

# 不同控制变量方案对广州暴雨过程 雷达资料同化和预报的影响\*

庞盈<sup>1,2</sup>, 陈生<sup>3</sup>, 胡俊俊<sup>4,5</sup>, 陈海琴<sup>6</sup>, 黄朝盈<sup>1,2</sup>

1. 中山大学大气科学学院 / 广东省气候变化与自然灾害研究重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082
3. 中国科学院西北生态环境资源研究院甘肃省遥感重点实验室, 甘肃 兰州 730000
4. 中国科学院西北生态环境资源研究院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 甘肃 兰州 730000
5. 中国科学院西北生态环境资源研究院那曲高寒气候环境观测研究站, 西藏 那曲 852000
6. 中国航空工业集团雷华电子技术研究所, 江苏 无锡 214063

**摘要:** 为了探讨 WRFDA 同化系统中不同控制变量方案(CV5, CV6 和 CV7)所构建的背景误差协方差对雷达资料同化的影响, 本文以 2017 年 5 月 7 日发生在广州的一次暖区暴雨为研究个例, 开展了不同控制变量方案的单点观测同化试验和雷达同化试验(Exp-CV5, Exp-CV6 和 Exp-CV7), 并对同化试验结果进行诊断分析。单点试验和单次雷达资料同化试验的分析结果表明, Exp-CV6 对湿度场的影响最大且在大气中层的比湿均方根误差最小, 而 Exp-CV7 分析增量的影响更集中且梯度更大, 更有利于保留中小尺度信息, 对风场的模拟效果最好。经过 3 h 雷达资料循环同化后, Exp-CV7 可以更准确地模拟出对流系统的结构, 并对本次暖区暴雨雨带与强降水中心位置的预报效果最佳, 其次是 Exp-CV6。这主要是因为 CV7 方案对动力场的调整更有利于局地对流的发展, 而 CV6 方案对湿度场的调整较 CV5 方案更有优势。

**关键词:** 控制变量; 背景误差协方差; 雷达资料同化

**中图分类号:** P456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)03-0035-12

## Effects of different control variable schemes on radar data assimilation and forecast of a rainfall event in Guangzhou

PANG Ying<sup>1,2</sup>, CHEN Sheng<sup>3</sup>, HU Junjun<sup>4,5</sup>, CHEN Haiqin<sup>6</sup>, HUANG Chaoying<sup>1,2</sup>

1. School of Atmospheric Sciences / Guangdong Province Key Laboratory for Climate Change and Natural Disaster Studies, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Laboratory of Ocean Science and Engineering (Zhuhai), Zhuhai 519082, China
3. Key Laboratory of Remote Sensing of Gansu Province, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
4. Key laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China
5. Nagqu Station of Plateau Climate and Environment, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Nagqu 852000, China
6. AVIC Leihua Electronic Technology Institute, Wuxi 214063, China

\* 收稿日期: 2022-07-18 录用日期: 2022-09-14 网络首发日期: 2023-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41875182); 广州科技局计划项目(201904010162);

广西重点研发项目(2021AB40108, 2021AB40137)

作者简介: 庞盈(1997年生), 女; 研究方向: 多源观测资料同化; E-mail: pangy6@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 陈生(1979年生), 男; 研究方向: 多源观测资料同化、强对流天气短临预报; E-mail: chensheng@nieer.ac.cn

**Abstract:** To explore the influence of background error covariance constructed by different control variable schemes (CV5, CV6, and CV7) on radar data assimilation in the WRFDA assimilation system, a warm-sector torrential rainfall in Guangzhou on May 7, 2017 was taken as a case study in this paper. The single and radar observation data assimilation (DA) tests (Exp-CV5, Exp-CV6, and Exp-CV7) of three control variable schemes were carried out, and the results of the assimilation tests were diagnosed and analyzed. After the single and one-cycle (or one-time) radar observation DA experiments, it is found that Exp-CV6 has the greatest influence on the humidity field and the least root mean square error of specific humidity in the middle atmosphere. In addition, the influence of Exp-CV7 analysis increments is more concentrated and the gradient of analysis increments is larger, which is more conducive to retaining medium and small-scale information and has the best simulation effect on wind fields. After cyclic radar DA, Exp-CV7 is able to simulate the structure of the convective system more accurately, and the rainfall coverage and heavy precipitation center forecasted by Exp-CV7 align well with the observations. In conclusion, Exp-CV7 produces the best simulation and forecast for this study case, followed by Exp-CV6. This is mainly because the adjustment of a dynamic field by the CV7 scheme is more beneficial to the development of local convection, while the adjustment of the humidity field by the CV6 scheme is more advantageous than that by the CV5 scheme.

**Key words:** control variable; background error covariance; radar data assimilation

近年来,随着数值天气预报(NWP, numerical weather prediction)模式动力框架与物理过程描述的日益完善,以及计算机技术日新月异的更新,NWP模式的预报能力已经取得巨大的进步。但是,由于缺乏完善的初始条件,NWP模式的背景场和侧边界条件中包含的中小尺度信息有限,NWP模式对强对流天气事件的预报有较大不确定性(孙娟珍等,2016)。减小初始状态的误差,提高初值精度,进而更准确地模拟和预报未来天气(尤其是强对流天气)的发展演变,是NWP模式的研究热点和重点问题。资料同化就是一种通过在NWP模式的初始状态中融合各种常规及非常规观测资料,提高其初值精度,进而提高NWP准确性的手段(高士博,2018)。但是,当前真正能提供有效的对流信息,并同化到高时空分辨率NWP模式初始化的观测资料并不多。具有高时空分辨率特征的天气雷达观测资料在监测对流天气过程方面展现出巨大优势,因而引起了国内外学者的普遍重视,并且被广泛应用于各业务同化系统,对于提高NWP模式的预报性能起到了至关重要的作用。

目前常用的雷达资料同化方法包括:变分方法、集合卡尔曼滤波以及变分-集合混合同化方法等。变分资料同化方法中,三维变分(3DVar, three-dimensional variational)同化方法因其计算量小且易于实现,在科研和业务工作中被广泛应用

(Barker et al., 2004)。由NCAR(national center for atmospheric research)开发的WRFDA(weather research and forecasting model data assimilation)3DVar同化系统在雷达资料同化中取得了显著的成效(Maiello et al., 2014; Sun et al., 2013; Wang et al., 2013; Xiao et al., 2005; Xiao et al., 2007)。Xiao et al.(2005)首先在WRFDA 3DVar中构建了雷达径向速度的直接同化模块,后续Xiao et al.(2007)的研究又更新了WRFDA 3DVar对雷达反射率因子的直接同化。然而,直接同化雷达反射率时,非线性的雷达反射率观测算子在线性化过程中引入了较大的误差,特别是当背景场较干时,造成水凝物分析的低估,因此Wang et al.(2013)发展了反射率因子的间接同化方案,通过同化由反射率因子反演的雨水及水汽估计调整模式背景场,有效提高了短时降水预报能力。

除观测算子外,影响雷达资料同化效果的因素还有很多,其中合理的背景误差协方差( $B$ 矩阵, background error covariance matrix)起着关键作用。 $B$ 矩阵反映了变分同化系统背景场的误差结构,可以控制观测信息在模式不同变量之间的传播方式,并在模式变量之间施加动力平衡约束,决定了资料同化过程中观测值订正到模式背景场的程度(马旭林等,2009;夏雪,2016;Bannister,2008)。但由于 $B$ 矩阵是一个超大规模的非对角的对称矩

