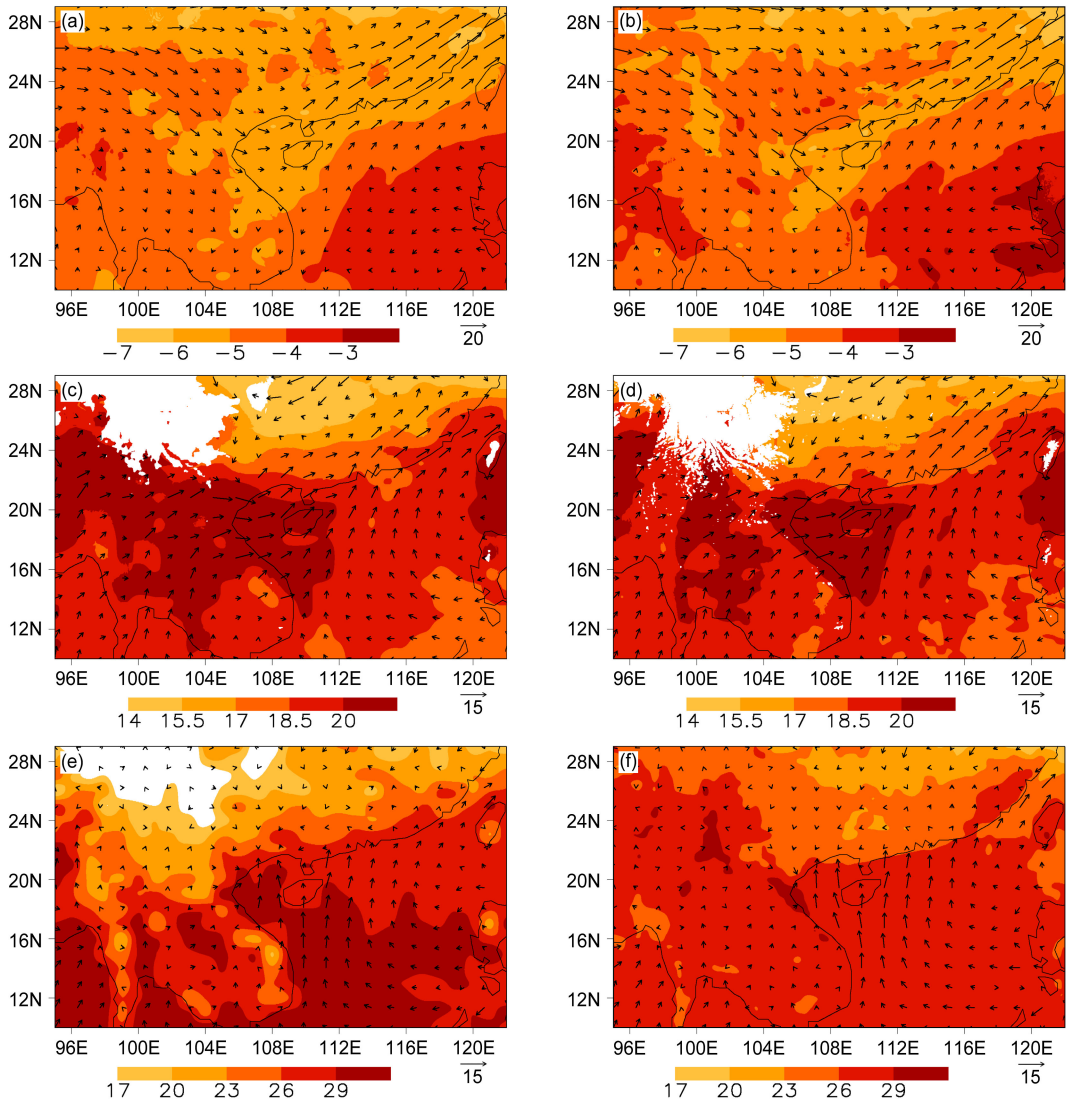

图 2　2015 年 5 月 16 日 00 时（a、c、e）FNL、（b、d、f）EC 两初始场的（a、b）500 hPa、（c、d）850 hPa、（e、f）地面的温度场（阴影，单位：°C）和风场（箭头，单位：m s^{-1}）

