

徐国强,赵晨阳,2019. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨模拟中的背景场影响分析[J]. 气象, 45(12):1642-1650. Xu G Q, Zhao C Y, 2019. Impact of background field in the numerical simulation of extremely severe rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017[J]. Meteor Mon, 45(12):1642-1650(in Chinese).

2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨模拟中的 背景场影响分析^{*}

徐国强¹ 赵晨阳²

1 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

提 要: 2017 年 5 月 7 日广州发生了特大暴雨, 为研究不同背景场资料对这次暴雨过程的影响, 模式背景场分别采用美国 NCEP 的 GFS 资料 and 中国的 T639 资料, 利用 GRAPES_Meso 模式对这次暴雨过程进行了数值模拟和影响分析; 数值试验结果表明, 采用不同的背景场对这次暴雨过程具有显著影响, 用 T639 资料(T639_run)作为模式背景场大致模拟出了这次暴雨过程, 而采用 NCEP GFS 数据(GFS_run)模拟的降水明显偏北。其原因是, 采用 T639 资料做背景场时, 华南暴雨区域存在深厚的水汽输送, 同时存在强烈的上升运动, 可以产生极端强降水; 而采用 GFS 资料进行数值模拟时, 实际暴雨区上空的上升气流较弱, 水汽输送也较弱, 使强降水落区偏北。GRAPES_Meso 模式模拟的华南地区的云顶高度整体偏高, 云顶温度整体偏低, 相对来说, 采用 T639_run 的模拟结果优于 GFS_run 的结果, 该研究结果可以为云降水方案中的水物质和云量计算方案的改进和优化提供一定的参考。

关键词: 暴雨, 背景场, 数值模拟, 云顶高度, 云顶温度

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2019. 12. 002

Impact of Background Field in the Numerical Simulation of Extremely Severe Rainstorm in Guangzhou on 7 May 2017

XU Guoqiang¹ ZHAO Chenyang²

1 CMA Numerical Weather Prediction Centre, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: A torrential rainfall event occurred in Guangzhou on 7 May 2017. In order to study the impact of different background field data on the simulation of rainstorm process, the NCEP Global Forecast System (GFS) data and CMA T639 data were used separately to develop lateral boundary and initial conditions for the numerical simulation and impact analysis of the rainstorm with the GRAPES_Meso model. The results indicated that background fields have significant impact on the simulation of rainstorm process. The precipitation forecasts using T639 data (T639_run) as initial and boundary conditions seem to be roughly simulated, while the location of the rainfall simulated by GFS data (GFS_run) is obviously northerly. The reason is that there is a deep water vapor transport and strong ascending motion in the rainstorm area of South China using T639 data as the background field, which can produce extremely heavy rainfall. The updraft and water vapor transport are weak in the actual storm area simulated by GFS data, making the heavy

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506902)和国家自然科学基金项目(41590874、41475051)共同资助

2018 年 8 月 10 日收稿; 2019 年 7 月 17 日收修定稿

第一作者, 徐国强, 主要从事数值预报模式的研发和应用. Email: xugq@cma. gov. cn

precipitation area northerly. Overall, the height of cloud top is higher and the temperature of cloud top is lower simulated by GRAPES_Meso model. Relatively speaking, the simulation result using T639_run is better than using GFS_run. This research result could provide a reference for the improvement and optimization of the calculation about the water substances and cloud fraction in cloud schemes.

Key words: rainstorm, background field, numerical simulation, cloud top height, cloud top temperature

引 言

华南尤其广东是我国的暴雨多发地区,根据暴雨出现的时段,4—6 月为华南前汛期(陶诗言, 1980),其降水量可占全年降水量的 40%~50%,甚至更多。华南暖区暴雨由于其独特的中尺度对流特征,一直是大气科学研究和预报业务中的难点问题和热点问题。薛纪善(1999)和周秀骥等(2003)对我国华南地区暖区暴雨进行了个例和统计分析,认为暖区暴雨多发生于 850 hPa 低空急流后部,低层南风辐合是产生暖区暴雨的重要机制之一。何立富等(2016)总结了 3 类华南暖区暴雨类型,即边界层辐合线型、偏南风风速辐合型和强西南急流型的天气系统配置及触发因子。

在数值预报中,数值模式的初值对模式的预报结果有非常重要的影响。已有的研究表明,初始场的微小变化对中尺度对流系统的预报具有显著影响(Melhauser and Zhang, 2012; Wu et al, 2013)。张诚忠等(2008)对暖区降水个例的研究表明,通过同化逼近雷达反演的雨水和风速来改进模式初始场可以使前 12 h 的降水预报更逼近实况。Zhang et al (2016)针对华南季风降水试验期间的暖区暴雨过程进行研究,发现风廓线资料初值同化技术能够一定程度上提高暖区暴雨的可预报性。吴亚丽等(2018)通过研究一次华南暴雨过程对初值的响应,发现增加模式的初始云信息可以使数值模式模拟出与实况更接近的降水。

2017 年 5 月 7 日,广州市花都区 and 增城区的局部区域出现了小时雨量超过 180 mm、3 h 雨量超过 330 mm、24 h 雨量超过 500 mm 的特大暴雨过程,这次暴雨过程具有降水强度极大、局地性强、降水系统移动缓慢等特点。很多学者对这次过程进行了研究;田付友等(2018)研究认为偏南暖湿气流的持续输送、地形强迫和冷池的作用是对流维持的主要原因;傅佩玲等(2018)指出,不断加强的低层偏南暖湿气流对于对流系统的发展和维持具有重要作用;伍