阵, 在实际应用中不能直接在计算机中进行计算和储存, 因此无法对代价函数进行直接求解。为了解决上述问题, 目前一般使用控制变量转换的方法对  $\mathbf{B}$  矩阵进行简化。以 WRFDA 3DVar 为例, 共有 3 种不同的控制变量方案选项用于构建背景误差协方差, 分别为 CV5、CV6 和 CV7 方案, 其中 CV5 方案为默认选项。Chen et al.(2013) 在 CV5 方案的基础上构建了考虑多元变量相关的控制变量方案(即 CV6 方案), 发现 CV6 方案改进了模式的水汽条件, 提高了降水强度和落区的预报效果。Gao et al.(2020) 的结果表明 CV6 方案比 CV5 方案更适用于海雾模拟。Sun et al.(2016) 在 CV5 方案的基础上提出了以水平风分量为动量控制变量的方案(即 CV7 方案), 研究结果表明采用 CV7 方案同化雷达观测有效地提高了 0~12 h 的降水预报结果; 卢长浩等(2019) 的研究发现与 CV5 方案相比, 采用 CV7 方案的同化试验产生了更合理的热动力结构, 因而更精确地模拟了台风路径、强度和最大风速; Wang et al.(2020) 分别采用 CV5 和 CV7 方案进行了风廓线雷达的同化和预报试验, 结果表明由于 CV7 方案的对流降水预报效果更好。

虽然目前已有部分关于不同控制变量方案对雷达资料同化影响的研究, 但针对中国区域的研究相当有限, 且集中于中高纬度地区(如华中(王叶红等, 2016; Chen et al., 2016)、东北(Li et al., 2016; Wang et al., 2020)、青藏高原(陈耀登等, 2015))。广东省地处低纬度地区, 属于东亚季风区, 其气候特征与中高纬度地区有很大的差异。不同控制变量方案对雷达资料同化在广州地区降水预报的影响, 特别是对局地性强、降水强度大的暖区降水的研究还未有涉足。此外, 已有的研究基本都是探讨两组不同动力控制变量方案(CV5 和 CV7)对雷达资料同化的影响。本文以一次发生在广州的暴雨过程为例, 采用 WRFDA 中 3 种不同控制变量方案(CV5、CV6 和 CV7)进行雷达资料(反射率和径向速度)的循环同化与预报试验, 探讨不同控制变量方案对雷达资料同化在广州地区对流尺度数值预报中的影响。

## 1 方法

### 1.1 雷达观测算子简介

三维变分同化的目标函数定义为(Parrish et al., 1992):

$$J(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2} (\mathbf{y}_o - H(\mathbf{x}))^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{y}_o - H(\mathbf{x})), \quad (1)$$

式中  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{x}_b$  和  $\mathbf{y}_o$  分别为分析变量、背景变量和观测变量;  $\mathbf{B}$  和  $\mathbf{R}$  分别代表背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵;  $H$  是将分析或背景变量从模型空间映射到观测空间的观测算子。

本文的雷达径向风同化采用 Xiao et al.(2005) 中的直接同化方案, 其观测算子为:

$$V_r = u \frac{x - x_i}{r_i} + v \frac{y - y_i}{r_i} + (w - v_T) \frac{z - z_i}{r_i}, \quad (2)$$

其中  $V_r$  是雷达径向风;  $(u, v, w)$  是大气三维风分量;  $(x, y, z)$  是雷达站位置;  $(x_i, y_i, z_i)$  是各雷达库对应位置;  $r_i$  是雷达站与雷达库之间的距离;  $v_T$  是粒子下落末速度, 其计算公式参考 Sun et al.(1997) 的研究:

$$v_T = 5.4a \cdot q_r^{0.125}, \quad (3)$$

其中  $q_r$  是雨水混合比; 校正因子

$$a = \left( \frac{p_0}{\bar{p}} \right)^{0.4}, \quad (4)$$

其中  $p_0$  是地面气压;  $\bar{p}$  是基本气压。

对于雷达反射率同化, 本文采用 Wang et al.(2013) 提出的间接同化方案, 即不是直接同化雷达反射率, 而是同化其反演出的雨水和估计的水汽, 具体的观测算子为:

$$Z = 43.1 + 17.5 \cdot \log_{10}(\rho q_r), \quad (5)$$

其中  $Z$  是雷达反射率;  $\rho$  是空气密度;  $q_r$  是雨水混合比。雷达反射率根据上式反演出相应的雨水作为观测进行同化, 此外, 假设位于云底高度以上的雷达反射率大于某一阈值时(一般默认为 25 dBZ), 则认为云中相对湿度接近饱和, 此时将引入新的观测算子, 用于同化雷达反射率估计的水汽

$$q_v = q_s \cdot rh, \quad (6)$$

其中  $q_s$  和  $rh$  分别是背景场中的饱和水汽和相对湿度。

### 1.2 控制变量方案简介

在实际应用中, 直接求解式(1)是非常困难的, 不仅是因为在模式变量之间存在动力约束关系, 即一个变量的误差会影响到其他变量(物理相关), 而且模式空间格点之间也会相关影响, 即针对特定变量, 任意格点的误差会影响到周围格点(空间相关)(童文雪, 2017)。由于模式变量的物

理相关和空间相关,使得  $\mathbf{B}$  矩阵的维数达到了  $10^7 \times 10^7$ , 结构极其复杂。为了减少计算量,提高计算的稳定性,目前常用 Courtier et al.(1994)提出的增量方法减少计算量,并用控制变量转换的方法对  $\mathbf{B}$  矩阵进行简化,即定义  $\delta\mathbf{x} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_b = \mathbf{U}\mathbf{v}$ , 且要求  $\mathbf{B}$  矩阵满足关系  $\mathbf{B} = \mathbf{U}\mathbf{U}^T$ , 令  $\mathbf{v}$  为控制变量:

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \mathbf{v}^T \mathbf{v} + \frac{1}{2} (\mathbf{d} - \mathbf{H}'\mathbf{U}\mathbf{v})^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{H}'\mathbf{U}\mathbf{v}), \quad (7)$$

其中  $\mathbf{H}'$  是线性化后的观测算子;  $\mathbf{d} = \mathbf{y}_o - \mathbf{H}(\mathbf{x}_b)$  表示观测变量与背景变量的偏差;  $\mathbf{U}$  包括物理变换  $U_p$  和空间变换(垂直变换  $U_v$  和水平变换  $U_h$ ), 即

$$\mathbf{B} = U_p U_v U_h U_p^T U_v^T U_h^T. \quad (8)$$

经过变量转换后,变分问题的规模得到了较大简化,也使得目标函数的极小化成为可能。在 WRFDA 3DVar 中,提供了 3 组控制变量方案选项,分别是 CV5、CV6 和 CV7。其中, CV5 方案是 WRFDA 3DVar 系统默认的控制变量选项,其分析控制变量为流函数、非平衡速度势、非平衡温度、假相对湿度、非平衡表面气压。为弥补 CV5 方案中未考虑相对湿度与其他分析控制变量之间的相关关系的缺陷, CV6 方案的分析控制变量调整为流函数、非平衡速度势、非平衡温度、非平衡假相对湿度、非平衡表面气压(Chen et al., 2016)。为了解决高分辨率、对流尺度的资料同化系统使用流函数和势函数作为动量控制变量容易丢失小尺度信息的问题, CV7 方案使用了水平风分量取代 CV5 中的流函数、势函数作为动量控制变量,即其分析控制变量为纬向风分量、经向风分量、温度、假相对湿度、表面气压(Sun et al., 2016)。

## 2 数值天气模式试验设置

### 2.1 个例与资料介绍

2017 年 5 月 6 日 16:00 到 7 日 12:00(世界时,下同)广州发生了局地突发性暖区特大暴雨(简称广州 5.7 暴雨),测得最大雨强 184.4 mm/h, 24 h 累积降水量达 542.7 mm,打破了广州市有气象记录以来的日降水极值。广州 5.7 暴雨属于弱强迫背景下中尺度局地突发性极端降水,国内外确定性业务预报模式对本次过程的预报效果都不理想,造成了较大的社会影响(张思嘉, 2019)。为了探讨不同控制变量方案(CV5、CV6 和 CV7)对雷达资料同化对本次暖区暴雨预报的影响,为此类暴雨过程的模拟和预报提供参考,本文采用 WRFDA 中 3 种不同控制变量方案进行雷达资料(反射率和径向速度)的循环同化与预报试验。