Fig. 2　Temperature (shadings, units: °C) and wind (arrows, units: m s^{-1}) at (a, b) 500 hPa, (c, d) 850 hPa, (e, f) surface obtained from the two initial fields (a, c, e) FNL (initial forecast field of WRF_FNL), (b, d, f) EC (initial forecast field of WRF_EC) at 0000 BJT 16 May

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。

4.2 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，分别给出不同层次温度、湿度及垂直速度的差值场，可看出初始场的差异在温度和湿度方面非常显著（图 6）。

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 2a、b、c，降水区上游区域 EC 中高层暖中心较 FNL 暖，低层暖中心较 FNL 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：

$$-\boldsymbol{V}_g \cdot \nabla T > 0, \qquad (2)$$

式中，$\boldsymbol{V}_g$为地转风，∇T为温度梯度。公式（2）左

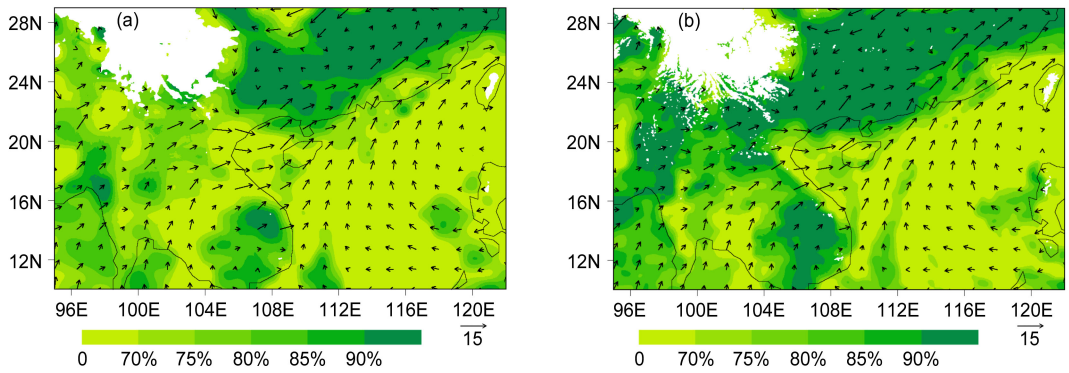

图 3 2015 年 5 月 16 日 00 时（a）FNL、（b）EC 两初始场的 850 hPa 相对湿度场（阴影）、风场（箭头，单位：m s^{-1}）

Fig. 3 Relative humidity field (shadings) and wind (arrows, units: m s^{-1}) at 850 hPa obtained from the two initial fields (a) FNL, (b) EC at 0000 BJT 16 May