志方等(2018)分析了这次暴雨过程的中尺度系统和可预报性,指出各家业务数值预报模式都漏报了这次暴雨过程。本文分别用美国国家环境预报中心 NCEP 的全球预报系统(Global Forecast System, GFS)资料和中国 T639 模式结果做模式初值的背景场,对这次暴雨过程进行了数值模拟和分析,试图从背景场的角度对这次业务模式普遍漏报的过程进行研究和讨论,同时为华南暴雨的预报提供一些有益的参考。

1 资料与数值试验设计

1.1 资料

本文所用资料包括模式背景场资料、云分析资料和用以检验模式结果的(准)观测资料共三类。

(1) 背景场资料包括两种:(a)美国 NCEP 的 GFS 资料(水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$);(b)T639 模式输出的预报产品资料。

(2) 云分析资料主要有:(a)风云二号气象卫星(FY-2G) $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 分辨率的逐小时相当黑体温度(TBB)产品、总云量(CT)产品;(b)我国多普勒天气雷达反射率因子三维组网拼图资料。

(3) 用于检验模拟结果的(准)观测资料包括:(a)全国加密站 6 h 降水资料;在本文中相同站点的 6 h 累计降水资料进行累加后得到 12 和 24 h 累计降水资料,相同站点进行累加时剔除了降水观测值为 -1.0 的站点,得到 12 h 为 3279 站,24 h 为 3167 站,使用 Cressman 插值方法,将站点数据映射到试验模拟区域的格点上,进行降水实况图的绘制;(b)日本葵花 8 号气象卫星(Himawari-8) $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 分辨率的云产品,要素包括云顶高度和云顶温度。

1.2 数值模式与试验方案设计

数值试验所用的数值预报模式为 GRAPES_Meso 模式(薛纪善等, 2008; 陈德辉等, 2008; 徐国强等, 2008; 黄丽萍等, 2017),该模式具有如下特征:

采用半隐式半拉格朗日时空分离技术,水平方向采用C-网格设计,垂直方向采用charney_phillips跳层设计和高度地形追随坐标,模式包含全物理过程且可选的模块化设计,时空分辨率可调。模式水平分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,垂直分层为49层;物理过程参数化方案做如下选择:WSM6微物理过程方案、RRTM长波辐射方案、Dudhia短波辐射方案、Monin-Obukhov近地面层方案、Noah陆面过程方案、MRF边界层方案以及KFeta积云对流参数化方案。

为研究模式背景场对预报结果的影响。分别用美国NCEP的GFS资料和中国T639模式结果做模式初值的背景场,对2017年5月7日的华南暴雨过程进行了数值模拟和分析,以5月6日12时(UTC,以下均为世界时)作为模式的初始积分时间,时间步长取为60 s,积分24 h。共设计两组试验:试验(1):以GFS数据作为背景场和侧边界条件进行数值试验,简称为GFS_run;试验(2):以T639模式数据作为背景场和侧边界条件进行数值试验,简称为T639_run。需要说明的是,这两组数值试验都利用相同的云分析资料进行了云分析(朱立娟等,2017),形成了云的初始场。其主要差别为背景场的不同。

2 数值试验结果分析

2.1 降水分析

图1为12和24 h的降水实况和两个试验的降水预报图。对比图1a~1c可知,在12 h的预报中,GFS_run(图1b)与降水实况(图1a)相比,漏报了这次华南强降水过程,并且其预报的雨带与实况相比明显偏北;T639_run(图1c)与实况对比,强降水中心基本报出来了,但强度有些偏强,降水区范围偏大,同时东侧的强降水中心也漏报了;综合来看,T639_run的模拟结果比较接近降水的观测,明显优于GFS_run的结果。对于24 h预报,GFS_run(图1e)与降水实况(图1d)相比,强降水中心明显偏北,主要位于广东省的中北部;T639_run(图1f)与实况对比,强降水中心基本报出来了,但位置略偏北,强度有些偏强;综合来看,T639_run的模拟结果

比较接近降水的观测,明显优于GFS_run的结果。

通过以上分析可知,采用T639资料作为模式背景场和侧边界条件预报结果明显优于采用GFS数据的数值试验结果。

2.2 背景场差异及影响分析

由以上分析可知,对2017年5月7日华南暴雨过程,采用T639资料作为模式背景场的预报结果明显优于采用GFS数据的结果。那么这两种背景场的差异及其对这次暴雨过程的影响是值得深入研究的问题。

2.2.1 初值场差异

产生暴雨的最基本条件之一是暴雨区在低层有水汽输送和辐合上升气流,本文制作了两种背景场在积分初始时刻850 hPa水平风场和水汽通量大小及差值图(图2),由图2a和2b可见,两个试验的环流和水汽输送的分布大致相同,均在广东的中西部存在偏南气流,并携带明显的水汽,在广东的北部和东部存在偏北气流;细致对比两个试验的初始场,可以发现,T639_run的偏南风比GFS_run略弱一些,从两者的差值图可以分析出(图2c),在广东大部分地区T639_run比GFS_run的偏南风偏弱或偏北风略强,只是在广东西部T639_run比GFS_run的偏南风略强,在广东的中部和南部T639_run比GFS_run的水汽通量要大一些。

为探讨高层两个试验的初始风场的差异制作了200 hPa的水平风场和散度图(图3)。由图3可见,两个试验在200 hPa都是偏西气流控制,但在GFS_run中(图3a),广东产生强降雨的区域是负散度区,即为辐合区,意味着高空辐合利于下沉气流的产生,不利于产生降水天气;而T639_run中(图3b),该区域为辐散区,利于上升气流的发展;从两者的差值图(图3c)也可以清楚看出,T639_run的散度明显大于GFS_run,有利于降水的产生。这也部分地解释了图1分析中关于GFS_run的12 h预报漏报了这次强降水过程的结论。

