

师雨豪,王昊亮,刘玉宝,2024. 联合同化闪电资料和地面常规观测资料对强对流天气预报的影响[J]. 气象,50(10):1231-1242. Shi Y H, Wang H L, Liu Y B, 2024. Impact of combined assimilation of lightning and conventional surface observations on the forecast of severe convective weather[J]. Meteor Mon, 50(10):1231-1242(in Chinese).

联合同化闪电资料和地面常规观测资料 对强对流天气预报的影响*

师雨豪^{1,2} 王昊亮^{1,2} 刘玉宝^{1,2}

1 南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室,南京 210044

2 南京信息工程大学精细化区域地球模拟和信息中心,南京 210044

提 要: 以 2017 年 6 月 16 日发生在广东省的一次中尺度对流过程为例,利用 WRF 模式对中尺度对流系统进行模拟,分析了联合同化闪电和地面常规观测资料较单独同化其中一种资料的改进作用。闪电资料通过 WRF-FDDA 系统以 15 min 作为一个闪电累积窗口被连续同化入模式中,地面常规观测资料通过 WRFDA-3DVAR 系统以 1 h 间隔循环同化入模式中。结果显示,相比于只同化地面常规观测资料,联合同化试验中闪电资料的引入提高了背景场中上升气流、冷池和阵风锋的准确度;相比于只同化闪电观测资料,地面常规观测资料的引入减小了更大范围的温度、水汽、风场的背景场误差,抑制了部分地区的虚假对流,即两种资料的联合同化整体提高了对流系统的模拟准确度。预报技巧评分结果显示,联合同化对同化期和预报期的评分也有一定程度的提高。

关键词: 数值天气预报,资料同化,闪电资料,地面常规观测资料,中尺度对流系统

中图分类号: P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2024.021701

Impact of Combined Assimilation of Lightning and Conventional Surface Observations on the Forecast of Severe Convective Weather

SHI Yuhao^{1,2} WANG Haoliang^{1,2} LIU Yubao^{1,2}

1 CMA Aerosol-Cloud and Precipitation Key Laboratory, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Precision Regional Earth Modeling and Information Center, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract: A mesoscale convective progress occurred in Guangdong Province on 16 June 2017, and the system was simulated by WRF model. This article analyzes the impact of the combined assimilation of the lightning and conventional surface observation data on the simulation of mesoscale convective system compared with the single assimilation of one kind of data. The lightning data were continuously assimilated into the model through the WRF-FDDA system with a lightning accumulation window of 15 min, while the conventional observation data were assimilated into the model by the WRFDA-3DVAR system with one hour interval. The results show that the introduction of lightning data in the joint assimilation experiment has improved the accuracy of updrafts, cold pools, and gust fronts in the background fields relative to the assimilation of conventional surface observations only. The introduction of conventional surface observations has reduced the background field errors in temperature, water vapor, and wind fields over a larger

* 国家自然科学基金气象联合基金项目(U2342222)、国家自然科学基金项目(42230604)共同资助

2023 年 7 月 5 日收稿; 2024 年 3 月 4 日收修定稿

第一作者:师雨豪,主要从事资料同化研究. E-mail: syh19990513@163.com

通讯作者:王昊亮,主要从事资料同化、数值天气预报研究. E-mail: haoliang@nuist.edu.cn

area, suppressed the spurious convection in some areas, and overall improved the simulation accuracy of the convective system. The results of prediction skill score show that the combined assimilation of the two kinds of data can also improve the prediction skill score of the assimilation period and the forecast period to some extent.

Key words: numerical weather prediction, data assimilation, lightning data, conventional surface observation data, mesoscale convective system

引 言

数值天气预报采用数学物理方法求解数值模型,基于初值和边界场条件,能够有效地预测大气未来的演变过程。资料同化技术是一种能够有效提高模式初始场准确度的方法(矫梅燕等,2006)。随着观测技术的不断提高,观测资料的种类和时空分辨率不断增加,近年来如何充分利用多源观测资料改善初始场准确度,已成为数值天气预报研究领域的热点(崔春光等,2021;师春香等,2019;龚建东,2013)。