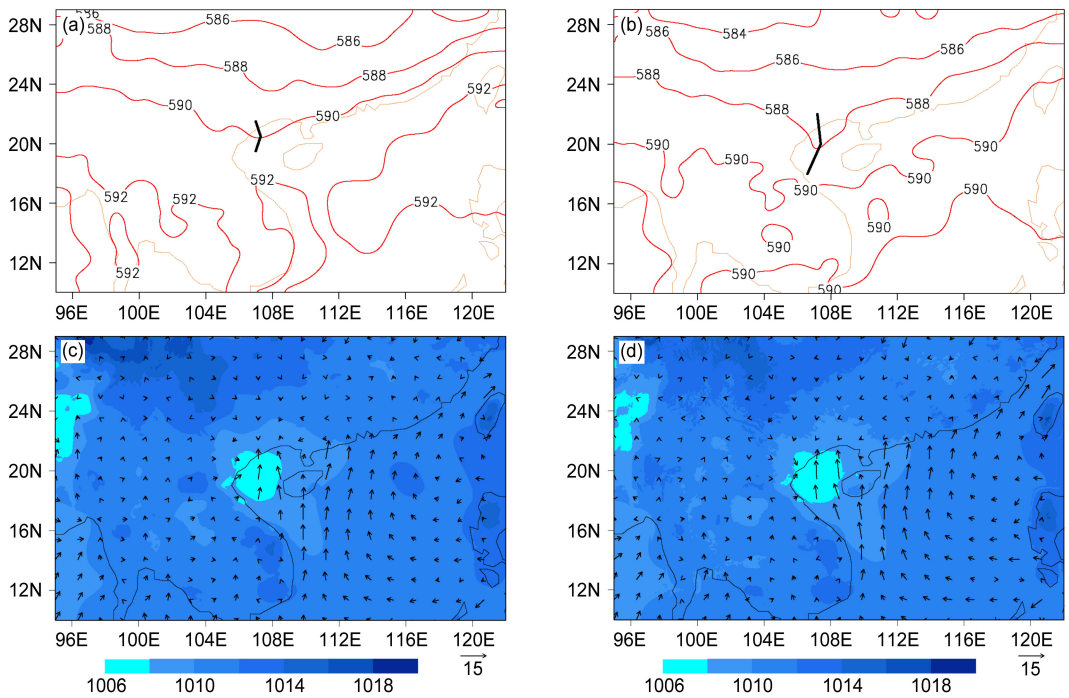

图 4 2015 年 5 月 16 日 00 时（a、c）FNL、（b、d）EC 两初始场的（a、b）500 hPa 位势高度场（单位：dagpm）、（c、d）海平面气压场（阴影，单位：hPa）、风场（箭头，单位：m s^{-1}）。图 a、b 中的粗实线表示槽线

Fig. 4 (a, b) 500-hPa gopotential height (units: dagpm), (c, d) sea level pressure (shadings, units: hPa), and surface wind (units: m s^{-1}) obtained from the two initial fields (a, c) FNL, (b, d) EC at 0000 BJT 16 May 2015. Black bold lines in Figs. a and b represent trough lines

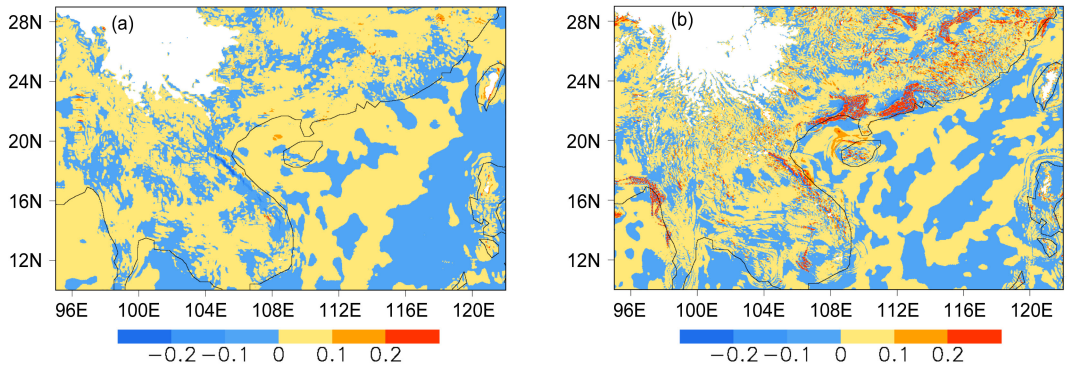

图 5　2015 年 5 月 16 日 01 时（a）FNL、（b）EC 两初始场对应的 850 hPa 垂直速度场（单位：m s^{-1}）

Fig. 5　850-hPa vertical velocity (units: m s^{-1}) obtained from the two initial fields (a) FNL, (b) EC at 0100 BJT 16 May

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 6e 验证了这一结论，EC 相对于 FNL 确实更有利于上升运动。同时图 6d 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，上下层温差较小、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（J）的计算公式（周菲凡，2009）：

$$J=\int_0^1\left[u_0'^2+v_0'^2+\frac{c_p}{T_r}T_0'^2+R_aT_r\left(\frac{p_{S0}'}{p_r}\right)^2+\frac{L^2}{c_pT_r}q_0'^2\right]\mathrm{d}\sigma, \tag{3}$$

其中，σ为垂直方向坐标，c_p为定压比热，L 为凝结潜热，c_p=1005.7 kg^{-1} K^{-1}，R_a为干空气气体常数，R_a=287.04 J kg^{-1} K^{-1}，p_r=1000 hPa，L=2.5×10^6 J kg^{-1}，T_r=207 K。u_0'、v_0'、T_0'、p_{S0}'、q_0'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。公式（3）是对垂直方向进行了积分，因此，我们可以得到一个水平的湿能量场的分布。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（3）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。

4.3　敏感性试验设计

在 4.1 中比较了 EC 和 FNL 中各种基础气象要素场（温度、压强、湿度、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 1a。其中，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。这