为了解两个试验的初始地面温度场制作了初始时刻2 m温度场及差值图(图4)。在GFS_run中(图4a),初始时刻广东中南部产生强降雨的区域2 m温度约为 $24 \sim 26^{\circ}\text{C}$,而在T639_run中(图4b),此处温度明显较GFS_run低了 2°C ;从两者的差值

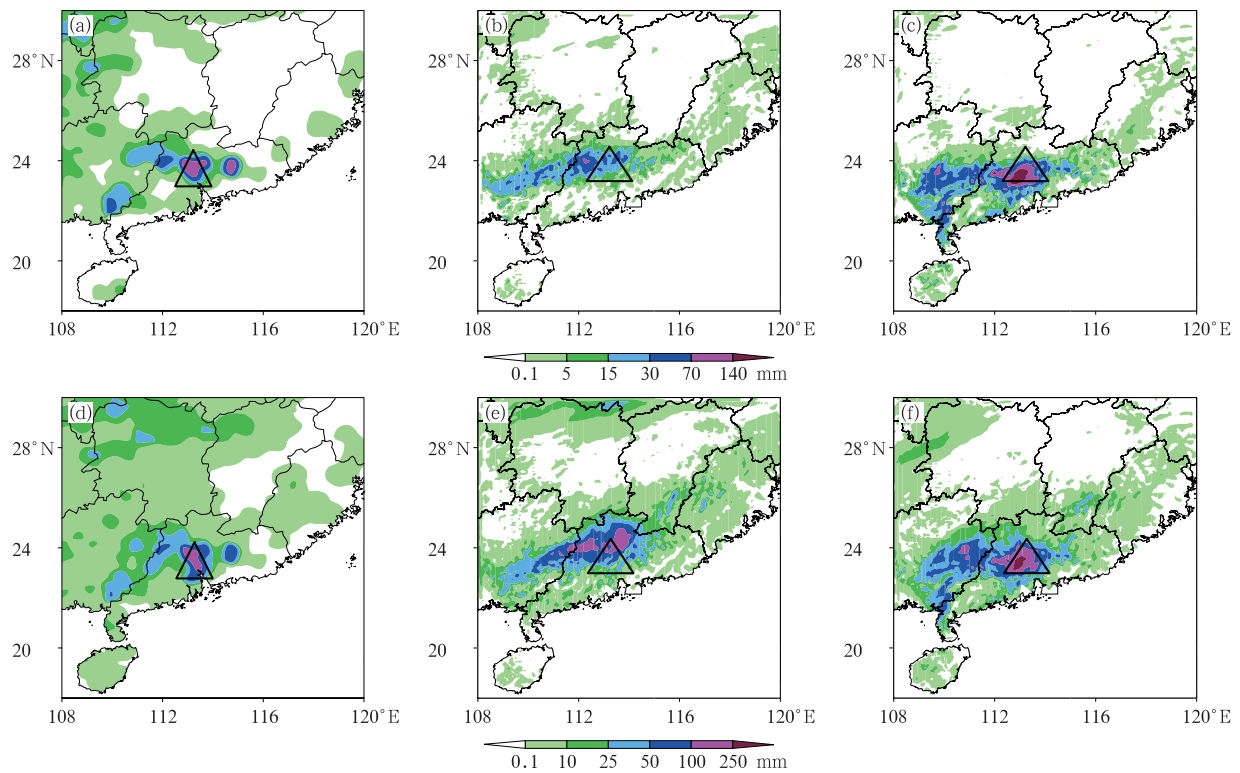


图 1 两个试验积分 12 h(b,c)和 24 h(e,f)的降水预报及对应的实况(a,d)

(a)12 h 实况,(b,e)GFS_run,(c,f)T639_run,(d)24 h 实况

(△:12 和 24 h 强降水中心)

Fig. 1 Precipitation forecasts for 12 h (b, c) and 24 h (e, f) simulated by two trials and corresponding observation (a, d)

(a) 12 h observation, (b, e) GFS_run, (c, f) T639_run, (d) 24 h observation

(△: centers of severe rainfall in 12 h and 24 h)