本文中同化的资料为 S 波段多普勒天气雷达的反射率和径向风观测资料,雷达分布位置及覆盖范围见图 1(a)。采用广东省自动雨量站观测数据作为降水预报的检验数据,雨量站分布位置见图 1(b)。开展同化试验前先对雷达资料进行必要的质量控制及处理,主要步骤包括:① 去除反射率和径向风资料中孤立的有值点、缺测点和跳跃点(陈力强等, 2009);② 针对径向风,使用 Shuman-Shapiro 二维 9 点平滑滤波方案消除风场脉动(陈力强等, 2009);③ 参考 Zhang et al.(2006)开发的二维多途径雷达径向风自动退模糊算法对径向风进行退速度模糊;④ 为去除非强对流降水回波的影响,经过一系列敏感性试验后对资料进行

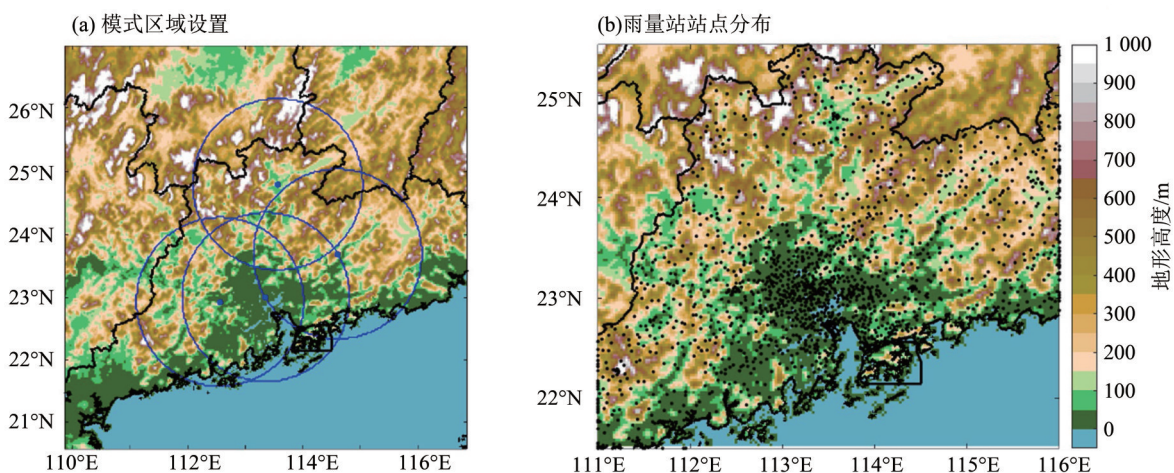


图 1 (a)模式模拟区域和雷达资料覆盖范围(蓝圈)和(b)雨量站的分布(黑点)

Fig. 1 (a) The simulation domain and radar data coverage (blue circles) and (b) the distribution of rain gauge (black points)

调整: 去除斜距大于 150 km 的反射率和径向风资料, 仅同化大于 10 dBZ 的反射率和不为 0 m/s 的径向风资料; ⑤ 利用双线性插值方法, 把资料插值到模式网格点。

## 2.2 模式设置

本研究使用 WRF 预报模式及其匹配的 WRF-DA 3DVar 同化系统, 模拟区域如图 1(a) 所示。背景场和边界条件由 NCEP 的  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  的 GFS (global forecast system) 分析资料提供。水平网格点数为  $261 \times 261$ , 格距 3 km; 垂直上分为不等距的 31 层, 顶层气压为 50 hPa。物理过程参数化方案包括: Morrison 微物理方案、Shin-Hong scale-aware 行星边界层方案、RRTMG 长/短波辐射方案、Noah 陆面过程方案、Monin-Obukhov 近地面层方案, 不使用积云参数化方案。

本文以广州 5.7 暴雨为例, 使用不同控制变量方案构建的  $B$  矩阵开展了 3 组同化与预报试验。其中背景误差协方差的计算方式如下: 从 2017 年 4 月 1 日到 5 月 6 日, 每天 00:00 和 12:00 分别冷启动进行 12 和 24 h 的预报。基于这些预测样本, 采用 NMC (national meteorological center) 方法 (Parrish et al., 1992) 分别统计不同控制变量 (CV5、CV6 和 CV7) 的背景误差协方差。同化试验 (简称 Exp-CV5、Exp-CV6 和 Exp-CV7) 的设置如下: 从 5 月 6 日 12:00 开始, 先积分 6 h; 在 18:00~21:00 每间隔 30 min 进行一次资料同化 (同化雷达反射率和径向风资料); 最后将 21:00 的分析场作为初始场, 进行 6 h 的预报。

## 3 单次同化结果

### 3.1 单点观测同化试验

从同化理论而言,  $B$  矩阵由一个时段的统计资料计算得到, 因此其各控制变量的方差和影响尺度等特征应当是固定不变的。但 Barker et al. (2004) 提出, 利用 NMC 方法计算得到的  $B$  矩阵, 在对流尺度的资料同化中会受到边界条件、噪声等影响, 无法有效代表模式的背景场误差特征。为了解决这一问题, 需要通过倍数调节因子对  $B$  矩阵的方差尺度和特征长度尺度进行修正, 这种调节经常是经验性的。为使高时空分辨率的雷达资料在同化时有合理的影响范围, 在循环同化试验前开展了一系列不同方差尺度和长度尺度组合的单点试验, 即在模式第 10 层的 ( $130 \times 130$ ) 格点处设

置纬向风的单点观测, 新息增量 (观测场与背景场的差) 和观测误差都设为 1 m/s。最终将  $B$  矩阵的方差尺度调节因子设为 1 (默认值); 特征长度尺度调节因子设为 0.5。

同化单点纬向风观测后, Exp-CV5 和 Exp-CV6 的纬向风增量分布形态类似, 都形成了以观测点为轴心, 自内向外逐渐减小的椭圆环形分布, 并在其南北两侧出现东风增量 (图 2a 和图 2b), 这种分布特征与陈耀登等 (2016) 的研究一致。由于 CV5 和 CV6 方案涉及到从流函数和势函数到径向风和纬向风的变量变换, 即  $\nabla^2 \psi = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$ ,  $\nabla^2 \chi = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ , 因此在求解泊松方程的过程中会产生更大的长度尺度和更小的方差。与 Exp-CV5 和 Exp-CV6 相比, 在相同的方差尺度和长度尺度参数设定下, Exp-CV7 的水平传播空间尺度较小, 影响范围更集中, 且不会出现东风增量 (图 2c)。童文雪 (2017) 同样发现在使用流函数和势函数作为动力控制变量时, 产生的分析增量比较平滑, 会丢失一些小尺度特征; 相比之下, Exp-CV7 的纬向风增量梯度更大, 有利于保留更多中小尺度信息。

此外, 由于 CV5 和 CV6 方案控制变量间的相关性, 同化纬向风观测量后, Exp-CV5 和 Exp-CV6 的经向风、温度和气压场都出现了轻微变化 (图略)。相反, CV7 方案没有考虑控制变量之间的相关性, 因此 Exp-CV7 同化纬向风不会引起其余变量的变化 (图略)。在 3 组控制变量方案中, CV6 方案通过引进 6 个额外的回归系数建立了湿度与其他变量的相关 (Chen et al., 2013, 2016), 因此在同化纬向风后, Exp-CV6 会产生水汽的分析增量, 而 Exp-CV5 和 Exp-CV7 则不会出现水汽增量 (图 2d-f)。