里设计三组对比试验，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，边界场、其他区域的场依然采用 FNL 资料，此外保持 WRF 模式设置不变，重新进行预报并分析敏感性试验的预报结果。

将三个试验的预报结果与 OBS 进行比较（图 8），并分别求出它们与 OBS 降水分布的场相关系数及强降水的 TS 评分（表 2）。结果表明：替换区域一（敏感区）内的基础要素场可以最大程度提高预

表 2 敏感区试验中 24 小时（2015 年 5 月 16 日 00 时至 17 日 00 时）预报累积降水量与 OBS 的相关系数及 TS 评分

Table 2 Correlation coefficients and TS scores between OBS and the experimental forecast precipitation results in sensitive-area experiments from 0000 BJT 16 May to 0000 BJT 17 May 2015

	相关系数	TS评分
区域一	0.512	0.1287
区域二	0.241	0.0639
区域三	0.323	0.0948

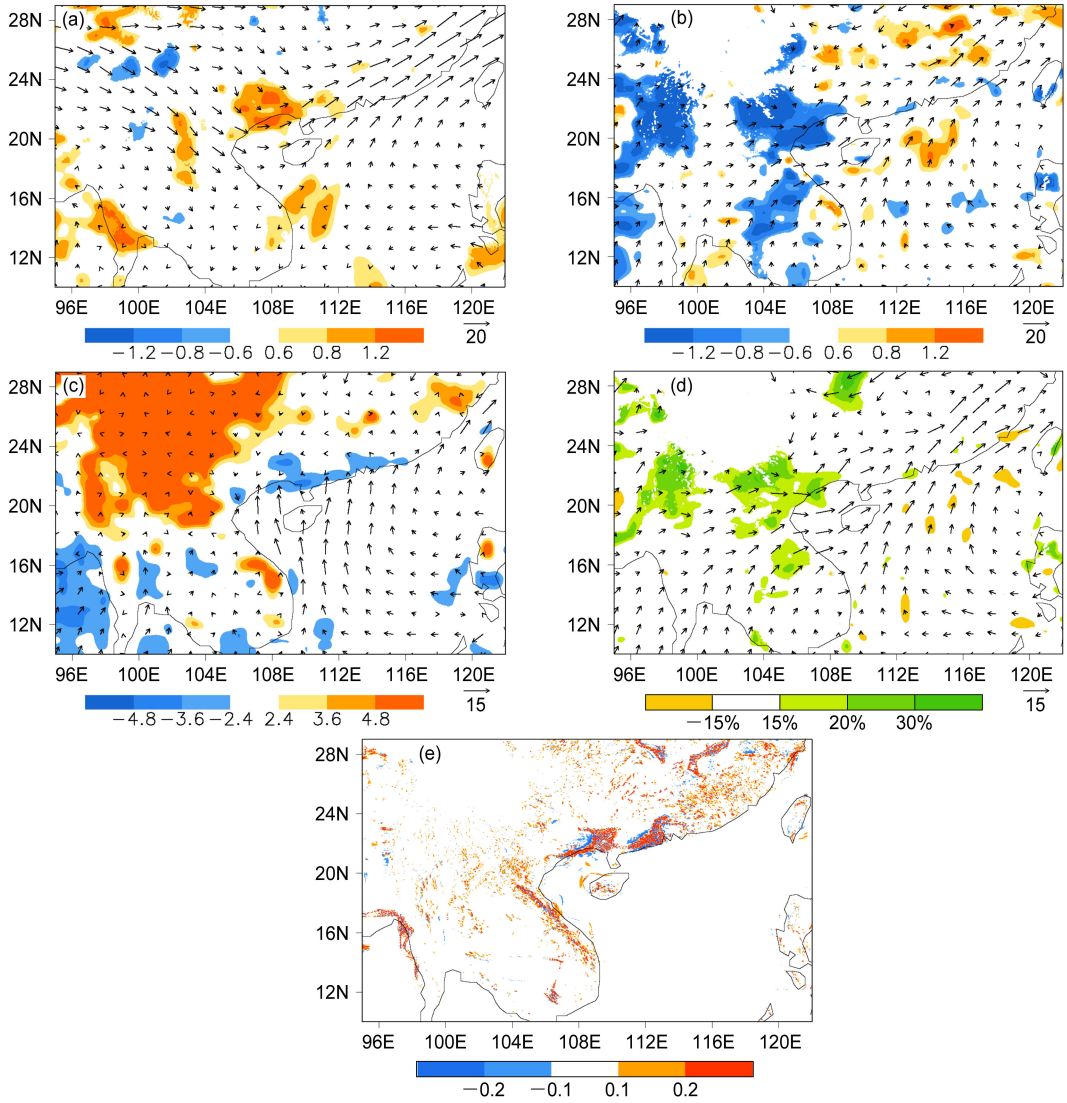

图 6 2015 年 5 月 16 日 00 时 EC、FNL 两初始场的（a）500 hPa、（b）850 hPa、（c）地面温度（阴影，单位：°C）的差值场、EC 风场（箭头，单位：m s^{-1}），（d）850 hPa 相对湿度（阴影）的差值场叠加同层次 EC 风场（箭头，单位：m s^{-1}），（e）2015 年 5 月 16 日 01 时 EC、FNL 两初始场 850 hPa 垂直速度的差值场（单位：m s^{-1}）

Fig. 6 Differences of temperature (between initial fields EC and FNL, shadings, units: °C) at (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, (c) ground