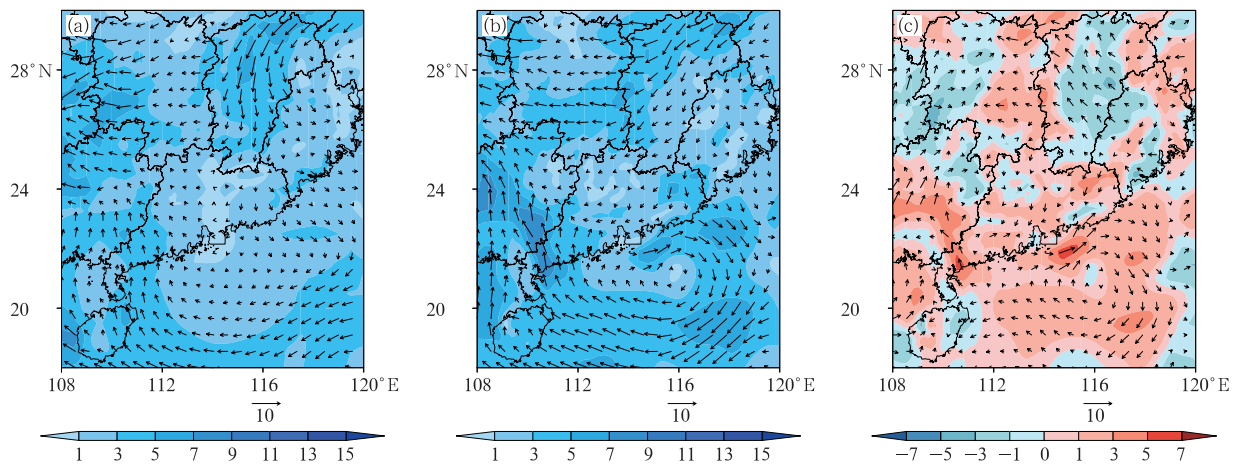


图 2 初始时刻 850 hPa 水平风场和水汽通量及差值

(a)GFS_run,(b)T639_run,(c)T639_run-GFS_run

(矢量:水平风场,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 阴影:水汽通量,单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 2 Horizontal wind field and water vapor flux and difference between them at initial time at 850 hPa

(a) GFS_run, (b) T639_run, (c) T639_run-GFS_run

(vector: horizontal wind field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; shaded area: vapor flux, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

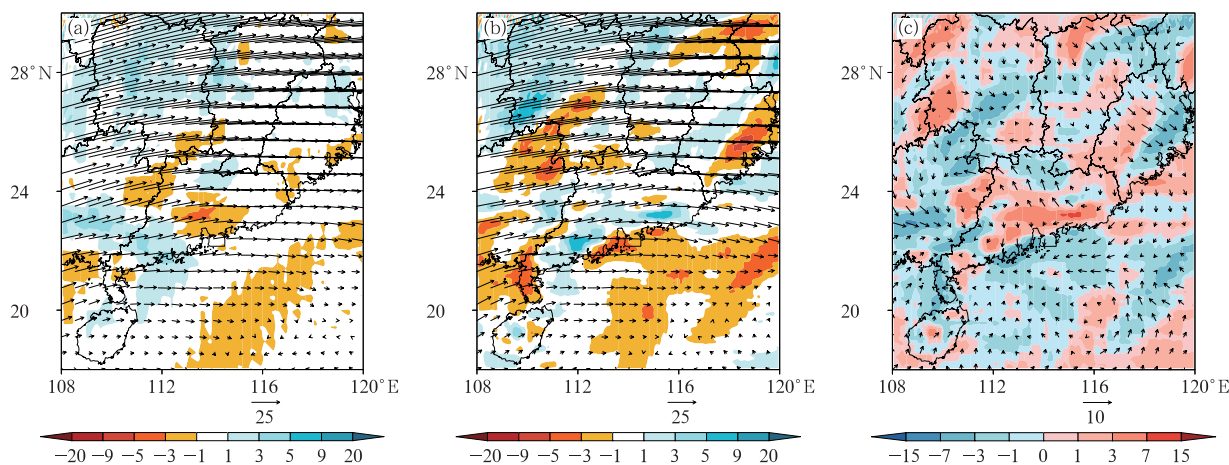


图 3 初始时刻 200 hPa 水平风场和散度及差值

(a) GFS_run, (b) T639_run, (c) T639_run - GFS_run

(矢量: 水平风场, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; 阴影: 水平风散度, 单位: 10^{-5}s^{-1})

Fig. 3 Horizontal wind field and divergence of horizontal wind and difference

between them at initial time at 200 hPa

(a) GFS_run, (b) T639_run, (c) T639_run - GFS_run

(vector: horizontal wind field, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; shaded area: divergence of horizontal wind, unit: 10^{-5}s^{-1})

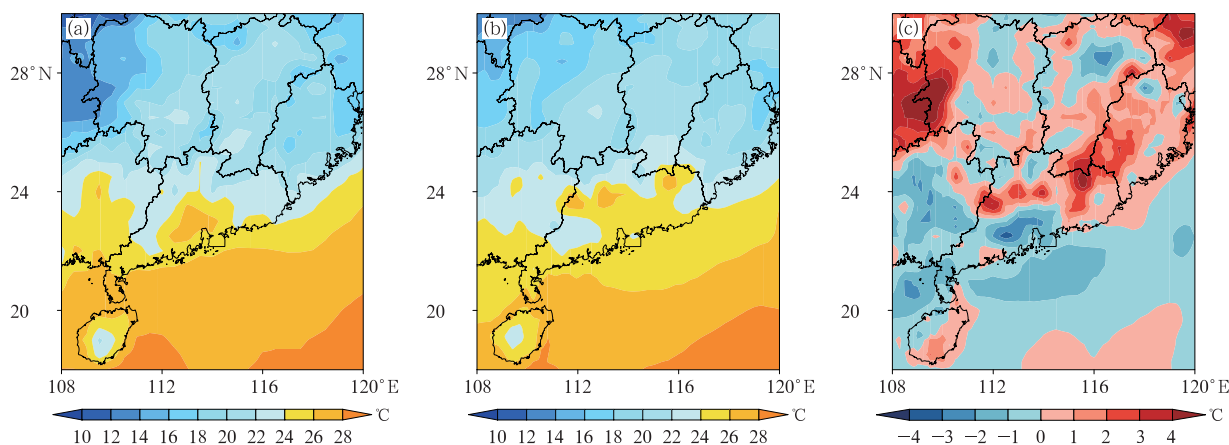


图 4 初始时刻 2 m 温度及差值

(a) GFS_run, (b) T639_run, (c) T639_run - GFS_run

Fig. 4 Temperature field and difference between them at initial time at 2 m height