### 3.2 单次雷达观测同化试验

在单点同化试验的基础上, 本节开展了雷达观测的单次同化试验, 用于检验三种背景误差协方差方案对于同化的影响。值得注意的是, 试验中的背景场与单点试验保持一致, 但同化的资料为 18:00 的雷达观测 (包括反射率因子和径向风)。从 850 hPa 的风场增量图可以发现, 同化雷达资料后 3 组方案在广州上空都出现了明显的偏南风增量, 有利于水汽输送, 说明 3 组控制变量方案

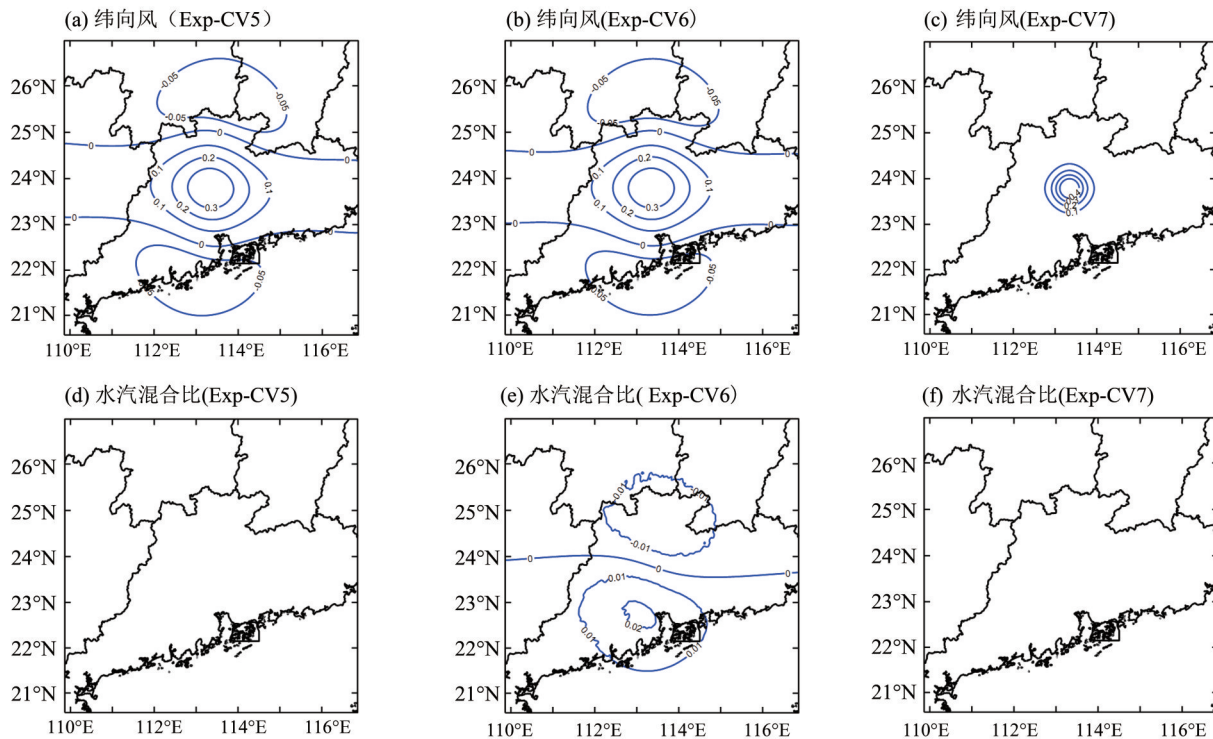


图 2 纬向风单点同化试验的纬向风(m/s)和水汽混合比(g/kg)分析增量

Fig. 2 The distribution of u-wind (m/s) and water vapor mix ratio (g/kg) analysis increments for single-u-wind assimilation tests

都能对初始的动力结构进行改进(图 3a-c)。在以流函数和非平衡势函数作为动力控制变量的 Exp-CV5 和 Exp-CV6 中, 风速增量范围明显大于试验 Exp-CV7, 这一结果与前面单点试验的结果一致。Exp-CV7 产生的风场增量主要集中在广东省内, 即对流系统所在的区域, 其他地区的风场增量都比较小。这种增量分布是合理的, 尽可能保证同化雷达资料后, 既增加对流系统范围内的中小尺度扰动, 又能维持背景场周围环境原有的大尺度平衡。而其余两组试验的风场增量已经超出对流区域, 扩散到整个模拟区域, 是不合理的。

850 hPa 的水汽混合比分析增量表明, 同化雷达资料后, 3 组试验在广州上空都以正增量为主, 表明同化雷达观测后增加了暴雨区的水汽含量(图 3d-f)。在 Exp-CV5 和 Exp-CV7 中, 模拟区域水汽混合比的分析增量较小(图 3d、f), 且增量集中在对流系统所在位置。由于 CV6 方案在控制变量中引进了风场与水汽的变量相关, 风场信息进一步传递到水汽变量中, 因此 Exp-CV6 对水汽的调整远大于其余试验(图 3e)。

为定量对比经过一次雷达资料同化后同化试验分析场的精度, 本文计算了各同化试验分析场

的比湿、温度、纬向风和经向风与中国气象局全球大气再分析资料(CRA)的均方根误差。从图 4a 可见, Exp-CV5 和 Exp-CV7 的比湿均方根误差非常接近, 可见 CV5 和 CV7 方案在同化一次雷达资料后, 对湿度场的影响效果区别不大, 这与前文的结论一致; 此外, Exp-CV6 在大气中层 600~800 hPa 的均方根误差更小。对比 3 组试验的温度均方根误差分布可以发现, Exp-CV5 和 Exp-CV6 的误差比较相似, 而 Exp-CV7 在 700 hPa 以下的均方根误差小于其余方案(图 4b)。

从 3 组同化方案纬向风和经向风的均方根误差(图 4c-d)可以看出, 3 组同化试验随高度的变化趋势较为一致, 其中 Exp-CV5 和 Exp-CV6 的均方根误差非常接近, 这是因为这两组方案的动量控制变量一致; 相比之下, 采用水平风分量作为动量控制变量方案的 Exp-CV7 均方根误差更小。整体而言, Exp-CV7 在大气中低层的均方根误差更小, 其中 Exp-CV7 对风场的改进效果最好, 原因可能是其产生的分析增量更集中, 有利于保留更多局地对流扰动信息, 因此更有利于改善风场的模拟, 进而提高降水预报效果。

