

文秋实,王东海,2017. 基于 GSI 的华南地区对流尺度快速循环同化预报试验[J]. 气象,43(6):653-664.

基于 GSI 的华南地区对流尺度快速 循环同化预报试验^{*}

文秋实¹ 王东海^{2,3}

1 成都信息工程大学,成都 610225

2 中山大学大气科学学院,广州 510275

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

提 要: 针对对流尺度快速循环同化系统多次循环同化带来的预报效果改进和资料应用问题,利用 GSI 同化技术和 WRF-ARW 区域模式,设计了华南地区对流尺度快速循环同化方案,对 2016 年 4 月 17—18 日华南地区的飑线天气强降水过程进行模拟试验,分析不同循环同化方案和雷达径向风资料同化对雷达回波、相对湿度、降水量级等的预报效果,以期提高华南地区飑线强降水过程预报技巧。检验结果表明:尽管只同化常规资料对预报效果的改进有局限性,但是多次循环同化对于模式预报的降水有一定改善作用;同时同化雷达径向风资料与常规资料对湿度和降水等模拟技巧均有所提高,大雨以上量级的 ETS 评分改进尤为明显;尽管模式模拟降水峰值小于真实观测值,但同化雷达径向风资料有效改善了飑线最强时段内的垂直上升速度,使得强降水发生时间和强度更接近真实观测。

关键词: GSI 同化,快速循环同化,雷达径向风同化

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.06.002

Test of GSI-Based Rapid Update Cycle Numerical Prediction in Southern China

WEN Qiushi¹ WANG Donghai^{2,3}

1 Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610025

2 School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

3 State Key Laboratory of Severe Weather (LASW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: Based on the GSI assimilation system and WRF-ARW model, a severe rainfall event which occurred in southern China for the period in 17—18 April 2016 was simulated by the method of rapid update cycle. The experiments used radar radial wind data and other conventional data in assimilation cycle. Several kinds of forecast variables were analyzed to find how the assimilation cycles and difference data would influence the forecast result. The results showed that despite the limitation of the single type of observation, there is a certain improvement effect on the false precipitation prediction by the use of rapid update cycle. Radar radial wind data and conventional data mixing assimilation could improve the humidity and precipitation prediction skills, especially at heavy rainfall levels ETS score. Although the simulated rainfall peak value is less than real observation, the assimilation of radar radial wind data could effectively improve the vertical velocity of the squall line, so the occurrence time and intensity of heavy rainfall are much closer to the real observation.

^{*} 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002 和 GYHY201306004)共同资助

2016 年 11 月 7 日收稿; 2017 年 4 月 13 日收修定稿

第一作者:文秋实,主要从事数值天气预报和快速循环同化研究. Email:575247829@qq.com

通信作者:王东海,主要从事中小尺度数值模拟研究. Email:wangdh@cma.gov.cn

Key words: GSI (gridpoint statistical interpolation) assimilation, rapidly cycle assimilation, radar radial wind assimilation

引 言

华南地区是中国雨水最充沛的区域之一(涂长望和黄土松,1944),同其他地区相比,具有平均降水量最大,暴雨发生次数最多,汛期雨季最长等特点,因而也是我国最严重的洪涝灾害地区之一,其中极强的大暴雨造成的灾害最为严重。每年4—6月的前汛期是华南第一个多雨期(鹿世瑾,1990;袁媛等,2012),降水量占全年的40%~50%甚至更多,暴雨洪涝灾害也多发于这个时期(徐桂玉和杨修群,2002),因此提高华南前汛期强降水预报能力对保障人民生命安全及减少财产损失都至关重要。

近年来,国内外数值预报模式分辨率获得不断提高。2014年,广东省气象局建立了华南中尺度数值预报系统,模式水平分辨率达到9 km,预报有效时长达72 h(陈炳洪和吴乃康,2015)。2016年,欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)全球数值预报模式水平分辨率已提高到9 km(张宏芳和潘留杰,2014)。尽管数值预报模式对大气环流预报能力获得了较明显的改善,但对华南暴雨及以上量级的预报并未表现出明显的预报优势(陈博宇等,2015)。究其原因,与数值模式初值不能很好地描述华南地区低层大气中尺度热力动力场结构有关。王东海等(2011)研究了2008年华南前汛期持续性致洪暴雨的降水特征及成因,发现低层异常风场向北推进是华南暴雨与“非典型性梅雨”同时出现的重要因素。赵玉春和王叶红(2009)结合暴雨发生前的大尺度背景场和中尺度对流系统特征分析指出,由于华南地区特殊的地形、下垫面属性、海陆差异和大气内部动力热力过程在不同尺度间的相互作用等多种因素,造成华南地区中小尺度辐合、切变及对流系统活动频繁,激发了华南地区暴雨天气。但是,当前的数值预报模式初始场不能准确地描述出中小尺度天气系统内部风场分布特征,使得华南地区的局地暴雨难以获得精确预报。如何在模式初值中更准确地描述华南地区中小尺度天气系统,特别是中低层风场、湿度场信息,需要进一步关注与研究。

循环同化分析技术是近年来改进中小尺度初值

质量和短时临近数值预报业务的一个主要技术途径(陈葆德等,2013;陈子通等,2010;傅娜等,2013)。其原理是通过多时次循环同化,不断同化最近时刻的多种观测资料,改进模式初始场内中小尺度系统动力热力结构精度,进而提高模式对中小尺度强天气事件的预报能力。自1994年美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)首先实现业务化以来,快速循环同化方法作为提高中小尺度天气系统初始场准确性的重要手段,正获得越来越广泛的应用。国际上学者们重点研究的是如何在预报时效允许的前提下增加同化观测资料类型以及循环同化次数。在资料使用方面,Stanley(2004)将地面观测、探空、云导风资料、飞机报文等观测资料进行了快速循环同化,并在NCEP的快速循环系统中业务化应用。徐枝芳等(2009)发现当同化探空资料等高质量观测资料时,采用减小观测误差方法得到的分析场更接近真实场。在循环次数方面,早期方案通常为每6 h同化一次,同化资料的频率远远无法满足对流尺度模式预报的需求。Peter and Huang(1992)和Huang and Peter(1993)分别利用数字滤波技术(DFI),在模式“热启动”时对初始场进行额外的向前、向后积分从而抑制预报初期的虚假扰动,使得初始场的动力和热力特征更加协调,达到提高短时临近预报时效的目的。这之后,Steve(2007)在此基础上引入雷达反射率资料改进中小尺度湿度场,并将循环同化间隔时间由每6 h一次加快至每3 h一次,使得经过云分析后的初始场中水凝物含量得到了改善,进一步提高了短临时刻预报效果。在国内,北京市气象局和广东省气象局首先建立了当地的逐3 h高分辨率快速循环同化预报系统。张诚忠等(2008)利用GRAPES区域中尺度模式,对华南一次暖区暴雨过程进行了每1 h一次的快速循环同化模拟试验,结果表明同化逐小时雷达径向风资料能使24 h累积降水预报的落区、量级得到明显改善。此外,范水勇等(2009)对北京地区高分辨率快速循环同化预报系统做了检验评估,发现3 km分辨率的快速循环同化系统较9 km分辨率有更好的预报效果,尤其是在改进大量级降水预报方面效果更佳。但整体来说,快速循环同化方法仍需要进一步研究。