(a) GFS_run, (b) T639_run, (c) T639_run - GFS_run

图(图 4c)可以看出,广东中南部 T639_run 明显比 GFS_run 地面温度偏低,来自广东西北侧的冷空气南下在此处形成一个冷中心,使得此处暖空气沿冷空气垫爬升,有利于对流的产生,这对强降雨中心出现的位置很重要。这也与图 1 分析中 T639_run 模拟的强降雨中心与观测更接近的结论一致。

2.2.2 初值场影响分析

前文分析了两个试验初始场的差异,那么在积

分一段时间以后,它们又是如何演变的呢? 为此分析了两个试验积分 12 h 以后大气环流的状况。

图 5 为积分 12 h 后两者的 850 hPa 水平风场和水汽通量场及差值,由图 5a 和 5b 可知,在大陆及邻近区域两者整层都是偏南气流控制,在广东的中部和西部都存在明显的水汽输送;从两者的差值图(图 5c)可以看到,在实际产生暴雨区的上空, T639_run 比 GFS_run 有更大的水汽输送存在,同时在暴

雨区的北侧有偏北风的箭头,揭示出 T639_run 比 GFS_run 偏南风要弱一些,将使降水系统要偏南一些。在 500 hPa 图上(图 6),大陆整层基本都受偏西南或偏西气流控制,为大陆带来水汽,从差值图(图 6c)可以明显看出,在华南地区 T639_run 比 GFS_run 有明显的水汽输送。说明此次强降水过程从低层到对流层中层有深厚的水汽输送到华南上空,为强降水的产生提供了充沛的水汽条件。

为更清楚地分析暴雨区上空上升气流的状况,沿 23°N 、 112.5°E 至 24°N 、 113.5°E 这条红线(图 6c)制作了垂直速度剖面(图 7),由图 7 可知, T639_run 在对流层低层和中上层存在强烈的上升气流,最大上升气流可达 $1.6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,而 GFS_run

虽然也存在上升气流,但上升气流的速度明显偏小。综合前面关于水汽输送的分析,可以得到,在 T639_run 中,华南存在深厚的水汽输送,同时存在强烈的上升运动,所以产生了极端强降水。这也就解释了 T639_run 对此次极端降水模拟的较好,而 GFS_run 模拟的强降水落区偏北的现象。

3 云顶变量的偏差分析

任何模式模拟的降水都不可能完全准确,随着模式动力框架和物理过程不断的完善,降水的预报也会越来越准确。对云有关变量的诊断和分析是改进云降水过程的一个有效手段,随着卫星、雷达观测