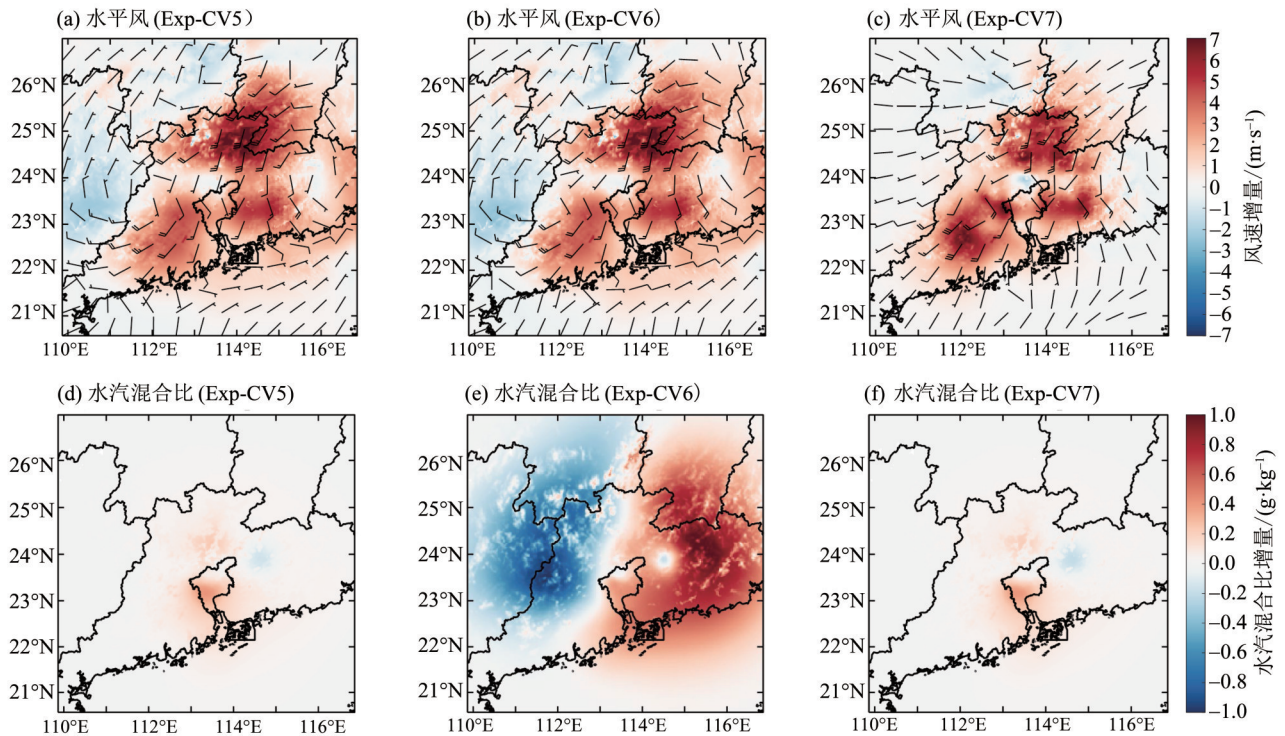


图 3 雷达同化试验 850 hPa 的水平风(m/s)和水汽混合比(g/kg)分析增量

Fig. 3 Horizontal wind (m/s) and water vapor mixing ratio (g/kg) analysis increment of 850 hPa for radar assimilation tests

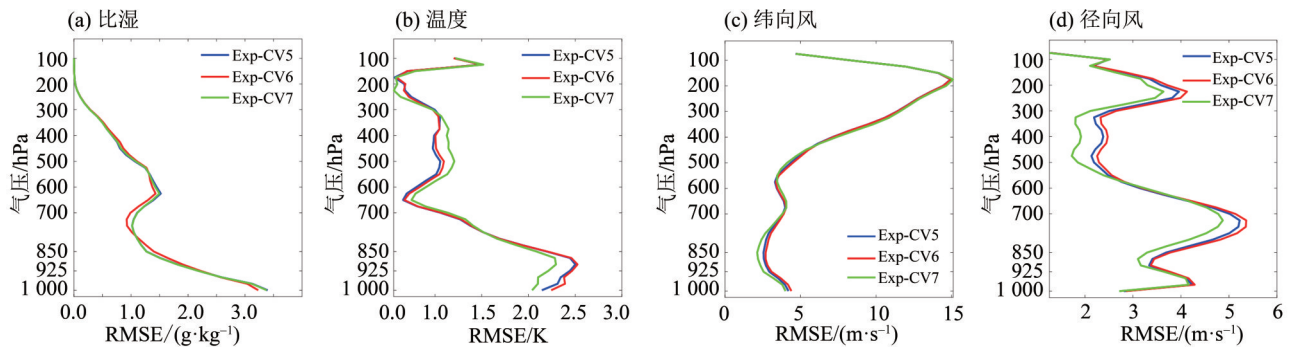


图 4 同化试验的分析场与 CRA 资料的均方根误差(RMSE)

Fig. 4 Root mean square error of the analysis field against CRA data for assimilation tests

## 4 循环同化试验结果

### 4.1 分析场

经过 7 次雷达资料循环同化后, 3 组试验的分析场中叠加了更丰富的中小尺度信息。为探讨不同控制变量方案对本次降水预报的影响, 对最后一次同化循环(即 5 月 6 日 21:00)的分析场进行进一步分析。

此次暴雨观测到的最大反射率的强度大于 45 dBZ, 在广州中部和北部有大片回波, 强回波中心位于中部(图 5a)。经过雷达资料循环同化后, 3 组同化试验分析场中最大反射率的分布范围模拟效果较好, 都能模拟出中部和北部的对流回波。但

Exp-CV5 和 Exp-CV6 模拟的强回波中心位于广州西部, 未能模拟出中部的强回波中心(图 5b-c)。相比之下, Exp-CV7 虽然在广州西部模拟的最大反射率也较实况偏大, 但其中部模拟的回波强度更接近实况(图 5d)。此外, 对比 3 组同化试验的 850 风场分布也能发现, 只有 Exp-CV7 在广州中部存在辐合, 有助于对流的发展和维持。

图 6 展示了 3 组同化试验在实测强回波中心附近(图 5 中红线)的反射率垂直分布情况, 其中黑色三角代表图 6a 中实测最大反射率的位置。从图 6a 可以看到, 实测大于 45 dBZ 的对流区位于 113.38°E 和 113.6°E 附近, 回波顶高达 5 km 以上。Exp-

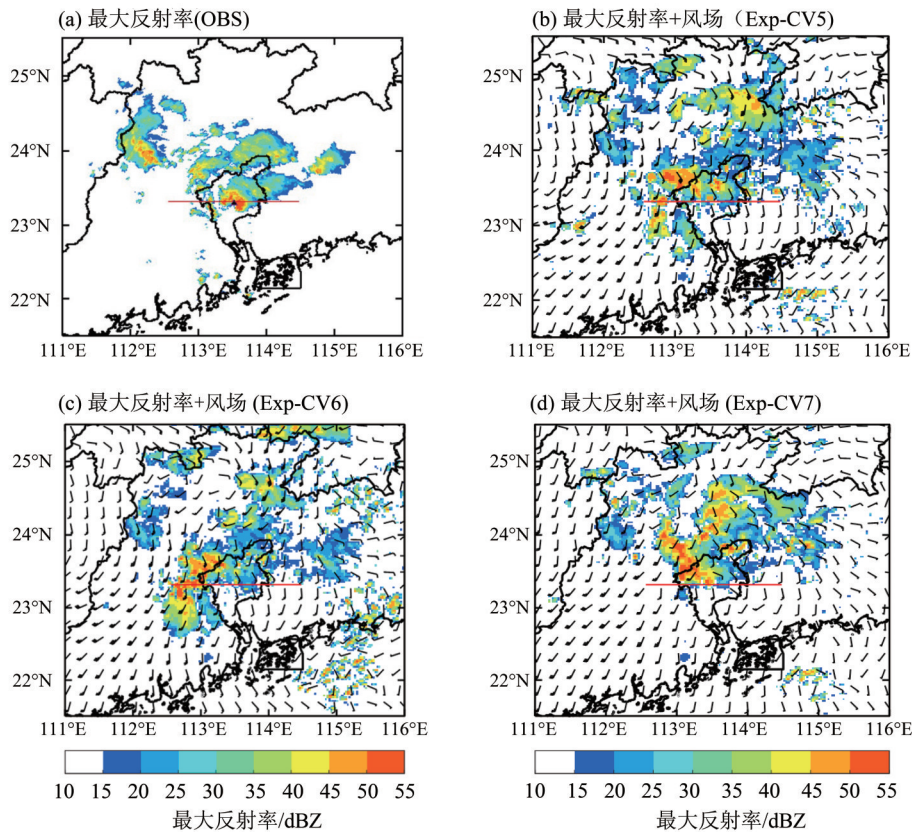


图 5 实测最大反射率和同化试验的最大反射率与 850 hPa 风场 (m/s)

Fig. 5 The observed maximum reflectivity and the maximum reflectivity with 850 hPa wind field (m/s) for assimilation tests