格点统计插值(Gridpoint Statistical Interpolation, GSI)分析系统是美国近几年发展并业务应用的全球及区域同化系统,它集成了 EnKF、3Dvar、hybrid 等多种同化方法,并使用物理空间统计插值方法,可以进行快速的并行计算,同时提供多种同化方案,具有实时中尺度分析和快速更新同化的能力。与传统的 WRFDA 同化模块相比, GSI 系统不仅可以调整初始场的内部信息,也可以同时更新初始场的底边界与侧边界条件(沈菲菲和闵锦忠, 2016)。美国 NCEP 已经基于 GSI 同化系统和 WRF 区域模式,建立了美国的快速循环同化系统(High-Resolution Rapid Refresh, HRRR)。2011 年,上海台风研究所研发了基于 GSI 同化系统的高分辨率台风模式,利用 hybrid 技术初步建立了一个 GSI-EnKF 融合同化系统(徐同等, 2011),可以有效提高局地强对流短时临近预报能力。本研究将利用 GSI 同化系统和 WRF-ARW 数值模式,建立 GSI 中国华南快速循环同化系统(简称 GSI-SC),并选取 2016 年 4 月 17 日发生在我国华南地区的一次强降水个例,进行华南雷达资料、加密观测资料的快速循环同化试验,对比分析 GSI-SC 的不同同化间隔时间和不同观测资料对降水、相对湿度、雷达组合反射率等预报结果的影响,希望能进一步提高华南地区对流尺度模式短时临近预报能力,并通过个例模拟了解华南地区暴雨的发展演变过程,为提高华南地区对流尺度模式预报能力提供参考依据。

1 试验方案及资料

1.1 GSI-SC 快速循环同化系统方案设计

GSI 系统是由美国国家环境预报中心 NCEP 在原有统计分析系统的基础上开发的新一代全球和区域统一的变分同化系统。GSI 对常规观测资料、卫星资料(包括反演资料与辐射资料)和雷达观测资料等多种资料进行质量控制后,再通过三维变分方法调整模式的三维大气初始场。观测数据采用世界气象组织推荐的包含观测资料的位置、误差和质量控制码等信息 BUFR/PrepBUFR 资料(Kleist et al, 2009)。本文试验采用区域 GSIv3.4.1 版本,并关闭了 GSI 云分析模块。

WRF-V3.8 是美国国家大气研究中心和国家大气海洋局及其他多个部门联合开发的区域数值预

报模式,该模式采用非静力完全可压大气运动方程,垂直坐标采用地形追随气压坐标系。本次试验采用四层双向嵌套,水平分辨率分别为 36、12、4 和 1.3 km,母域为东亚地区,次内层区域为华南地区,最内层区域为广东地区。模式垂直坐标系采用地形追随坐标系,垂直层次为 57 层,边界层参数化方案均为 YSU 方案,微物理方案均为 WSM6 方案(Hong and Lim, 2006),在 36 和 12 km 区域的积云对流参数化选择 Kain-Fritsch 方案(马红云等, 2009),在 4 和 1.3 km 区域则关闭积云对流参数化方案,仅选择 WSM6 微物理方案,模式预报时效为 48 h。

将 GSI 同化方案进行本地化优化改进,与 WRF 模式链接,建立 GSI 华南快速循环同化系统(简称 GSI-SC)。GSI-SC 系统同化部分主要包括两部分,一是修改 GSI-SC 的输入输出模块,使得 GSI-SC 同化程序不仅能够直接读入 WRF 模式预报场信息,为快速循环同化提供背景场信息,还可输出供 WRF 模式积分的同化初始场;二是在同化雷达径向风资料时,优化改进 GSI-SC 雷达资料的前处理过程,增加华南地区的雷达和地形信息,自动完成地物杂波剔除、速度退模糊、生成超级观测等一系列雷达资料前处理过程。

1.2 资料简介

为了提高控制试验精确度,本文数值模式的同化背景资料和预报侧边界条件均选用欧洲中心再分析资料(ECMWF's Reanalysis Atmosphere data, ERA),侧边界条件时间间隔为 6 h。该资料水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$,垂直层次为 38 层,预报区域和各种类型资料分布情况如图 1 所示,同化的观测资料包括以下两大部分:第一部分为非雷达观测,包括国家气象信息中心整理的中国 2400 个站地面、探空、部分时段飞机报文资料,以及一部分 GTS 交换资料,如图 1 中红点所示为地面观测站点,蓝点则表示了探空观测数据的站点,在此次试验中简称为“常规观测”。第二部分为雷达观测,包括广东、福建、湖南、江西四省一共 28 部 SA 波段多普勒雷达逐小时观测基数据。此外,降水预报检验使用了 2016 年 4 月华南地区加密自动站逐小时降水资料,站点分布不再赘述。

1.3 试验方案及分析方法介绍

为了比较不同快速循环同化方案对此次降水个

例的预报效果,使用不同循环同化次数及不同类型观测资料分别进行同化试验,每组试验都是在 16 日 12 UTC 至 17 日 00 UTC 进行资料同化生成初始场,非雷达观测资料同化区域为第二层区域(12 km 分辨率),雷达径向风资料同化区域为第三层区域(4 km 分辨率)并经过稀疏化处理,在 17 日 00 UTC 正式进行预报。表 1 给出了循环同化次数试验方案设置,试验目的是探究 GSI-SC 系统的循环同化次数对暴雨时段、落区预报的影响,共设计了 4 个同化模拟试验,Noda 试验不做资料同化,直接由 ERA 再分析资料动力降尺度生成初始场;Cyc06、Cyc03 和 Cyc01 试验则进行常规观测资料同化,但循环次数不同,分别进行逐 6 h、逐 3 h 和逐 1 h 循环同化。

表 2 为 GSI-SC 同化资料类型试验方案设置,试验目的是探究同化多普勒雷达径向风资料对飚线对流系统及强降水预报效果的影响。由于雷达径向风资料具有高时空分辨率特征,故本组试验的循环同化次数与表 1 中试验 Cyc01 相同,即逐 1 h 循环同化方案,每次雷达资料同化均输入了 28 部多普勒雷达径向风数据,每部雷达资料有效半径为 230 km。共设置了 3 个试验方案,Vel 试验仅同化雷达径向风资料,Cyc01 试验仅同化常规资料,Cyc01+Vel 则同时同化了雷达径向风和常规资料。需要指出的是,表 1 的 4 组试验和表 2 的 3 组试验的所需

要的侧边界条件输入间隔时间均为 6 h。

在评估模式模拟的雷达反射率与相对湿度预报技巧时,使用模拟结果与观测资料的均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)来分析模拟试验的预报效果。均方根误差又称为标准偏差,定义如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中, N 表示观测总量, x_i 为某一观测值, μ 为其平均值。降水预报评估方法采用二分类检验方法,重点分析 1 h 降水预报及 24 h 累计降水预报技巧。

2 试验结果分析

2.1 试验个例简介

2016 年 4 月 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC, 华南地区发生了一次较大范围的飚线强降水过程,图 2 是本次过程的 6 h 累计降水量实况图。由图可见,强降水主要发生在广东北部、湖南南部、江西西南部,以及福建西南部的大范围地区。本次过程雨带呈东北—西南走向,其中广东、湖南、江西三省交界处降水最为集中,部分地区 6 h 累计降水量达到了 60 mm 以上。从降水发生的时间来看,强降水主要集中在 4 月 17 日 06—18 UTC 的 12 h 内,在 06 UTC 降水量开始增加,至 12 UTC 左右达到最大,降水区域带状分布特征明显,强度也明显增大。