强对流天气往往伴随着闪电活动,闪电活动是由于过程中存在强烈的上升气流,且强对流云环境条件有利于冰相水凝物粒子的生成。这些粒子在上升气流的作用下发生碰撞和分离,并最终产生闪电活动(Liu et al,2012)。观测研究表明,闪电活动在强对流天气过程中具有重要的指示作用(Makowski et al,2013;Rudlosky and Fuelberg,2013)。总闪电率(地闪和云闪)与云中霰粒子的含量以及上升气流的强度密切相关(Ribaud et al,2016;Guo et al,2016)。近年来闪电探测技术得到了快速发展,为了实时探测闪电活动,已建成了许多地基和星载的闪电探测系统(王宇等,2015;Yang et al,2017)。在对流允许尺度上通过各种方法进行闪电资料同化研究上取得了显著进展。其中,基于牛顿松弛逼近(Nudging)技术的闪电资料同化方法通过调整水汽含量、潜热以及水凝物粒子质量混合比等,从而在有闪电观测但模式中无对流出现的位置促进对流的产生(Wang et al,2022;Sun et al,2022)。另外,基于变分同化技术和集合卡尔曼滤波(EnKF)技术的闪电资料同化方法,通过建立闪电观测数据与模式变量间的观测算子,对模式背景场进行调整(Xiao et al,2021;Kong et al,2020;徐国强等,2020;何邓新等,2021)。

地面气象观测站通过对气象要素的直接测量获得常规大气背景场信息,包括温度、压力、湿度和风速等,能够反映大、中尺度天气特征,对于数值天气预报具有重要意义。与其他非常规观测资料相比,地面观测资料具有多项优势,例如,地面观测要素与模式变量一致,质量稳定且在一定区域内具有较高的精度(何光碧等,2013)。近年来,研究人员利用各种方法对常规观测资料进行同化应用,取得了显著的成果。其中,三维变分方法被广泛应用于常规观测资料的同化,通过该方法可以在一定程度上改善地面要素以及降水的模拟效果(王平等,2017;盛春岩等,2018;张鑫宇等,2021)。此外,Nudging同化方法也被证实可以提高对雨带位置、强度的模拟准确度,并改善地面温度和风场的模拟效果(Bullock et al,2014;周易等,2016)。另外,具有流依赖特征的EnKF方法也被广泛应用于常规观测资料的同化研究中,改善了模式的模拟效果(邵长亮和闵锦忠,2019;孟智勇等,2019)。

地面常规观测在直接观测气象要素方面通常具有较高的精度。然而由于观测空间不连续性、观测高度受限、无法反映云的信息等缺陷,对其的同化应用存在诸多问题(Lin and Pu,2020)。而闪电观测则范围广泛,受地表地形影响较小,且在空间和时间上具有较好的连续性,能够反映强对流系统对流区域的大气背景场信息。然而,闪电资料仅能反映强对流云中对流区域的信息,无法有效反映无云区域和层状云区域的大气状态,因此在某种程度上限制了闪电资料同化对强对流天气预报的作用(Wang et al,2018)。由于闪电资料和地面常规观测资料提供了互补信息,联合同化这两种资料相比于单独同化其中一种资料有进一步提高对强对流天气预报准确度的潜力。基于以上背景,本研究开展了对上述两种资料联合同化的研究,分析联合同化两种资料相比于只同化其中一种资料对中尺度对流系统模拟的改进作用。

1 资料、方法及模拟设置

1.1 资料

本文使用的闪电资料来源于广东省气象局和 Earth Network 公司建立的闪电探测系统, 由 16 个地面传感器组成(图 1a), 其定位精度约为 600 m, 总闪电探测效率为 77% (Zhang et al, 2016)。为适应 WRF 模拟域网格(3 km × 3 km), 将总闪电资料进行了插值处理, 从原始经纬度坐标转换到相应的模拟域网格上。

地面自动气象站分布密集, 观测频次高, 其空间分辨率可达到 3 km, 利用其观测资料, 包括气温、湿度、气压、风速、风向等气象要素进行同化。同化区域内共有约 5200 个观测站点(图 1a), 约有 4000 个站点的温度、3500 个站点的风速、900 个站点的水汽、1000 个站点的气压参与同化过程。

为了对模拟结果进行评估, 使用了覆盖广东省范围的雷达组合反射率因子产品和地面常规观测资料, 对雷达反射率因子资料进行了插值处理, 使其与数值试验的模拟域网格保持一致。