CV5 和 Exp-CV6 模拟的大于 45 dBZ 的对流区位于 112.8°E 附近, 且 Exp-CV6 的强度更大; 但两组试验在 113.6°E 附近模拟的组合反射率与实测相比偏小(图 6b-c)。相比之下, Exp-CV7 模拟的组合反射率垂直结构更接近实际观测, 不仅抑制了 Exp-CV5 和 Exp-CV6 在 112.8°E 附近的虚假回波, 而且模拟出了 113.6°E 附近大于 45 dBZ 的对流区, 回波顶高接近 5 km(图 6d)。

从 3 组同化试验 850 hPa 的相对湿度分布图(图 7a-c)可以发现, 经过雷达资料循环同化后, 同化试验分析场的水汽含量很高, 广州低层大气的相对湿度都超过 90%。其中 Exp-CV5 和 Exp-CV6 在广州北部的相对湿度含量达到 100%; 而 Exp-CV7 在广州中部有水汽饱和, 这与图 5a 观测到的强回波中心位置相吻合。但从 850 hPa 的水汽通量散度分布(图 7d-f)可以发现, 3 组试验中只有 Exp-CV7 在广州中部存在水汽辐合, 且该区域还伴随有大于 1 m/s 的垂直上升速度, 更符合强对流系统的发生和维持要求。相比之下, Exp-CV5 和 Exp-CV6 在广州的水汽辐合和大于 1 m/s 的垂直上升速度基本出现在广州偏北地区, 且水汽通量辐合的强度

较小。由此可见, 虽然 Exp-CV5 和 Exp-CV6 的分析场在广州的水汽含量很高, 但缺少动力抬升和辐合作用, 不利于强降水过程的发生。

#### 4.2 降水预报

本次“5.7”暖区暴雨对广州市造成重大损失的主要原因是降水强度大、局地性强。从 6 h 的累积降水实测分布图(图 8a)可以发现, 暴雨雨带( $\geq 30$  mm)位于清远到广州呈西北-东南走向, 强降水中心( $\geq 110$  mm)位于广州中部, 6 h 累积降水量超过 180 mm。图 8b-d 不仅展示了同化试验预报的 6 h 累积降水量, 而且为便于对比, 叠加了实测暴雨雨带的位置(图 8 中红色等值线)。可以发现, Exp-CV5 和 Exp-CV6 预报的暴雨雨带无论是位置还是降水强度都与实测有较大偏差, 无法预报出本次强降水中心(图 8b-c)。相比之下, Exp-CV7 的预报效果明显更好, 其预报的暴雨雨带与观测基本吻合, 强降水中心的位置和降水强度的预报效果均得到显著提升(图 8d)。

基于前文对各同化试验分析场的分析发现, Exp-CV5 和 Exp-CV6 循环同化雷达资料后, 虽然分析场中的水汽含量很高, 但由于缺少动力抬升

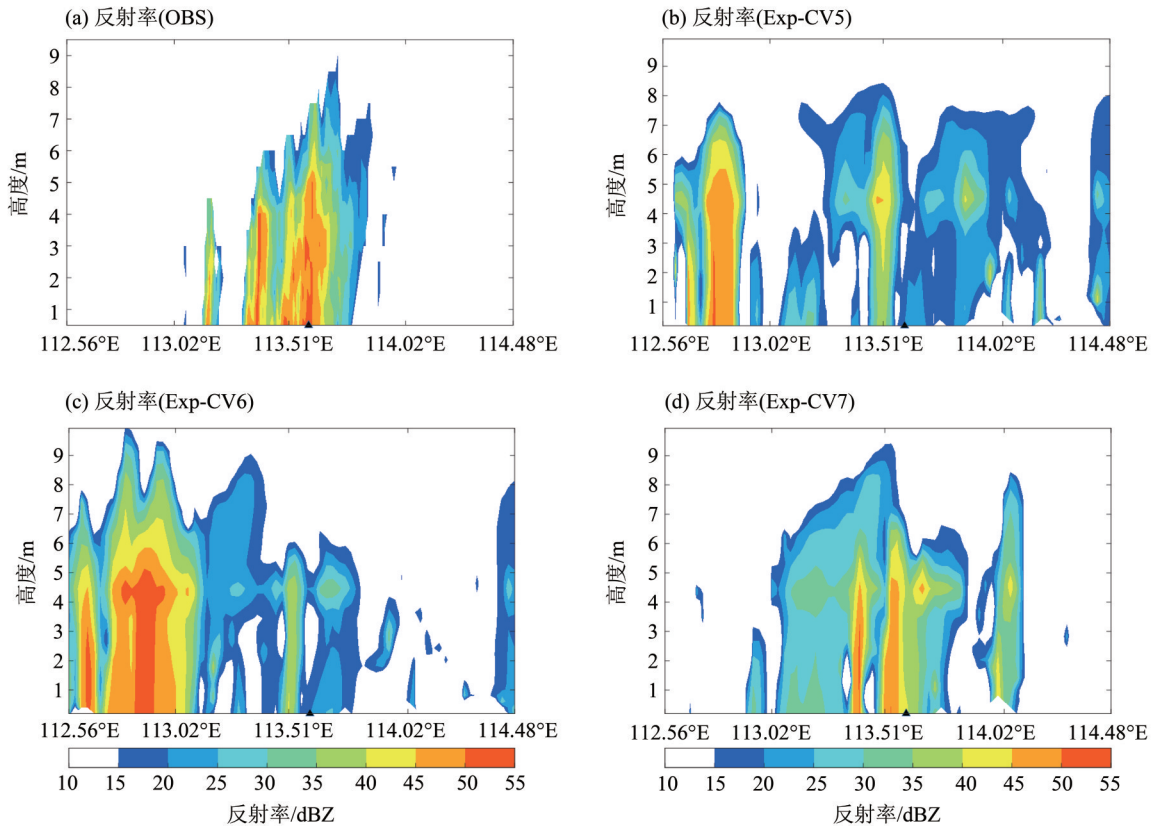


图6 实测和同化试验强回波中心附近(图5中红线)的反射率(dBZ)垂直剖面图, 黑色三角代表图6a最大反射率的位置  
Fig. 6 Vertical profile of reflectivity (dBZ) of the observed and assimilation tests near the strongest echo (red line in Fig. 5), and the black triangle represents the position of the maximum reflectivity in Fig. 6a

和辐合作用, 因而难以在广州形成降水。与之相反, Exp-CV7的分析场中广州中部存在明显的水汽辐合, 并存在上升速度, 因此有利于该区域强降水的发展和维持。其原因可能是CV5和CV6方案的动量控制变量都是流函数和势函数, 它们的风场长度尺度较大, 同化经向风观测资料影响范围较大, 反而使得局地风场分析的效果变差, 从而产生的降水偏弱。

本文使用ETS和BIAS评分(范水勇等, 2009)对各试验的逐小时降水预报结果进行对比, 客观评价不同试验的降水预报性能, 并将检验的阈值设定为5和10 mm。ETS评分在TS评分的基础上进行改进, 在计算过程中需要去除随机命中区域的降水, 因此被认为是更公平的评分指标(Cartwright et al., 2007)。当无空报或漏报时, ETS=1, 表明预报完全准确。BIAS评分可以反映模式对降水范围大小的预报性能, 分数越接近1表示预报范围与实测越接近。值得注意的是, 本文采用降水站点检验方法, 即先将模式网格点降水预报值插值到雨量站位置, 再进行站点对站点的检验。