由图 3 可见,2016 年 4 月 17 日 12 UTC 的 500 hPa 的形势场在东亚地区呈现“两脊一槽”的形势,其中高脊位于蒙古高原以西 80°E 和鄂霍次克海域附近,低槽位于中国东部。华南地区受到槽前西南气流控制,西太平洋副热带高压(以下简称副高)呈西伸的带状,中心位于台湾以东、日本海以南洋面上,这标志着进入 4 月中下旬,华南夏季的雨季逐渐开始。850 hPa 形势场显示(图略)华南地区存在明显低空风切变线,同时对流层中低层低涡和地面低压倒槽辐合区为暴雨的发生提供了良好的动力抬升条件。副高西北侧存在一支来自南海的西南暖湿气流,为本次强对流过程提供了充足的水汽条件。

下面将评估各组试验的雷达回波组合反射率、飚线沿线垂直速度剖面图、相对湿度、短期降水(17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC)和短时降水(17 日 06—18 UTC)的预报效果,从而探究快速循环同化

表 1 GSI-SC 循环同化次数试验方案设置

Table 1 Details of the cycle times experiments of GSI-SC

试验名称	同化资料	同化时间节点
Noda	无	仅以 4 月 16 日 12 UTC ERA 资料作为初始场,预报 24 h
Cyc06	常规观测(地面站、探空、飞机报和浮标站)	在 16 日 12 UTC、18 UTC 和 17 日 00 UTC 循环同化(共 3 次),预报 24 h
Cyc03	常规观测(资料同上)	在 16 日 12 UTC 至 17 日 00 UTC 每 3 h 循环同化(共 5 次),预报 24 h
Cyc01	常规观测(资料同上)	在 16 日 12 UTC 至 17 日 00 UTC 每小时循环同化(共 13 次),预报 24 h

表 2 GSI-SC 同化资料类型方案设置

Table 2 Details of assimilation data type experiments of GSI-SC

试验名称	同化资料	同化时间节点
Vel	仅雷达径向风资料	同 Cyc01 试验
Cyc01	仅常规观测	同 Cyc01 试验
Cyc01+Vel	雷达径向风资料,常规观测	同 Cyc01 试验

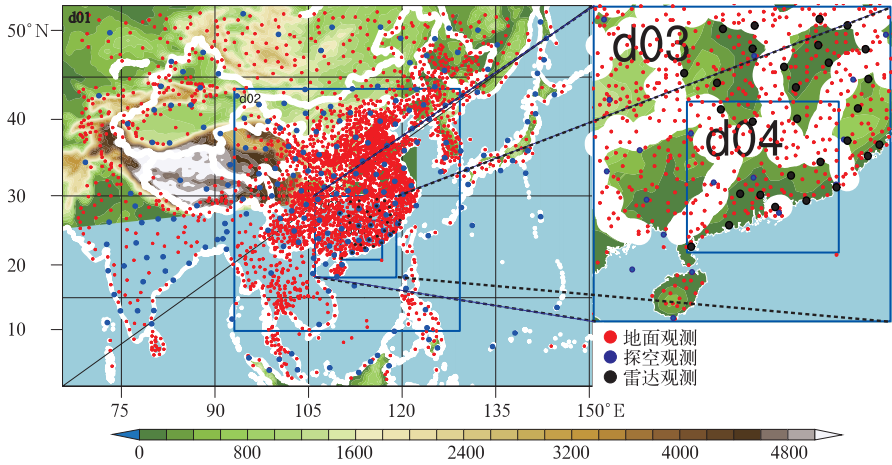


图 1 模式模拟区域设置及观测资料分布情况
(图中填色为陆面高度,单位:m)

Fig. 1 The Model simulation domains and observation stations
(The shaded area is altitude, unit: m)

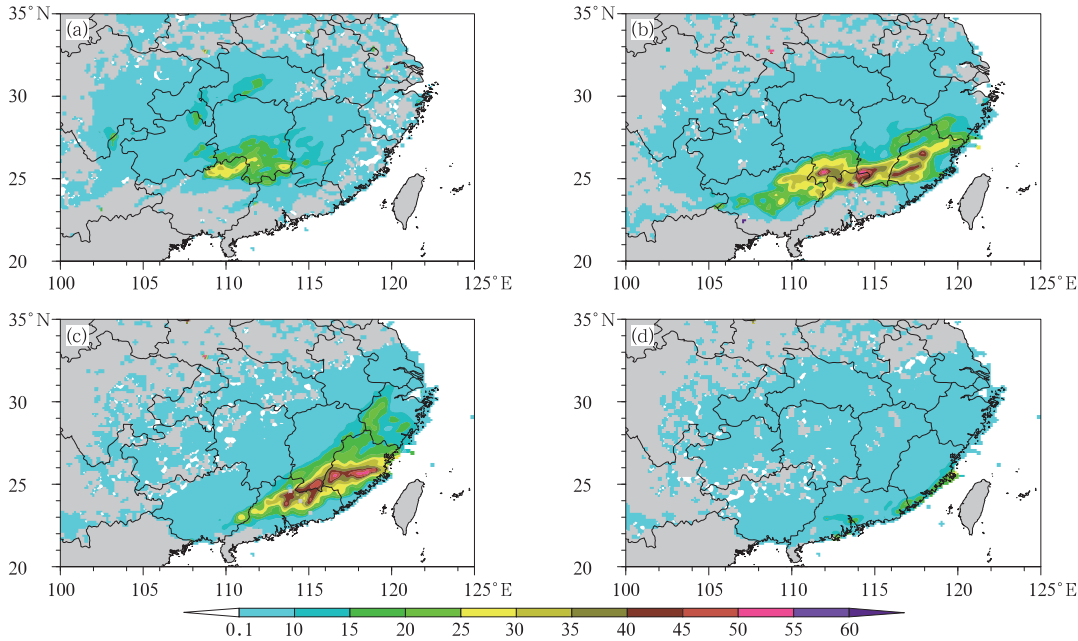


图 2 2016 年 4 月 17 日 00—06 UTC(a),06—12 UTC(b),12—18 UTC(c)和
17 日 18 UTC 至 18 日 00 UTC(d)逐 6 h 累计降水量(单位:mm)

Fig. 2 The 6 h accumulated precipitation (a) from 00 UTC to 06 UTC, (b) from 06 UTC to 12 UTC,
(c) from 12 UTC to 18 UTC, (d) from 18 UTC 17 to 00 UTC 18 April 2016 (unit: mm)

雷达径向风资料对模式预报效果的改善情况。

2.2 雷达回波组合反射率预报对比

图 4 是各组同化试验与 Noda 试验 4 月 17 日 10—14 UTC 逐小时雷达反射率预报均方根误差 (RMSE) 的差值。图 4 显示,各组试验比不同化任何资料的 Noda 试验的预报效果都有不同程度的改

进,但是仅仅同化径向风资料试验(Vel-Noda)在飑线最强时段内改进效果有限,雷达组合反射率均方根误差改进均没有超过 2 dBz。只进行常规资料同化的各组试验(Cyc06,Cyc03,Cyc01)虽然随着同化次数的增加均方根误差得到了一定改进,但也出现了与试验 Vel 一样的情况,即均方根误差改进程度不明显。然而,当常规资料与雷达径向风资料同时