and wind (from initial field EC, arrows, units: m s^{-1}), (d) 850-hPa relative humidity differences (between initial fields EC and FNL, shadings) and wind (from initial fields EC, arrows, units: m s^{-1}) at 0000 BJT 16 May, and (e) 850-hPa vertical velocity differences (between initial fields EC and FNL, units: m s^{-1}) at 0100 BJT 16 May

报技巧，这验证了 4.1 节中敏感区的准确性，说明该区域确实为初始误差的主要来源区域。

确定敏感区后，下面我们进一步考察初始误差

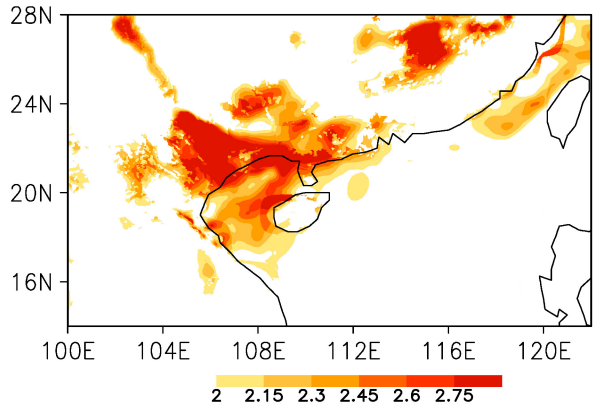

图 7　2015 年 5 月 16 日 00 时 EC、FNL 两初始场的整层大气扰动湿能量的差值场（单位：10^6 J）

Fig. 7　Differences (between initial fields EC and FNL, units: 10^6 J) of the wet energy field disturbance from the entire atmosphere at 0000 BJT 16 May

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，设计了五组对比试验：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，开展敏感变量试验。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 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 9e 与图 1a 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。为了