1.2 同化方案

1.2.1 闪电资料

本研究使用了 Wang et al (2017) 在 WRF-FDDA (Four Dimensional Data Assimilation) 系统中开发的闪电资料同化方案。该方案利用观测到的闪电率反演对流云内霰粒子的质量混合比, 并充分考虑了水凝物粒子形成过程中潜热释放过程的影响, 将观测到的闪电率与霰粒子质量混合比建立联系。在霰粒子质量混合比反演方案中, 利用闪电率

和霰粒子垂直积分质量直接的观测算子, 建立了闪电率分档区间与霰粒子垂直积分质量分档区间之间的对应关系 (Carey et al, 2014):

$$F = 2.43 \times 10^{-8} M_g \tag{1}$$

式中: F 为闪电率(单位: min^{-1}), M_g 为 $-40 \sim -10^\circ\text{C}$ 的霰粒子垂直积分质量(单位: kg)。

模式气柱中不同霰粒子垂直积分质量分档区间的霰粒子质量混合比特征廓线可以用来反演霰粒子质量混合比的三维结构。通过对强对流天气个例的回测模拟, 建立了一个霰粒子质量混合比廓线的数据库。当模式网格中某一像素的闪电率观测值确定后, 可通过该闪电率对应的霰粒子垂直积分质量分档区间确定该像素的霰粒子质量混合比垂直廓线。

为了更准确地反映霰粒子分布情况, 还采用了一种基于距离权重函数的方法来考虑闪电观测相邻区域中的霰粒子含量, 如式(2)所示:

$$q_g(x) = \frac{\sum_{i=1}^N q_g(x_i) \cdot W_i(r_i, R)}{N} \tag{2}$$

式中: $q_g(x)$ 为观测的闪电密度为 0 次 · km^{-2} 的格点 x 上的霰粒子质量混合比(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $q_g(x_i)$ 和 N 分别为格点 x 影响半径 R 范围内非零闪电观测值的格点 x_i 上的霰粒子质量混合比和格点数量。其中 W_i 为 Cressman (1959) 提出的空间距离权重函数, 由式(3)计算所得:

$$W_i(r_i, R) = \begin{cases} \frac{R^2 - r_i^2}{R^2 + r_i^2} & 0 < r_i \leq R \\ 0 & r_i > R \end{cases} \tag{3}$$

式中 r_i 是两个网格点 x 和 x_i 之间的水平距离。经过测试, 当 $R=6 \text{ km}$ 时产生的结果更加可靠, 因此 R 值设为 6 km。

在霰粒子质量混合比的同化中, 使用 FDDA 系

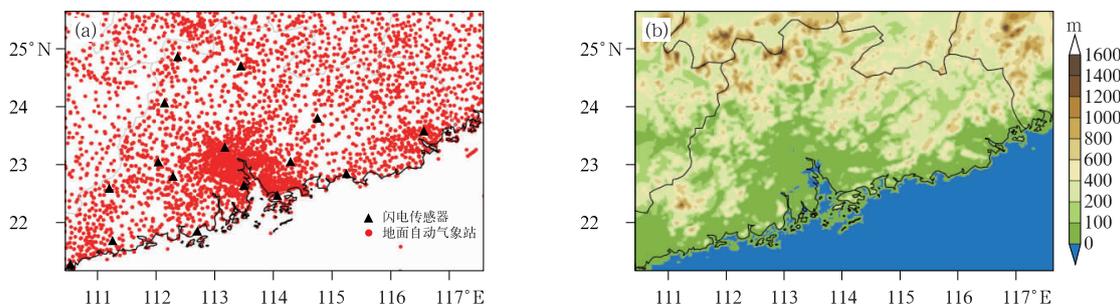


图 1 (a) 模式同化的站点分布, (b) 实际地形高度

Fig. 1 (a) Distribution of stations for model assimilation and (b) actual terrain height

统的“Grid Nudging”模块将反演的三维霰粒子质量混合比以四维时间连续的方式同化到 WRF 模式中。“Grid Nudging”适用于高空间分辨率观测的松弛逼近方法,如式(4)所示:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = P(X, t) + G \cdot W \cdot T(Y - X) \quad (4)$$

式中: X 为模式变量的初猜值, $P(X, t)$ 是 WRF 模式预报方程中的原始动力、微物理项, G 是防止模式变量瞬间变化引起虚假噪音波的松弛系数, W 为空间权重, T 为观测时间和模式时间迟滞性的实际权重, Y 是模式格点上对应的观测值。