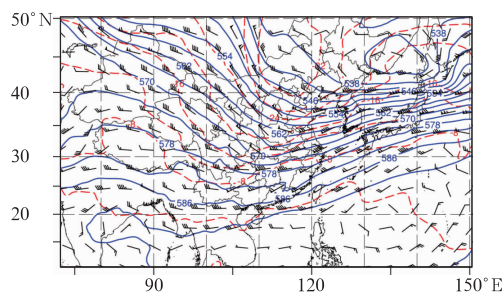


图3 2016年4月17日12 UTC 高空
500 hPa 等压面天气形势图

(蓝色等值线:位势高度,单位: dagpm;
红色虚线:温度,单位: °C;风羽:风场)

Fig. 3 The 500 hPa synoptic situation
at 12 UTC 17 April 2016

(blue lines: potential height, unit: dagpm; red dashed
lines: temperature, unit: °C; black barb: wind field)

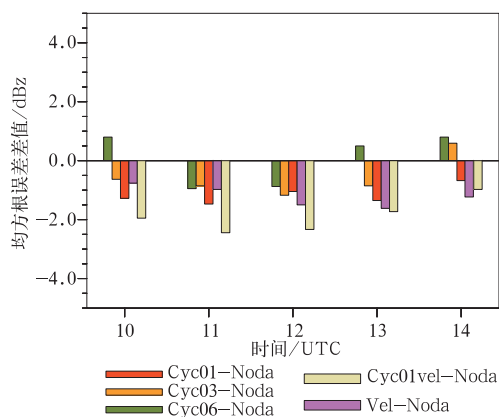


图4 各组同化试验与 Noda 试验 2016 年
4 月 17 日 10—14 UTC 逐小时雷达反射率
预报均方根误差的差值

Fig. 4 The difference of hourly radar
composite reflectivity RMSE of forecasts
between all tests and Noda test from
10 UTC to 14 UTC 17 April 2016

进行快速循环同化时(Cyc01+Vel),雷达组合反射率均方根误差得到较大程度改善,其中12 UTC 均方根误差比试验 Noda 减少了将近 3 dBz。这可能和同化资料类型不再单一,初始场中尺度信息局限性得到改善有关。但在12—14 UTC 混合循环同化试验 Cyc01+Vel 对预报均方根误差改进的效果明显降低,且降低幅度也明显比其他试验大。由此可见,多种资料循环同化对模式初始场进行了较大的调整,0~12 h 的雷达反射率预报均方根误差有较明显的改善,但随着预报时间增加,预报均方根误差改进效果则迅速降低,表明 GSI-SC 循环同化系统对

预报的改进主要体现在 0~12 h 的短时临近预报中。

选取逐小时降水量最大的 4 月 17 日 11—13 UTC 雷达回波组合反射率预报,对比分析各个试验模拟结果。首先从组合反射率实况(图 5a, 5b, 5c)可以看出,从 4 月 17 日 11 UTC 开始,江西赣州附近出现了一个反射率超过 50 dBz 的强对流单体,其东南方向福建漳州也存在一个较弱的对流单体,共同构成了本次过程回波东部主体部分。本次过程中整个飑线沿西北—东南方向移动,经过广东北部地区时开始加强,强回波的主体区域在江西、福建南部逐渐形成,并且在其西南方向有明显的带状回波区,而雷达回波强度较大的时间段为 11—13 UTC,而降水量则在 12 UTC 达到最强。

对比表 1 和表 2 共计 7 个试验结果发现,在 2016 年 4 月 17 日 10 UTC,7 个试验的雷达组合反射率预报相比较实况均偏强,偏大最明显的区域位于广东省北部地区,但 Vel 和 Cyc01+Vel 试验的雷达组合反射率预报偏强的程度明显小于其他 5 个试验,与实况更加接近(图略)。图 5 是 2016 年 4 月 17 日 11—13 UTC 实况观测的雷达组合反射率和 Cyc01、Cyc01+Vel 模拟结果对比。从图 5d, 5e, 5f 可见,试验 Cyc01 已经能够较好地模拟 17 日 11 UTC 出现在福建地区的强雷达回波区,对比图 5g, 5h, 5i 可知不仅同化了常规资料,还同化了雷达径向风资料的试验 Cyc01+Vel 通过逐小时循环同化,福建地区雷达组合反射率模拟结果与实况更加接近。在雷达回波最强的 11—13 UTC 时段内,尽管试验 Cyc01+Vel 对飑线尾部回波强度略强于实况,但对飑线西南部的回波模拟较其他试验(图 5d, 5e, 5f)更加接近飑线的线状特征,而反观试验 Cyc01 模拟的飑线整体形态出现一定程度的扭曲。

图 6 是 4 月 17 日 12 UTC 预报的飑线(图 5b, 5e, 5h 直线所示)雷达反射率和垂直速度垂直剖面图。通过对比分析 12 UTC 沿飑线方向的试验 Cyc01 与试验 Cyc01+Vel 模拟的垂直速度与雷达反射率回波截面分布图 6a 和 6b,没有同化雷达径向风的 Cyc01 模拟的飑线的垂直速度明显弱于 Cyc01+Vel 试验,通过加入径向风资料(图 6b),飑线内上升气流明显增强,雷达回波反射率也更加明显,漏报情况得到了一定改善。