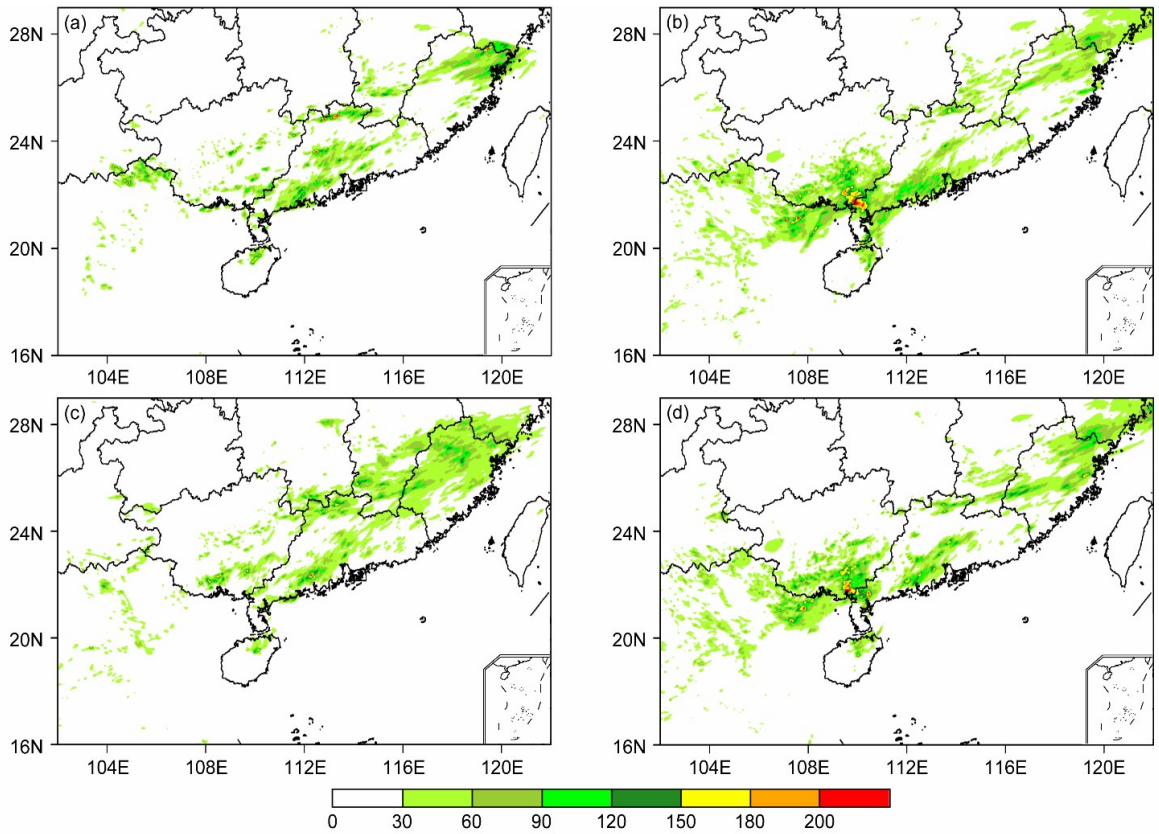

图 8　24 小时（2015 年 5 月 16 日 00 时至 17 日 00 时）累积预报降水量分布（单位：mm）：（a）WRF_FNL；EC 替换 FNL 中（b）区域一、（c）区域二、（d）区域三（如图 1 中所示）内基础要素场

Fig. 8　24-h (from 0000 BJT 16 May to 0000 BJT 17 May 2015) accumulative forecast precipitation (units: mm) distribution in South China: (a) WRF_FNL; EC replaces the basic element fields of FNL in (b) area 1, (c) area 2, (d) area 3 (as shown in Fig. 1)