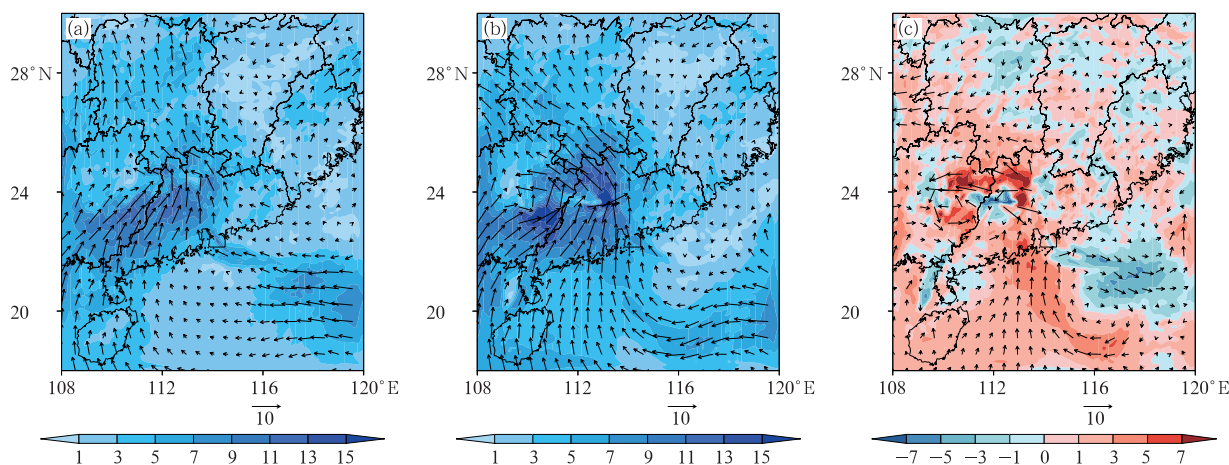


图 5 同图 2, 但为积分 12 h

Fig. 5 Same as Fig. 2, but integrated for 12 h

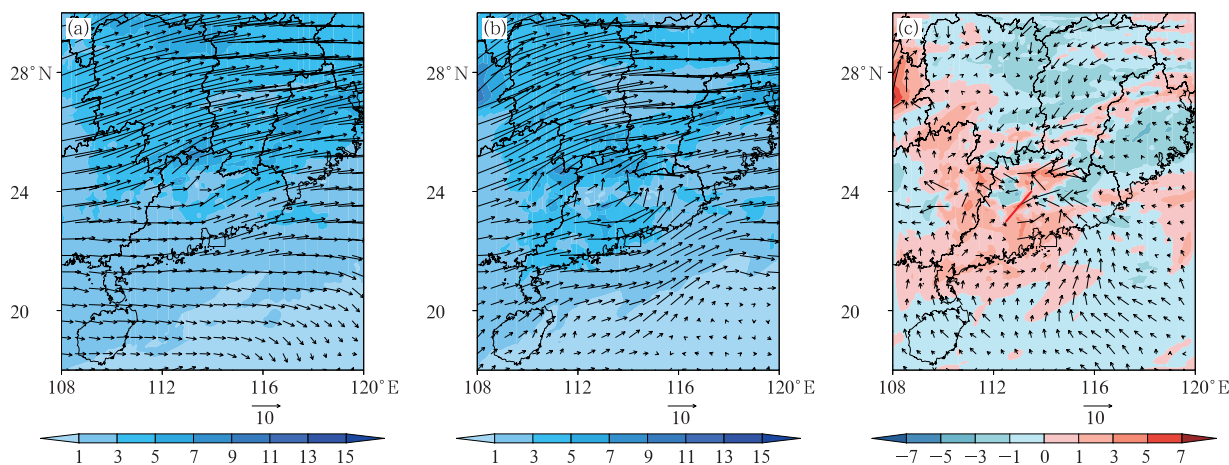


图 6 同图 2, 但为 500 hPa 积分 12 h

Fig. 6 Same as Fig. 2, but integrated for 12 h at 500 hPa

资料的丰富,对云变量特别是云顶变量的诊断分析成为可能。本文通过对这次暴雨过程云顶变量的分析,试图为云降水方案的改进提供一些有用的参考。

图 8 是两种试验在积分 12 h 后预报的雷达回波图和雷达观测实况,由图可见,T639_run 的雷达回波图(图 8c)与实况雷达观测(图 8a)比较接近,但强回波中心位置略偏北、强度偏强,同时在广西东部虚报了一片回波;而 GFS_run 预报的雷达回波(图 8b)明显偏北,漏报了此次华南暴雨过程。

图 9 是两种试验在积分 15 h 后预报的云顶高度和卫星观测云顶实况,从图中可以分析出,两种试验预报的云顶高度明显偏高,即预报的高云多且高度高,相对来说,T639_run 比 GFS_run 要好一些。

图 10 是两种试验在积分 15 h 后预报的云顶温度和卫星观测实况,将两个数值试验与观测对比,在整个华南区域两个试验模拟的温度都比观测的值要低,即预报的云顶温度较低,相对来说,在产生暴雨的区域,T639_run 的模拟结果比 GFS_run 要好一些。

从以上分析可以看出,GRAPES_Meso 模式模拟的华南地区的云顶高度整体偏高,云顶温度整体偏低,相对来说,采用 T639_run 的模拟结果优于 GFS_run 的结果。对 2017 年 5 月 3 日的一次飑线过程以及 2018 年的 4 号台风艾云尼、10 号台风安比等多个强降水个例进行过云顶变量的模拟,并与葵花 8 卫星云产品中的云顶温度、云顶高度以及 MODIS 云产品中的云顶气压对比分析,均发现