从ETS评分来看(图9a-b), Exp-CV5除了在一个时刻的分数高于Exp-CV6, 在其余时刻的分数都是最低。Exp-CV6的预报分数整体而言远大于Exp-CV5, 说明虽然利用CV6方案的 $B$ 矩阵循环同化雷达资料对模式风场的改进不够明显(图4-5), 但该方案在湿度方面的调整较Exp-CV5更有优势(图4a), 因而对随后的降水预报起到积极作用。而Exp-CV7无论在哪组检验阈值下的分数不仅远大于其余两组试验, 且其ETS分数一直保持大于0, 说明Exp-CV7在所有预报时效中都有正面的预报能力。从BIAS评分来看(图9c-d), Exp-CV5除了在较小检验阈值的前两个预报时刻外, 在其余时刻的分数都远小于1, 表明该试验对降水的预报范围偏小。而Exp-CV6在前3 h的分数预报分数大于1, 即有较大的空报; 在后3 h的分数与Exp-CV5差别不大, 都小于1, 即有较大的漏报。相比之下, Exp-CV7的BIAS评分比其余方案更接近1, 尤其是在后3 h的预报中, 再次表明CV7方案对降水预报范围的预报效果更好。

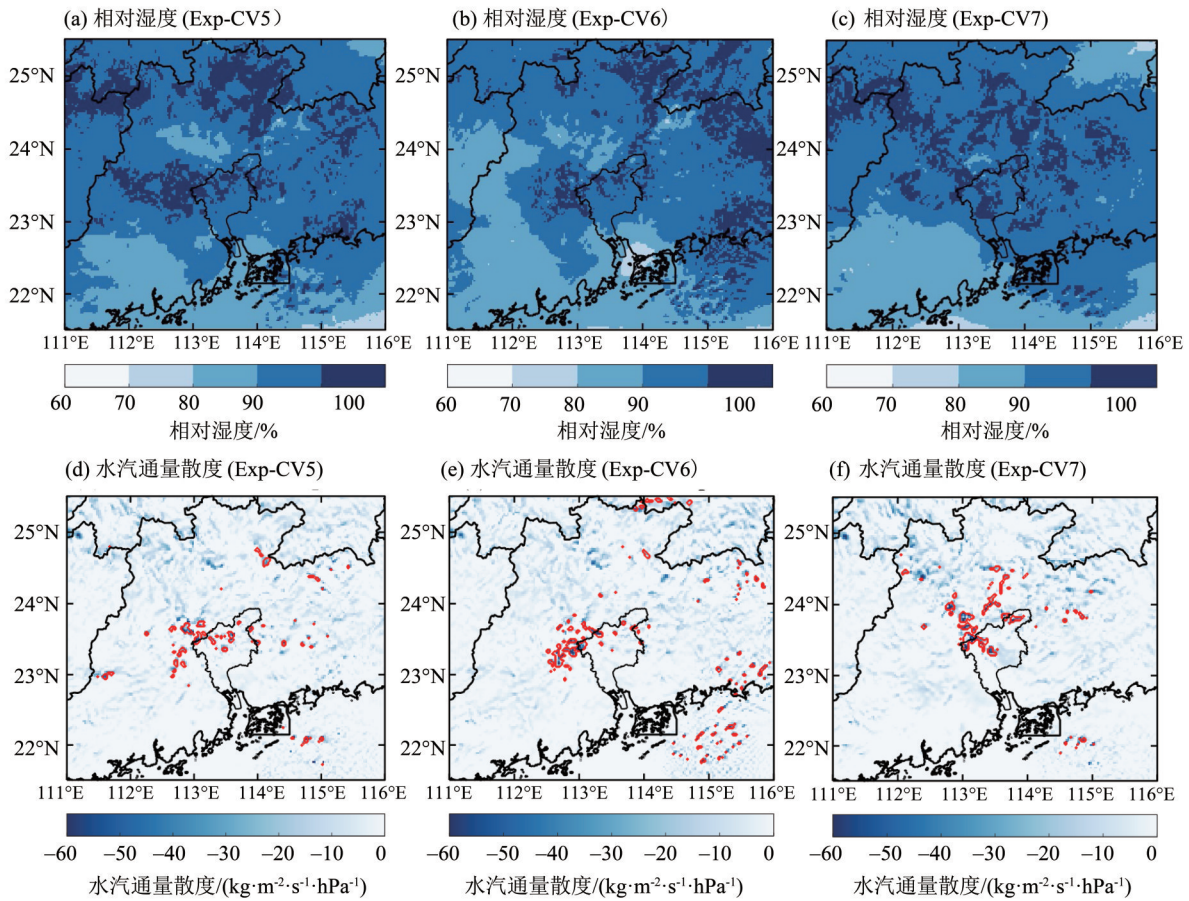


图 7 同化试验的 850 hPa 相对湿度(%)和水汽通量散度( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ )叠加 1 m/s 的垂直速度(红线)

Fig. 7 relative humidity (%) and water vapor flux divergence ( $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$ ) as well as vertical velocity of 1 m/s (red line) on 850 hPa for assimilated tests

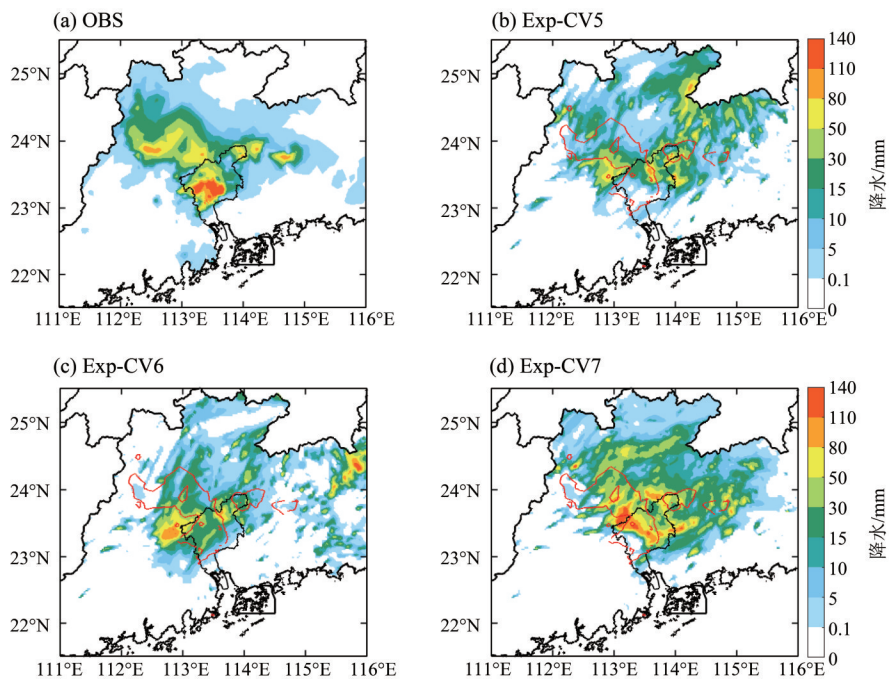


图 8 实测和同化试验的 6 h 累积降水(mm), b~d 的红线表示实测累积降水量>30 mm 的区域

Fig. 8 6 h cumulative precipitation (mm) of observed and assimilated tests, and the red line in b-d indicates the area where the observed cumulative precipitation is greater than 30 mm