2.3 区域相对湿度对比分析

图 7 为各组同化试验与 Noda 试验 4 月 17 日

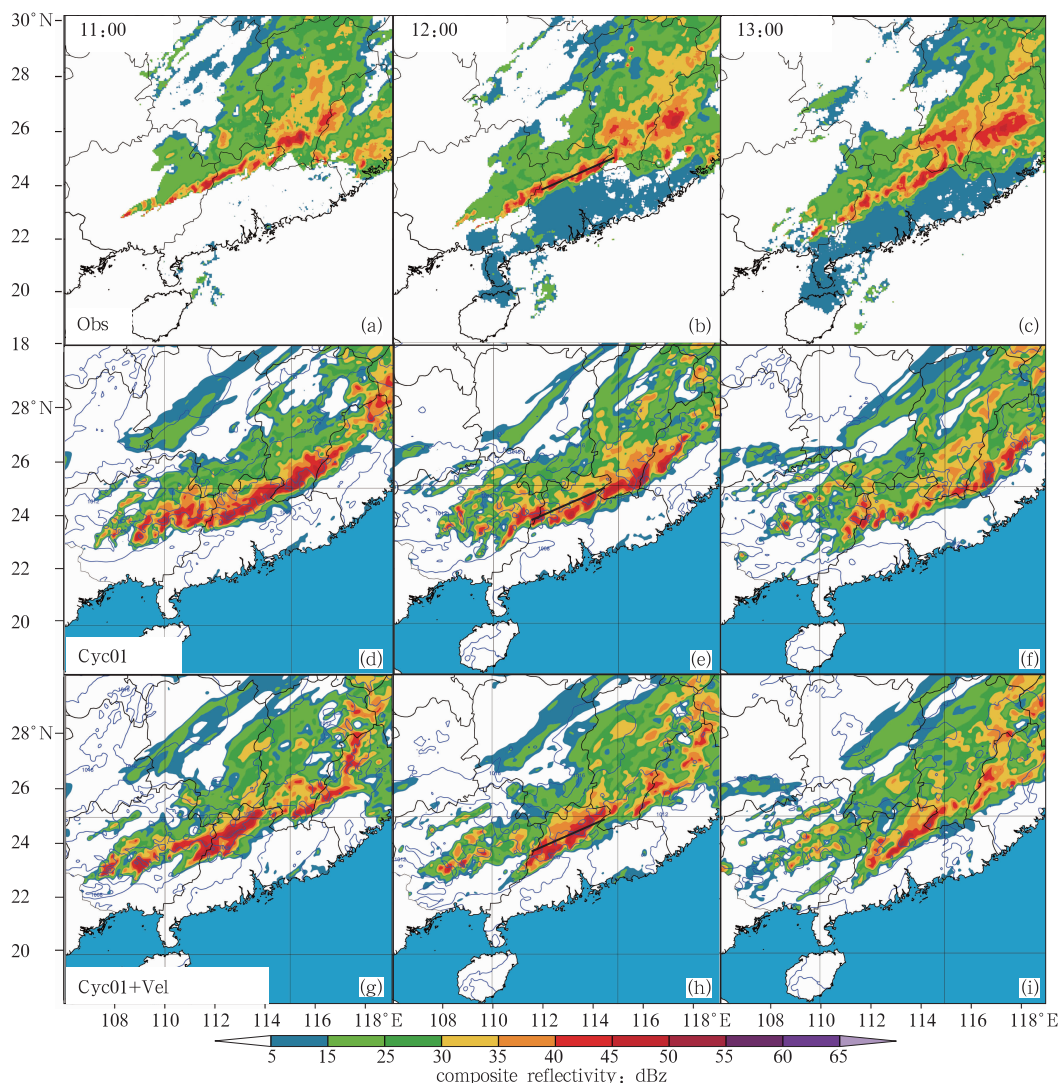


图5 2016年4月17日11 UTC (a, d, g), 12 UTC (b, e, h), 13 UTC (c, f, i)观测
和模拟组合反射率(单位: dBz)

(a, b, c) 实况, (d, e, f) Cyc01, (g, h, i) Cyc01+Vel

Fig. 5 Hourly radar composite reflectivity of observations and simulation
of some experiments at 11 UTC (a, d, g), 12 UTC (b, e, h),
13 UTC (c, f, i) 17 April 2016
(a, b, c) observation, (d, e, f) Cyc01, (g, h, i) Cyc01+Vel

00 UTC至18日00 UTC。中低层1000~500 hPa和中高层是指500~200 hPa相对湿度预报均方根误差的差值。在预报后期由于资料同化的初始场经过较长时间积分后,其动力热力约束条件与侧边界场产生了较大偏差,所以各组试验预报均方根误差都比试验Noda有所增加,说明滚动预报不可以持续太长时间,需要适当设定冷启动节点以更新侧边界条件。由1000~500 hPa中低层情况(图7a)可知,各组循环同化试验都对预报时段内前12 h的均

方根误差降低有积极贡献。试验Cyc01在17日00 UTC相对湿度均方根误差改进较大,减少了5%为第一组试验中最突出的,但当天气系统发展至最强即17日12 UTC,对相对湿度预报误差的改进却小于同组试验Cyc03,且在18日00 UTC预报结果的均方根误差有较大增加。循环同化径向风资料后,试验Cyc01+Vel相对于试验Cyc01尽管在17日00 UTC对均方根误差的改进不如试验Cyc01,但是在17日12 UTC的相对湿度预报均方根误差

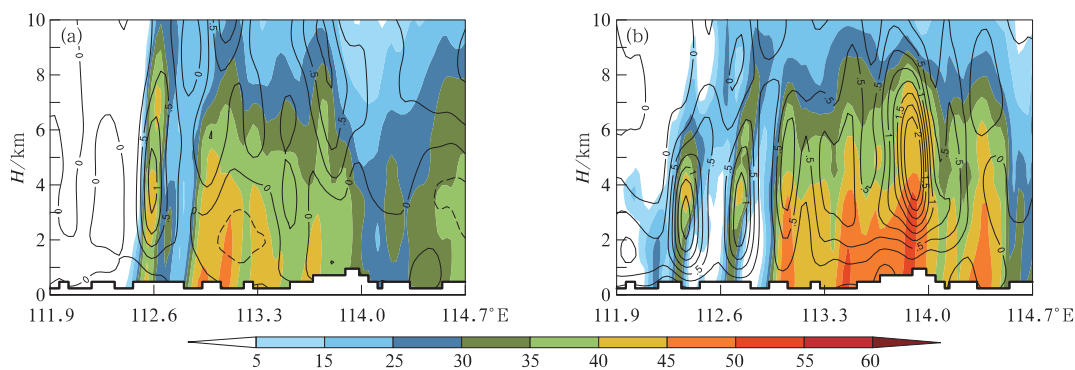


图 6 2016 年 4 月 17 日 12 UTC 模拟试验沿飑线雷达反射率与垂直速度剖面图

(填色为雷达反射率,单位: dBz;等值线:垂直速度 $>0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a)Cyc01, (b)Cyc01+Vel

Fig. 6 Cross-section plots of vertical velocity (line, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and radar reflectivity (shaded, unit: dBz) at 12 UTC 17 April 2016

(a) Cyc01, (b) Cyc01+Vel

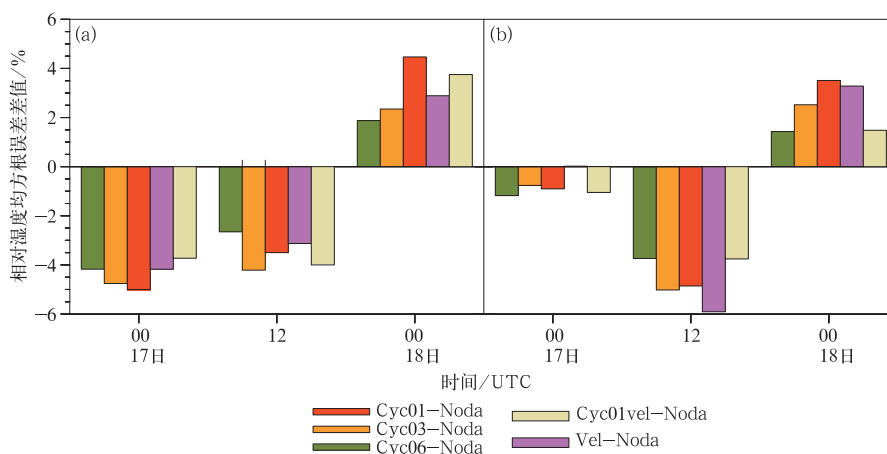


图 7 各组同化试验与 Noda 试验 2016 年 4 月 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC

相对湿度预报均方根误差的差值

(a)1000~500 hPa, (b)500~200 hPa

Fig. 7 The differences of relative humidity RMSE (unit: %) of forecasts between all tests and Noda test from 00 UTC 17 to 00 UTC 18 April 2016

(a) 1000—500 hPa, (b) 500—200 hPa

明显小于试验 Cyc01,且在 18 日 00 UTC 的均方根误差增加程度也有所降低。从 500~200 hPa 的中高层相对湿度均方根误差的差值分布(图 7b)可以看出,在 17 日 00 UTC 该区域内相对湿度预报误差的差异并不明显,这是因为在 17 日 00 UTC 相对湿度大值区主要集中在中低层,而天气系统还未发展到中高层区域,所以此时中高层相对湿度数值较小。在 17 日 12 UTC 飑线天气系统发展至成熟期,中高层区域内相对湿度增大,同时均方根误差的差异也出现了较大波动,试验 Vel 相对湿度均方根误差降