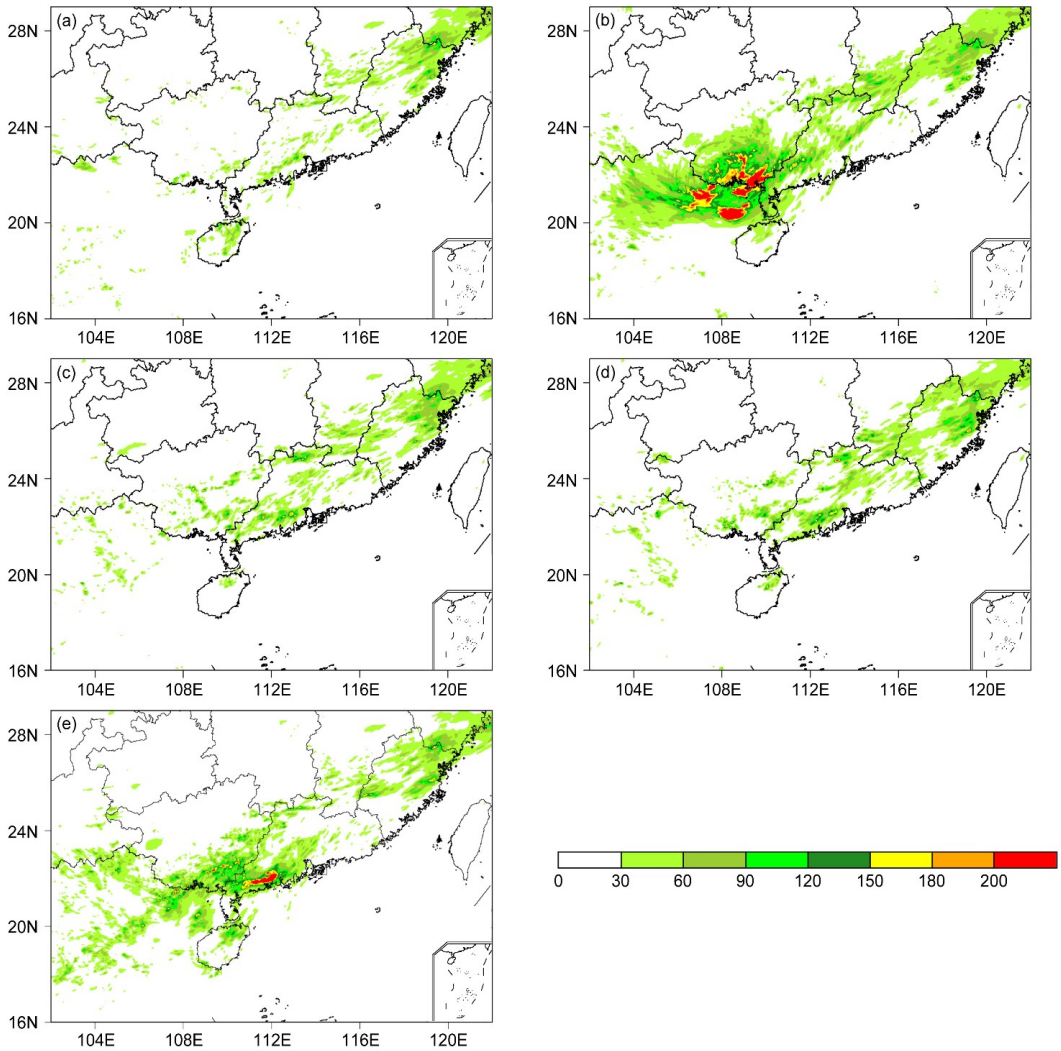

图 9 2015 年 5 月 16 日 00 时至 5 月 17 日替换 FNL 敏感区（区域一）内不同变量后 24 h 预报累积降水量分布（单位：mm）：（a）温度；（b）湿度；（c）风场；（d）气压场；（e）同时替换温度和湿度

Fig. 9 Forecast precipitation (units: mm) distribution of precipitation (units: mm) in South China of the replacing sensitive variable experiment in the sensitive area (area 1) of FNL from 0000 BJT (Beijing time) 16 May to 0000 BJT 17 May 2015: (a) Temperature; (b) humidity; (c) wind field; (d) pressure field; (e) temperature and humidity

定量化验证此结论，分别计算了几种预报结果与 OBS 的相关系数与 TS 评分（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 敏感变量试验中 24 小时（2015 年 5 月 16 日 00 时至 17 日 00 时）累积降水量预报结果与 OBS 的相关系数及 TS 评分

Table 3 Correlation coefficients and TS scores between OBS and the experimental forecast precipitation results in sensitive-variable experiments from 0000 BJT 16 May to 0000 BJT 17 May 2015

替换物理量	相关系数	TS评分
温度场	0.182	0.0520
湿度场	0.112	0.0937
风场	0.094	0.0322
气压场	0.099	0.0329
温度场和湿度场	0.487	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。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 d 降水预报分析，ECMWF 总体来说具有很高的预报技巧，因此可假定 ECMWF 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，而初始温度场和初始湿度场则为此次暴雨预报初始误差的主要来源变量。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。

需要指出的是，本文只对一次华南暴雨个例进行了分析，今后还需对大量的华南暴雨个例进行分析，根据不同暴雨类型，总结预报误差来源的关键区域和关键变量，进而可以指导相关部门有针对性地改进初始场和模式，从而提高华南地区的暴雨预报技巧。

参考文献（References）

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, 22(4): 315−323.　Bian Jianchun, Yang Peicai. 2003. Some remarks on the predictability of atmospheric processes [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 22(4): 315−323. doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2003.04.001

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, 61(4): 432−446.　Chen Jing, Xue Jishan, Yan Hong. 2003. The uncertainty of mesoscale numerical prediction of South China heavy rain and the ensemble simulations [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61(4): 432−446. doi:10.11676/qxxb2003.042

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 Tao, Sun Jun, Chen Yun, et al. 2019. Study on the numerical predictivity of localized severe mesoscale rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 45(9): 1199−1212. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.09.002

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(5): 6−20.　Du Jun, Li Jun. 2014. Application of ensemble methodology to heavy-rain research and prediction [J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 4(5): 6−20. doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2014.05.001