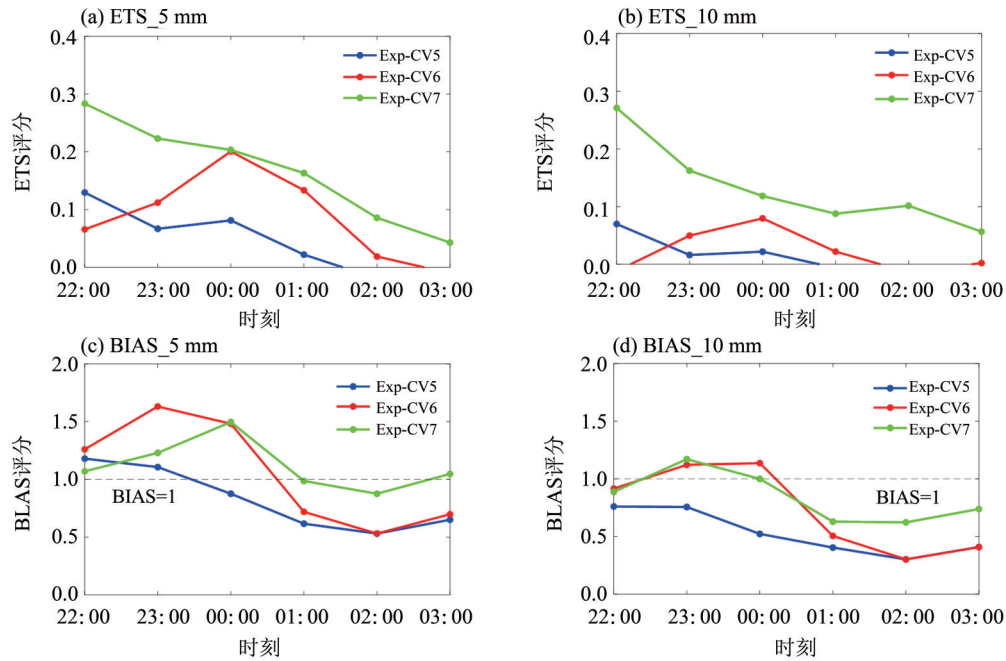


图9 同化试验的逐小时降水预报ETS和BIAS评分

Fig. 9 Hourly precipitation ETS and BIAS scores for assimilation tests

## 5 结论与展望

针对2017年5月6~7日发生在广州的一次暖区暴雨过程, 本文利用WRFDA 3DVar同化系统的CV5、CV6和CV7控制变量方案选项构造的 $B$ 矩阵开展雷达资料同化试验, 探讨不同控制变量方案对此次暖区暴雨过程数值预报效果的影响, 主要结论如下:

1) 单点试验和单次雷达资料同化试验结果表明, Exp-CV6对湿度场的影响最大且在大气中层的比湿均方根误差最小。Exp-CV7对风场的改进效果从大气低层到高层都明显优于Exp-CV5和Exp-CV6, 原因可能是其产生的分析增量更集中且梯度更大, 有利于保留雷达资料更多中小尺度信息, 因此更有利于改善风场的模拟。

2) 经过3 h雷达资料循环同化后, Exp-CV7在分析时刻的反射率模拟最接近实测, 且在广州中

部(对流区域)有水汽辐合和垂直上升运动, 可见Exp-CV7的初始场更准确地模拟出了对流系统的结构。

3) 降水的预报结果表明, Exp-CV7对本次暖区暴雨雨带与强降水中心位置的预报效果最佳, 其次是Exp-CV6, 这主要是因为CV7方案对动力场的调整更有利于本次暖区暴雨的发展, 而CV6方案对湿度场的调整较CV5方案更有优势。

需要指出的是, 本文仅针对广州5·7暖区暴雨个例开展了研究, 所得结果具有局限性。为提高华南地区暖区暴雨预报技巧, 未来的工作将选取更多包括不同时期的暖区暴雨过程进行研究, 更深入系统地探讨不同控制变量方案对华南地区降水预报的影响。同时, 增加对暖区暴雨系统结构以及数值预报模式的理解, 探索闪电、卫星等观测资料同化技术的应用方案, 提高暖区暴雨预报的准确性。

### 参考文献:

- 陈力强, 杨森, 肖庆农, 2009. 多普勒雷达资料在冷涡强对流天气中的同化应用试验[J]. 气象, 35(12): 12-20.
- 陈耀登, 陈晓梦, 曾腊梅, 等, 2016. 背景场误差样本模拟对同化及数值预报效果的影响[J]. 高原气象, 35(3): 767-776.
- 陈耀登, 赵幸, 闵锦忠, 等, 2015. 青藏高原和华东地区背景误

差协方差特征的对比研究[J]. 大气科学学报, 38(5): 650-657.

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.

高士博, 2018. 雷达资料同化在强对流天气预报中的应用研

- 究[D].南京:南京信息工程大学.
- 卢长浩,陈耀登,孟德明,2019.两种动力控制变量对比分析及其对台风同化和预报的影响[J].大气科学学报,42(6):916-925.
- 马旭林,庄照荣,薛纪善,等,2009. GRAPES非静力数值预报模式的三维变分资料同化系统的发展[J].气象学报,67(1):50-60.
- 孙娟珍,陈明轩,范水勇,2016.雷达资料同化方法:回顾与前瞻[J].气象科技进展,6(3):17-27.
- 童文雪.2017.针对短时对流降水预报的WRF变分同化系统改进与应用研究[D].南京:南京信息工程大学.
- 王叶红,陈超君,赵玉春,2016.华中区域模式三维变分中夏季背景误差协方差统计与对比试验[J].暴雨灾害,35(4):359-370.
- 夏雪,2016.多变量相关的背景误差协方差及其对同化和预报效果的影响[D].南京:南京信息工程大学.
- 张思嘉,2019.一次广州特大暴雨事件的局地对流触发机制研究[D].南京:南京信息工程大学.
- BANNISTER R N, 2008. A review of forecast error covariance statistics in atmospheric variational data assimilation. I: Characteristics and measurements of forecast error covariances[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 134(637): 1951-1970.
- BARKER D M, HUANG W, GUO Y, et al, 2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: Implementation and initial results [J]. Monthly Weather Review, 132(4): 897-914.
- CARTWRIGHT T J, KRISHNAMURTI T N, 2007. Warm season mesoscale superensemble precipitation forecasts in the southeastern United States [J]. Weather and forecasting, 22(4): 873-886.
- CHEN Y D, RIZVI S R H, HUANG X Y, et al, 2013. Balance characteristics of multivariate background error covariances and their impact on analyses and forecasts in tropical and Arctic regions [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 121(1/2): 79-98.
- CHEN Y D, XIA X, MIN J Z, et al, 2016. Balance characteristics of multivariate background error covariance for rainy and dry seasons and their impact on precipitation forecasts of two rainfall events [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 128(5): 579-600.
- COURTIER P, THÉPAUT J N, HOLLINGSWORTH A, 1994. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 120(519): 1367-1387.
- GAO X Y, GAO S H, 2020. Impact of multivariate background error covariance on the WRF-3DVAR assimilation for the yellow sea fog modeling [J]. Advances in Meteorology, 2020:8816185.
- LI X, ZENG M J, WANG Y, et al. 2016. Evaluation of two momentum control variable schemes and their impact on the variational assimilation of radar wind data: Case study of a squall line [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33(10): 1143-1157.
- MAIELLO I, FERRETTI R, GENTILE S, et al. 2014. Impact of radar data assimilation for the simulation of a heavy rainfall case in central Italy using WRF - 3DVAR [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 7(9): 2919-2935.
- PARRISH D F, DERBER J C, 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system [J]. Monthly Weather Review, 120(8): 1747-1763.
- SUN J Z, CROOK N A, 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 54(12): 1642-1661.
- SUN J Z, WANG H L, 2013. WRF-ARW variational storm-scale data assimilation: Current capabilities and future developments [J]. Advances in Meteorology, 2013: 815910.
- SUN J Z, WANG H L, TONG W X, et al, 2016. Comparison of the impacts of momentum control variables on high-resolution variational data assimilation and precipitation forecasting [J]. Monthly Weather Review, 144(1): 149-169.
- WANG C, CHEN Y D, CHEN M, et al, 2020. Data assimilation of a dense wind profiler network and its impact on convective forecasting [J]. Atmospheric Research, 238: 104880.
- WANG H L, SUN J Z, FAN S Y, et al, 2013. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(4): 889-902.
- XIAO Q N, KUO Y H, SUN J Z, et al, 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case [J]. Journal of Applied Meteorology, 44(6): 768-788.
- XIAO Q N, SUN J Z, 2007. Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP\_2002 [J]. Monthly Weather Review, 135(10): 3381-3404.
- ZHANG J, WANG S X, 2006. An automated 2D multipass Doppler radar velocity dealiasing scheme [J]. American Meteorological Society, 23: 1239-1248.