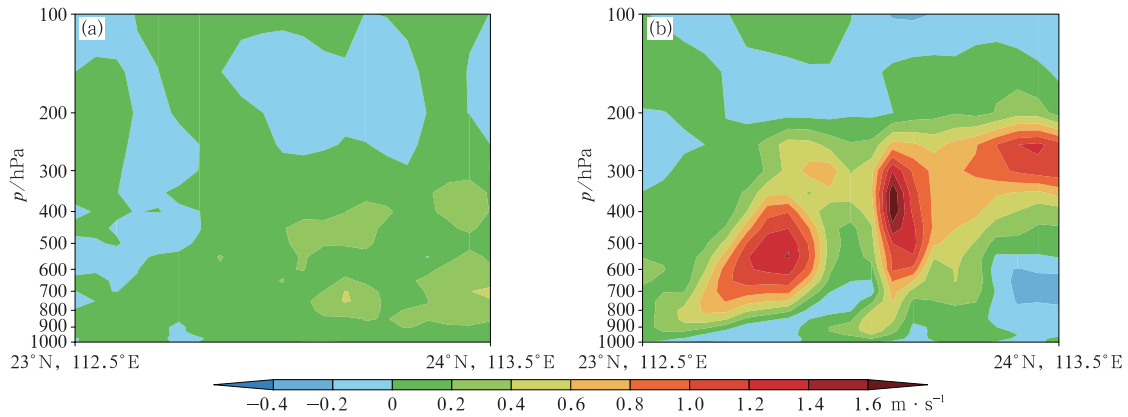


图 7 23°N、112.5°E 至 24°N、113.5°E 垂直速度的剖面

(a)GFS_run, (b)T639_run

Fig. 7 Vertical velocity profile along 23°N, 112.5°E to 24°N, 113.5°E

(a) GFS_run, (b) T639_run

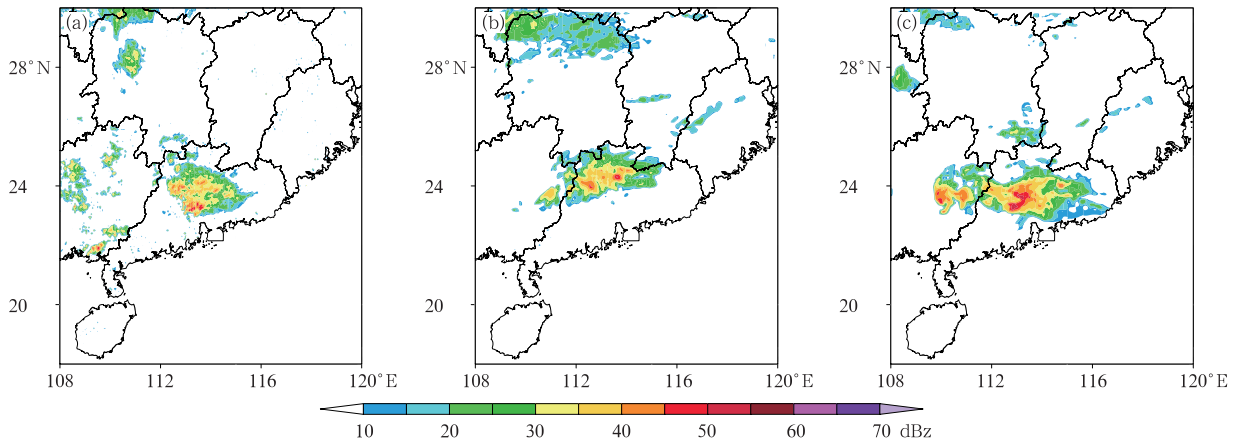


图 8 积分 12 h 后预报(b,c)的雷达回波图和雷达观测实况(a)

(b)GFS_run, (c)T639_run

Fig. 8 The prediction (b, c) of radar echo integrated for 12 h and corresponding observation (a)

(b) GFS_run, (c) T639_run

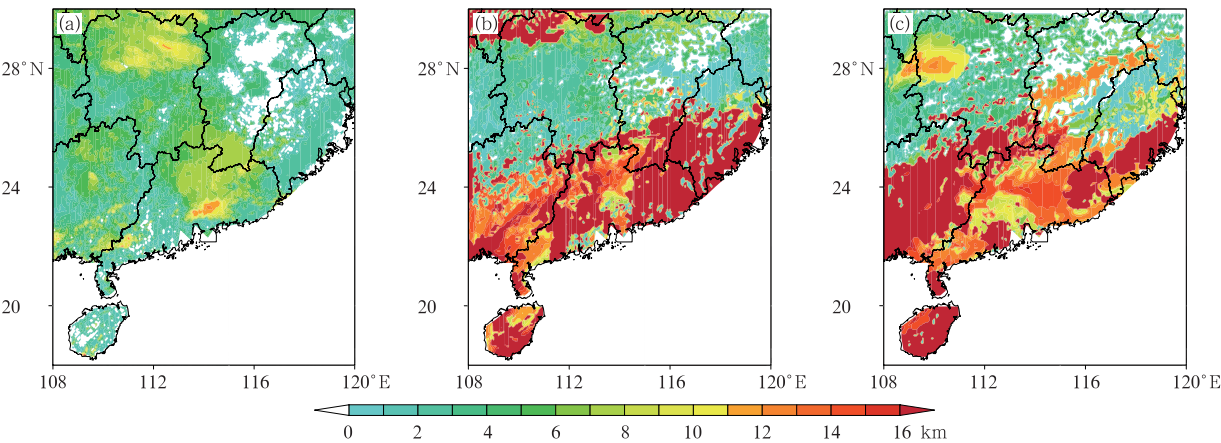


图 9 积分 15 h 预报(b,c)的云顶高度和卫星观测实况(a)
(b)GFS_run,(c)T639_run

Fig. 9 The prediction (b, c) of cloud top height integrated for 15 h and the observation (a) of satellite
(b) GFS_run, (c) T639_run

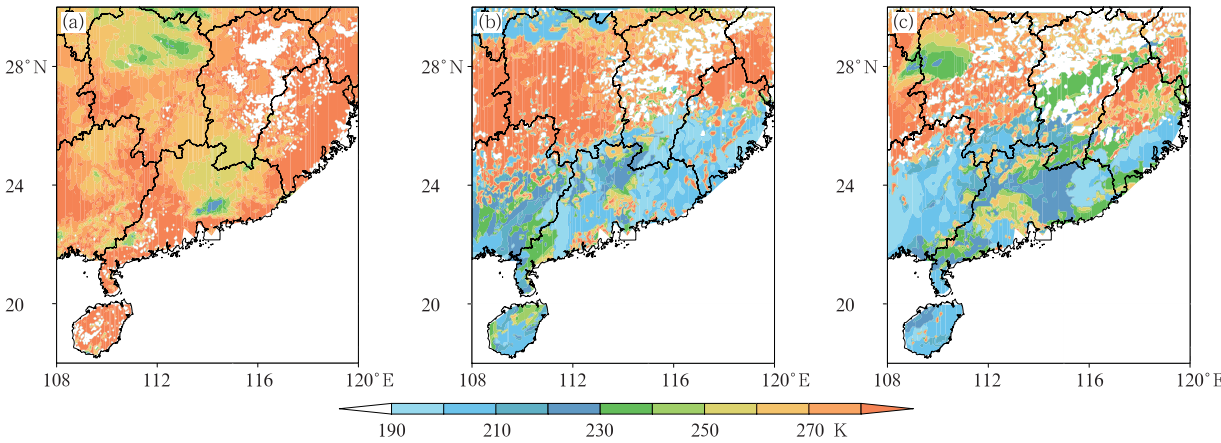


图 10 同图 9,但为云顶温度

Fig. 10 Same as Fig. 9, but for the prediction of cloud top temperature

GRAPES_Meso 模式模拟的云顶高度与卫星资料相比整体偏高(为模式系统误差),未来需要对云降水方案中的水物质和云量计算方案做进一步的改进和优化,以降低模式计算的云顶高度偏高的误差。

4 结论与讨论

分别用 NCEP 的 GFS 资料和 T639 模式结果做模式初值的背景场,对广州 2017 年“5·7”暖区特大暴雨进行了数值模拟和对比分析,可以得到如下结论:

(1) 采用不同的背景场对 2017 年 5 月 7 日华南暴雨过程具有显著影响,用 T639 资料作为模式背景场大致模拟出了这次暴雨过程,而采用 NCEP

GFS 数据模拟的降水明显偏北。

(2) 通过对比分析两个数值试验的水汽输送和上升气流,可以认为,采用 T639 资料做背景场时,华南暴雨区域存在深厚的水汽输送,同时存在强烈的上升运动,可以产生极端强降水;而采用 GFS 资料进行数值模拟时,实际暴雨区上空的上升气流较弱,水汽输送也较弱,强降水落区偏北。

(3) GRAPES_Meso 模式模拟的华南地区的云顶高度整体偏高,云顶温度整体偏低,相对来说,采用 T639_run 的模拟结果优于 GFS_run 的结果。

通过对 2017 年 5 月 7 日华南暴雨个例的模拟和分析,证明模式采用不同的背景场会对模拟结果有非常大的影响,从这次过程看,采用 T639 模式资料做背景场取得了较好的模拟效果,主要表现在其

在暴雨区上空具有强烈的水汽输送和低层风场辐合,利于出现较强的上升气流,从而产生强降水天气过程;而使用 NCEP 的 GFS 资料做背景场时,其偏南风偏强,暴雨区上空的上升气流较弱,水汽输送也较弱,模拟的强降水落区偏北。应该指出,本文只是对一个个例的研究结果,不能得到 T639 模式资料整体优于 NCEP 的 GFS 资料的结果。在此次强降水天气过程中,ECMWF 和 GRAPES_GFS 的资料与 NCEP 的 GFS 资料的预报结果相似,模拟的强降水中心都偏北,这里不再详述。

从本文研究结果可以看出,数值预报系统需要不断改进和完善资料同化系统,得到最优的模式初始场,进而提高模式的预报准确率。同时还应指出,GRAPES_Meso 模式的水物质和云量计算方案还需不断改进和优化,以降低模式计算的云顶高度偏高的误差。随着卫星、雷达等遥感资料的不断丰富和准确,为模式云降水物理过程的改进和完善提供了可能。

参考文献

- 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等,2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报,53(20):2396-2407. Chen D H, Xue J S, Yang X S, et al, 2008. New generation of multiscale NWP system (GRAPES): general scientific design[J]. Chin Sci Bull, 53(20): 2396-2407 (in Chinese).
- 傅佩玲,胡东明,张羽,等,2018. 2017 年 5 月 7 日广州特大暴雨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).
- 何立富,陈涛,孔期,2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. 应用气象学报,7(5):559-569. He L F, Chen T, Kong Q, 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China[J]. J Appl Meteor Sci, 7(5): 559-569 (in Chinese).
- 黄丽萍,陈德辉,邓莲堂,等,2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验[J]. 应用气象学报,28(1):25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main technical improvements of GRAPES Meso V4.0 and verification[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 25-37 (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).
- 陶诗言,1980. 中国之暴雨[M]. 北京:科学出版社:225. Tao S Y, 1980. Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press: 225 (in Chinese).
- 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 Y L, Meng W G, Chen D H, et al, 2018. A study of the impact of initial conditions on the predict-ability of a warm-sector torrential rain over South China[J]. Acta Meteor Sin, 76(3): 323-342 (in Chinese).
- 伍志方,蔡景就,林良勋,等,2018. 广州 2017“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).
- 徐国强,陈德辉,薛纪善,等,2008. GRAPES 物理过程的优化试验及程序结构设计[J]. 科学通报,53(20):2482-2434. Xu G Q, Chen D H, Xue J S, et al, 2008. The program structure designing and optimizing tests of GRAPES physics[J]. Chin Sci Bull, 53(20): 2482-2434 (in Chinese).
- 薛纪善,1999. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京:气象出版社:106-124. Xue J S, 1999. Study on the Heavy Rain in Summer in South China in 1994 [M]. Beijing: China Meteorological Press: 106-124 (in Chinese).
- 薛纪善,庄世宇,朱国富,等,2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究[J]. 科学通报,53(20):2408-2417. Xue J S, Zhuang S Y, Zhu G F, et al, 2008. Study on the new generation global/regional variational assimilation system in GRAPES[J]. Chin Sci Bull, 53(20): 2408-2417 (in Chinese).
- 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 C Z, Wan Q L, Huang Y Y, et al, 2008. Numerical experiments on the impact of initial conditions upon precipitation in warm region over south of China[J]. J Trop Meteor, 24(6): 576-589 (in Chinese).
- 朱立娟,龚建东,黄丽萍,等,2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报,28(1):38-51. Zhu L J, Gong J D, Huang L P, et al, 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. J Appl Meteor Sci, 28(1): 38-51 (in Chinese).
- 周秀骥,薛纪善,陶祖钰,等,2003. 98 华南暴雨科学试验研究[M]. 北京:气象出版社:370. Zhou X J, Xue J S, Tao Z Y, et al, 2003. Scientific Experiment on Rainstorm in South China in 98 [M]. Beijing: China Meteorological Press: 370 (in Chinese).
- Melhauser C, Zhang F Q, 2012. Practical and intrinsic predictability of severe and convective weather at the mesoscales[J]. Atmos Sci, 69(11): 3350-3371.
- Wu D C, Meng Z Y, Yan D C, 2013. The Predictability of a squall line in South China in 23 April 2007[J]. Adv Atmos Sci, 30(2): 485-502.
- Zhang X B, Luo Y L, Wan Q L, et al, 2016. Impact of assimilating wind profiling radar observations on convection permitting quantitative precipitation forecasts during SCMREX[J]. Wea Forecasting, 31(4): 1271-1292.