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. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.01

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(5): 565−571.　Guan Yong, Liu Yuming, Hu Lihua, et al. 2010. Diagnostic analysis of two torrential rain events in Guangdong [J]. Meteorological Science and Technology, 38(5): 565−571. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2010.05.006

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, 30(3): 345−351.　Hu Liang, He Jinhai, Gao Shouting. 2007. An analysis of large-scale condition for persistent heavy rain in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 30(3): 345−351. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2007.03.008

Huang Ling, Luo Yali. 2017. Evaluation of quantitative precipitation forecasts by TIGGE ensembles for South China during the presummer rainy season [J]. J. Geophys. Res. Atmos., 122(16): 8494−8516. doi:10.1002/2017JD026512

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(1): 11−20.　Li Chunhui, Wu Zhiwei, Meng Weiguang, et al. 2017. Compared analysis characteristics of impact of large scale circulation on the persistent heavy rains in post-flood season in South China associated with monsoon and tropical cyclone [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(1): 11−20. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.01.002

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(3): 236−245. doi:10.1080/16742834.2018.1469952

Li Zhenghui, Luo Yali, Du Yu, et al. 2020. Statistical characteristics of pre-summer rainfall over South China and associated synoptic conditions [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 98(1): 213−233. doi:10.2151/jmsj.2020-012

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(6): 975−984.　Lin Xiaoxia, Feng Yerong, Zhang Chengzhong, et al. 2017. Diagnostic analysis of thermal and dynamic characteristics of a rainstorm process in southern China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 33(6): 975−984. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2017.06.018

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(1): 119−130.　Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen

Baofa. 2019. Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(1): 119−130. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245

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(1): 1−15. Lu Rong, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2018. Influence of offshore initial moisture field and convection on the development of coastal convection in a heavy rainfall event over South China during the pre-summer rainy season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(1): 1−15. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16261

Luo Yali, Li Liye, Johnson R H, et al. 2019. Science and prediction of monsoon heavy rainfall [J]. Science Bulletin, 64(21): 1557−1561. doi:10.1016/j.scib.2019.09.005

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(3): 411−420. Luo Yu, Zhang Lifeng. 2010. A case study of the error growth evolution in a Meiyu front heavy precipitation forecast and an analysis of the predictability [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(3): 411−420. doi:10.11676/qxxb2010.040

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, 58(6): 666−678. Shi Xueli, Ding Yihui. 2000. A study on extensive heavy rain processes in South China and the summer monsoon activity in 1994 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58(6): 666−678. doi:10.11676/qxxb2000.068

Wu Mengwen, Luo Yali, Chen Fei, et al. 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 58(8): 1799−1819. doi:10.1175/JAMC-D-18-0284.1

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(3): 323−342. Wu Yali, Meng Weiguang, Chen Dehui, et al. 2018. A study of the impact of initial conditions on the predictability of a warm-sector torrential rain over South China [J]. Acta Meteor. Sin. (in Chinese), 76(3): 323−342. doi:10.11676/qxxb2018.001

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(6): 576−589. Zhang Chengzhong, Wan Qilin, Huang Yanyan, et al. 2008. Numerical experiments on the impact of initial conditions upon precipitation in warm region over south of China [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 24(6): 576−589. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2008.06.002

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]. J. Geophys. Res. Atmos., 123(7): 3574−3593. doi:10.1002/2017JD028155

Zhang Renhe, Ni Yongqi, Liu Liping, et al. 2011. South China Heavy Rainfall Experiments (SCHeREX) [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 89A: 153−166. doi:10.2151/jmsj.2011-A10

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]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 126pp. 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, 126pp.

Zhou Feifan, Yamaguchi M, 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(7): 841−851. doi:10.1007/s00376-016-5238-4

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. doi:10.1007/s00376-018-7095-9

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(1): 14−18. Zhong Xiongyan, Zhang Dong, Guan Yong. 2017. Analysis of a heavy rain process in the coastal area of southwestern Guangdong May 16-17, 2015 [J]. Guangdong Meteorology, 39(1): 14−18. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2017.01.004

Zhong Suixin, Yang Shuai, Guo Chunya, et al. 2019. Capabilities and limitations of GRAPES simulations of extreme precipitation in the warm sector over a complex orography [J]. J. Trop. Meteor, 25(2): 180−191.