低达 6%,主要由于径向风资料的同化有效加强了该时刻中低层的垂直抬升速度(图 6b),让低层的水汽更容易输送到中高层改善了中高层的相对湿度分布。而在预报时段后 12 h 内,循环同化常规资料与径向风资料的试验 Cyc01+Vel 也有效地抑制了预报均方根误差的增加。总的来说尽管径向风资料同化对中高层相对湿度预报的均方根误差改进效果不如中高层明显,但是多次循环且同时同化了常规资料和径向风资料丰富了中高层相对湿度分布的中小尺度信息使其更接近实况。

2.4 降水预报效果对比

首先分析本次过程日降水量预报,大致了解各组试验的预报效果。采用二分类检验方法(ETS/FAR)分析各组试验的 24 h 累计降水预报。图 8a 给出了各组试验 24 h 累计降水预报的 ETS 评分,图 8b 给出了对应的 FAR 评分。进行资料同化的 5 组试验在各个降水量级上均优于不同化任何观测资料的试验 Noda, ETS 评分提高大致在 0.1 左右。在 25~50 和 50~100 mm 评分中,试验 Cyc01+Vel 是 6 组试验中预报效果最好的,ETS 评分分别为 0.37 和 0.45。试验 Vel 在 25 mm 以下量级预报评分结果最优,评分高达 0.7 以上,但是在其余量级的预报评分中预报评分均不理想在 0.2 分左右徘徊,甚至在 100 mm 以上缺少评分,说明同化径向风资料使模式降水量缩减过度。这是由于只同化径向风资料的初始场中各要素无法充分得到调节,无法配合形成较强的降水过程。对比循环同化次数依次增加的几组试验(Cyc06, Cyc03, Cyc01) ETS 评分尽管在 25~50 mm 区间的评分增加趋势较弱,但是在 0~25 和 50~100 mm 区间内随同化次数增加而增加的趋势明显,其中试验 Cyc01 在 50~100 mm 区间的大暴雨预报评分表现最为明显,ETS 评分达到 0.4 以上,仅次于试验 Cyc01+Vel。对比各组试验 FAR 评分可知,试验 Noda 的降水虚报问题最严重。对于 25 mm 以上降水,试验 Cyc01 和试验 Cyc01+Vel 表现较好,同时加入径向风资料同化后的试验 Cyc01+Vel 评分好于只循环同化常规资料的各组试验。总的来说尽管同化径向风资料对于降

水总量有一定减弱效应,但是同时同化了雷达径向风和常规资料的快速循环同化方案有效提高了大雨以上量级的 ETS 评分,同时有效降低了虚假降水预报的发生几率。

进一步从 24 h 累计观测降水量(图 9a)的分布中可以发现,雨带主要呈西南—东北走向,其中大值区沿 25°N 纬向分布。湖南南部向东至福建中部的地区日降雨量达到暴雨量级,局部地区出现大暴雨。

尽管各组试验都预报出本次过程雨区的大致走向和位置,然而各组试验模拟 24 h 累计降水结果存在明显差异。试验 Noda 以及试验 Cyc06(图略)整体预报的雨区范围过大,暴雨落区也较实况明显偏大,且在湖南西南部地区出现了严重虚报,雨带与实况偏差较大。对比之后两张图可以看出,试验 Cyc01 与试验 Cyc01+Vel 都明显减少了湖南西南部的虚报现象,但是对于 50 mm 以上的降水落区预报,多次同化且同化多种资料的试验 Cyc01+Vel 更加接近实况的雨带纬向分布特征。总体而言常规观测资料和雷达径向风资料的快速循环同化对于本次强降水过程 24 h 累计降水预报有改善作用,明显减少了模式大雨以上量级的虚报且使得雨带分布更接近实况。

为了分析循环同化技术对于短时临近时刻的预报能力,下面结合自动站逐小时降水观测资料,对比分析各组试验中逐小时降水的预报结果。图 10 和图 11 分别是第一部分试验(Cyc06, Cyc03, Cyc01)和第二部分试验(Cyc01, Vel, Cyc01+Vel)逐小时降水预报与实况的区域平均及区域最大值(图 8 黑框所示区域)对比折线图。由图 10a 观测逐小时区

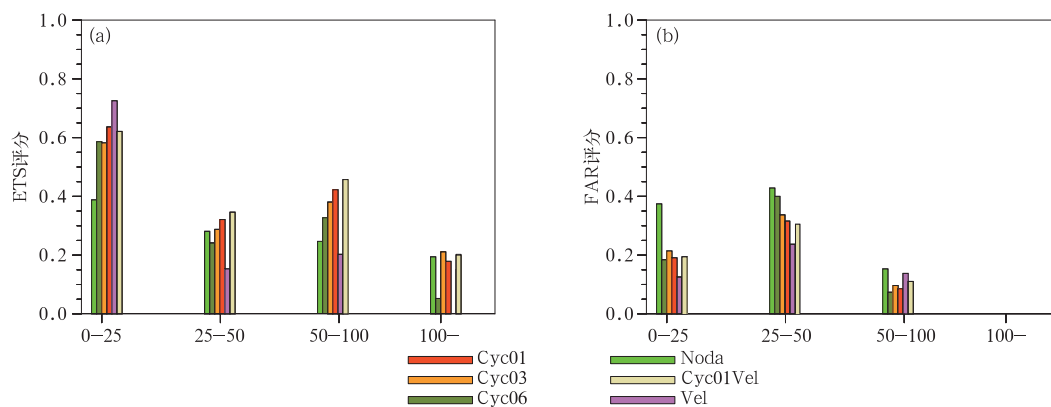


图 8 2016 年 4 月 17 日 00 UTC 至 22 日 00 UTC 各组试验 24 h 累计降水预报的 ETS 评分(a)和 FAR(b)

Fig. 8 The 24 h accumulated precipitation ETS point (a) and FAR point (b)

from 00 UTC 17 to 00 UTC 22 April 2016

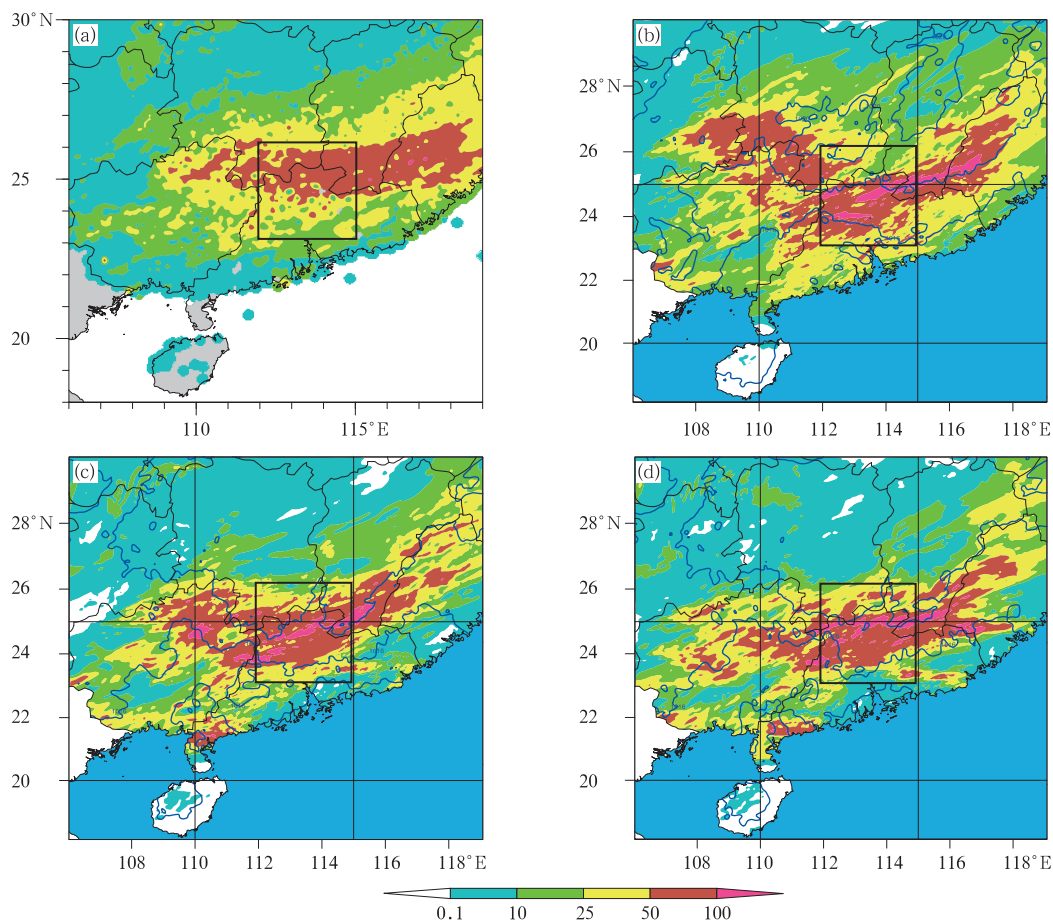


图 9 2016 年 4 月 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC 24 h 累计降水观测值(a)和模拟值:(b) Noda, (c) Cyc01, (d) Cyc01+Vel (单位:mm)
(黑色方框区域为图 10、图 11 计算区域)

Fig. 9 The 24 h accumulated precipitation from 00 UTC 17 to 00 UTC 18 April 2016 (unit; mm)

(a) observation, (b) Noda, (c) Cyc01, (d) Cyc01+Vel

(unit; $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$, the black block is the calculated area in Fig. 10 and Fig. 11)

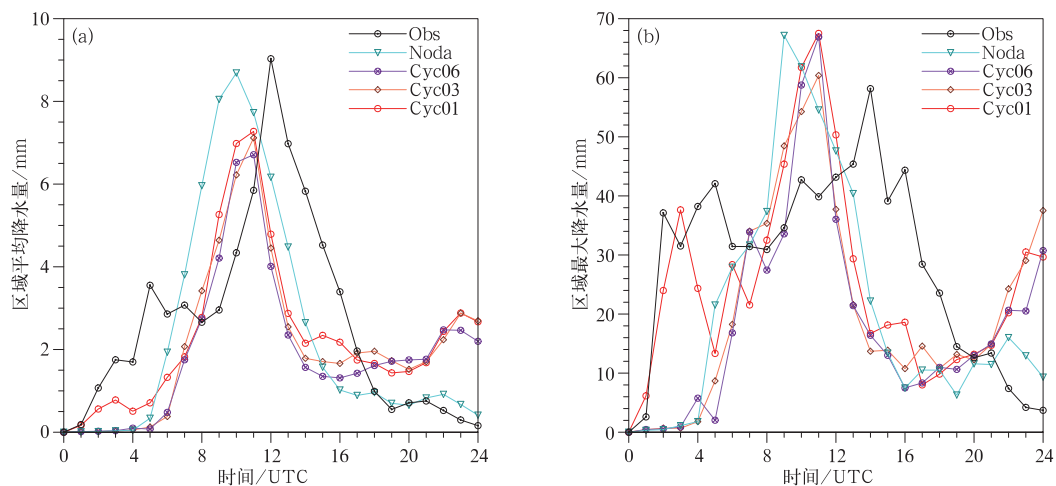


图 10 2016 年 4 月 17 日试验 Cyc06, Cyc03, Cyc01, Noda 逐小时降水预报与实况的区域平均(a)和最大值(b)

Fig. 10 The regional average hourly precipitations (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) forecasted by Cyc06, Cyc03, Cyc01, Noda and observation (a), and the regional max precipitation (b) (unit: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$) on 17 April 2016

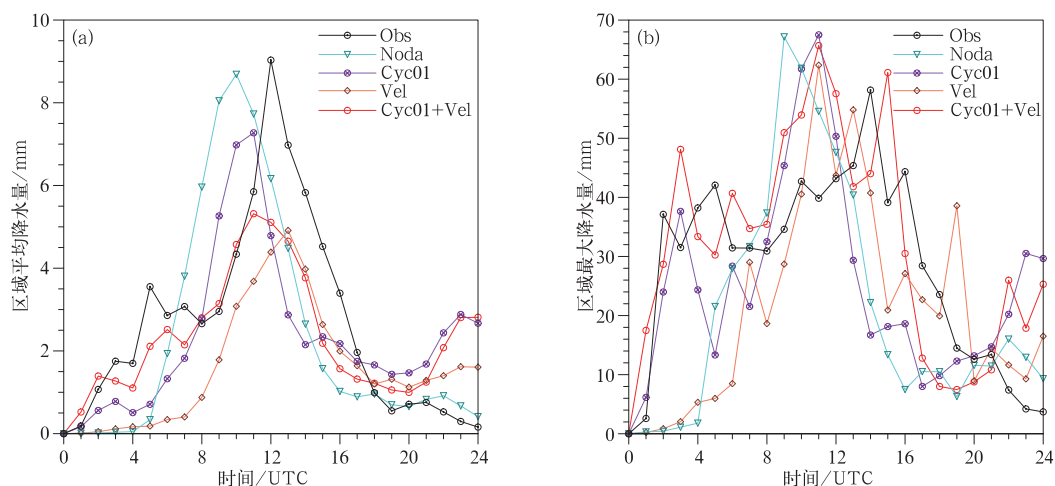


图 11 同图 10, 但为不同试验: Cyc01, Vel, Cyc01+Vel

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for different experiments: Cyc01, Vel, Cyc01+Vel

域平均降水量变化曲线(黑色)可以看出,本次过程出现了两次降水峰值。较小的第一次峰值出现在 17 日 05 UTC,较大的第二次峰值出现在 17 日 12 UTC,其降水峰值分别为 3.7 和 $9 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。随后小时降水量逐渐下降,这与图 2 中 6 h 累积降水的分布情况基本一致。

如图 10a 所示,第一部分的试验中强降水出现的时间节点与实况存在着明显的差异,前后相差在 4 h 以内,而其中试验 Cyc01 的降水起始时间与实况最接近。试验 Noda 的区域平均雨量最大值和发生时间与实况存在明显差异。虽然经过资料同化后的试验,平均雨量最大值均有不同程度的衰减,但是区域平均降水的第二次峰值出现时间都更加接近实况了。通过分析不同试验预报降水起始时间,发现随着循环同化次数的增加,模式预报降水起始时间在逐渐接近实况,尤其是试验 Cyc01(红色曲线)在 0~12 h 的短时临近时段内预报降水几乎是与实况观测同时出现。

由图 10b 所示,在各组试验对逐小时区域最大降水量的两次峰值预报结果中,第二次降水峰值各组试验均能成功预报,极大值偏大约 5 mm。但就最大值出现时间而言,4 组试验都出现了不同程度的偏早,其中试验 Noda 最大值出现提前了 7 h 左右,极值偏大也最明显。对比 Cyc06, Cyc03, Cyc01 三组试验发现试验 Cyc01 在 12 UTC 降水量预报结果与实况更为接近。

将第一组最优试验 Cyc01 与同化径向风后的试验做对比。由图 11a 可知,从区域平均降水量可

以看出,同化雷达径向风资料对于模拟强降水预报的起止时间均有明显纠正效果。将同时循环同化常规资料和雷达径向风资料的试验 Cyc01+Vel(红线)与只循环同化常规资料的试验 Cyc01(紫线)进行对比可以发现,尽管前者极大值有所减小,但是强降水起始时间及整个降水过程的演变特征则明显更接近实况(黑线),尤其是第二次降水峰值的预报提前时间由试验 Cyc01 的 4 h 左右缩短至试验 Cyc01+Vel 的 2 h 以内。结合图 6 对比分析两次试验 12 UTC 飑线沿线垂直速度分布可知,在同时进行雷达径向风资料和常规资料循环同化时,试验 Cyc01+Vel 的垂直速度得到了很好的增强,改善了试验 Cyc01 由于垂直速度较低,上升气流不足以支撑大量水凝物停留在强对流云系中,导致了降水峰值提前到来的情况。区域最大降水量变化曲线(图 11b)也反映出相似结果,且在 0~12 h 内表现得最为明显,尤其在 05 UTC 第一次峰值预报中,试验 Cyc01+Vel 显著地修正了试验 Cyc01 中预报结果比实况偏小的问题。

3 结论及讨论

本文采用欧洲中心再分析资料 ERA、常规气象观测资料以及华南地区 28 部多普勒雷达径向风资料,利用 GSI 同化系统及 WRF 模式,建立华南地区的 GSI-SC 快速循环同化系统,针对 2016 年 4 月 17 日 00 UTC 至 18 日 00 UTC 发生在我国华南地区的飑线强降水个例进行了模拟分析,设计了不同试

验,对模式快速循环同化多个方案在雷达组合反射率、区域内相对湿度、日降水变化、逐小时降水变化等方面的模拟预报效果进行了对比分析,获得结论如下:

(1) 利用 GSI 同化系统及 WRF 模式建立华南地区的 GSI-SC 快速循环同化系统,可以较好地同化常规资料和雷达资料,多种资料循环同化对模式初始场进行了较大的调整,尽管随着预报时间增加,预报改进效果有所降低,但是 0~12 h 的雷达反射率预报效果有明显改善,说明 GSI-SC 循环同化方案对预报的改进主要体现在 0~12 h 的短时临近预报中。

(2) 径向风资料同化对中低层相对湿度预报改进效果不如中高层明显,但多次循环且同时同化了常规资料和径向风资料使得相对湿度预报结果更接近实况,在预报后期预报均方根误差的增加也得到了抑制。

(3) 区域平均逐小时降水量预报效果总体好于降水极值预报效果。循环同化常规资料及雷达径向风资料后降水过程的起止时间都表现出了更好的预报效果。此外,常规资料的快速循环同化对于降水峰值的预报也有一定的改进。

(4) 在常规资料快速循环同化的基础上加入雷达径向风资料,可以显著增强爬线内的垂直上升速度,使得模式降水峰值提前出现的情况得到有效缓解。

从这次个例模拟可见,GSI 同化系统与 WRF 数值模式有良好的匹配性。通过 GSI 系统快速循环同化常规资料与雷达径向风资料,使得此次模拟过程在降水发生时间、降水强度、日降水评分等方面得到了改善,有助于预报员更准确制定预报方案。此外,模拟结果同时表明,循环同化后模式输出的雷达组合反射率与实况更加接近,对判断强对流天气的发生有一定的指导作用。未来需要进一步分析不同的降水过程,并希望在同化系统云分析过程中引入雷达反射率及卫星资料,以期改善降水预报偏弱的情况。

参考文献

- 陈葆德,王晓峰,李泓,等,2013.快速更新同化预报的关键技术综述[J].气象科技进展,3(2):29-35.
- 陈炳洪,吴乃康,2015.区域模式技术研发与应用[C].2015 年华南区

域暨粤港澳数值天气预报技术交流会.

- 陈博宇,代刊,郭云谦,2015.2013 年汛期 ECMWF 集合统计量产品的降水预报检验与分析[J].暴雨灾害,34(1):64-73.
- 陈子通,黄燕燕,万齐林,等,2010.快速更新循环同化预报系统的汛期试验与分析[J].热带气象学报,26(1):49-54.
- 范水勇,陈敏,仲跻芹,等,2009.北京地区高分辨率快速循环同化预报系统性能检验和评估[J].暴雨灾害,28(2):119-125.
- 傅娜,陈葆德,谭燕,等,2013.基于快速更新同化的滞后短时集合预报试验及检验[J].气象,39(10):1247-1256.
- 鹿世瑾,1990.华南气候[M].北京:气象出版社,67-80.
- 马红云,郭品文,宋杰,2009.耦合不同陆面方案的 WRF 模式对 2007 年 7 月江淮强降水过程的模拟[J].大气科学,33(3):557-565.
- 沈菲菲,闵锦忠,2016. Hybrid ETKF-3DVAR 方法同化多普勒雷达速度观测资料 I:模式资料试验[J].大气科学学报,39(1):81-89.
- 涂长望,黄土松,1944.中国夏季风之进退[J].气象学报,18(1):1-20.
- 王东海,夏茹娣,刘英,2011.2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比分析[J].气象学报,69(1):137-148.
- 徐桂玉,杨修群,2002.我国南方暴雨一些气候特征的统计分析[J].气候与环境研究,7(4):447-456.
- 徐同,李佳,王晓峰,等,2011.2010 年汛期华东区域中尺度数值模式预报效果检验[J].大气科学研究与应用,02:10-23.
- 徐枝芳,龚建东,李泽椿,2009.复杂地形下地面观测资料同化 III.两种解决模式地形与观测站地形高度差异方法的对比分析[J].大气科学,33(6):1138-1147.
- 袁媛,任福民,王艳姣,等,2012.2012 年华南前汛期降水特征及环流异常分析[J].气象,38(10):1247-1254.
- 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.
- 张宏芳,潘留杰,2014. ECMWF、日本高分辨率模式降水预报能力对比分析[J].气象,40(4):425-432.
- 赵玉春,王叶红,2009.近 30 年华南前汛期暴雨研究概述[J].暴雨灾害,28(3):194-228.
- Hong S Y, Lim J, 2006. The WRF Single-Moment 6-Class Microphysics Scheme(WSM6)[J]. J Korean Meteor Soc, 42(2):129-151.
- Huang X Y, Peter L, 1993. Diabatic Digital-Filtering Initialization: Application to the HIRLAM Model[J]. Mon Wea Rev, 121: 589-603.
- Kleist D T, Parrish D F, Derber J C, et al, 2009. Introduction of the GSI into the NCEP Global Data Assimilation System[J]. Wea Forecasting, 24(6):1691-1705.
- Peter L, Huang X Y, 1992. Initialization of the HIRLAM Model Using a Digital Filter[J]. Mon Wea Rev, 120:1019-1034.
- Stanley G B, 2004. An Hourly Assimilation-forecast cycle: The RUC [J]. MonWea Rev, 132:495-518.
- Steve W, 2007. Radar reflectivity-based initialization of precipitation systems using a diabatic digital filter within the rapid update cycle[C]. 18th Conf Num Wea Pred, Park City.