潜热释放是指在霰粒子形成过程中释放的热量,其温度增量与霰粒子质量混合比增量成正比关系,如式(5)所示:

$$\Delta T = \frac{\Delta q_g [L_c(T_0) + L_f]}{c} \quad (5)$$

式中: ΔT 和 Δq_g 分别为温度增量(单位:°C)和霰粒子质量混合比增量(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), $L_c(T_0)$ 为温度为 T_0 时的凝结潜热(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), L_f 为 0°C 时的冻结潜热(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$), c 为水的绝对热容(单位: $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$)。

潜热释放带来的温度增量依然使用 FDDA 系统的“Grid Nudging”模块以四维时间连续的方式同化到 WRF 模式中,其公式如下:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = P(X, t) + G \cdot W \cdot T \cdot \Delta T \quad (6)$$

采用的潜热调整过滤方法为:为了防止在对流区域的边缘处激发过强的上升气流,潜热对应的温度增量只在闪电反演的霰粒子质量混合比大于 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时才添加。

1.2.2 地面常规观测资料

采用 WRFDA-3DVAR 同化系统对地面常规观测资料进行同化。在该同化系统中,通过求解代价函数得到最优解,来表示分析时刻下的大气真实状态,如式(7)所示:

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y})^T \mathbf{R}^{-1}(\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}) \quad (7)$$

式中: $\mathbf{J}(\mathbf{x})$ 为代价函数, \mathbf{x} 表示大气状态变量, \mathbf{x}_b 表示大气状态背景场, \mathbf{B} 为背景场 \mathbf{x}_b 的误差协方差矩阵, \mathbf{H} 为观测算子, \mathbf{y} 为已知的观测值, \mathbf{R} 为观测值 \mathbf{y} 的误差协方差矩阵。

采用的地面资料同化方案为 Ruggiero 方案(Ruggiero et al, 1996),该方案考虑了模式与实际观测站点地形之间的差异:当模式最低层高度低于地面观测站的高度时,则将地面观测资料作为高空资料同化进入模式;当模式最低层高度比观测站高度高,且高度差小于 100 m 时,则利用背景场信息将观测资料反演至模式最低层;当模式最低层高度超出地面观测站高度 100 m 时,则剔除该站点资料。风的同化基于莫宁-奥布霍夫相似理论(张鑫宇等, 2021)进行订正;温度的同化则基于位温垂直变化率做订正;当相对湿度 $> 100\%$ 或 $< 10\%$ 时,对其进行局部调整。

本研究中使用的是通过 2017 年 6 月研究区域一个月的模拟数据得出的具有区域性特点的背景误差协方差,而非全球范围通用,能更好地反映不同地区的大气变化特征和误差分布情况。背景误差协方差模拟中的模式设置以及微物理参数化方案与本研究资料同化试验中所使用的相同。

1.3 个例选取和试验设计

选取 2017 年 6 月 16 日广东省一次强对流过程进行模拟对比。16 日 03 时(世界时,下同),广东省上空出现了多个离散的强雷暴单体。随着时间的推移,单体逐渐向东南方向移动并不断加强。10 时左右,部分雷暴单体逐渐合并形成了一个中尺度对流系统,并持续向东南方向移动。17 时前后,中尺度对流系统形成的线状对流带移动至海上,此次对流过程结束。

使用 WRF4.1.1 模式,采用双重嵌套的三重网格进行数值模拟(图 2)。网格水平分辨率分别为 27、9、3 km。共设 43 个垂直层,模式顶部设置在 50 hPa 高度。模式的初始场和边界条件来源于美国国家大气环境中心 6 h 间隔的 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 全球预报系统(GFS)再分析资料。Thompson 微物理参数化方案(Thompson et al, 2008)、MYJ 大气边界层方案(Janjic, 1994)、Noah 陆面模式(Ek et al, 2003)、GCMs 快速辐射传输模型(Iacono et al, 2008)以及 Grell-Freitas 积云参数化方案(Grell and Freitas, 2014)被应用到本研究的模拟设置中。其中,Grell-Freitas 积云参数化方案在模拟域 D01 和 D02 中被使用,但在云可辨尺度模拟域 D03 中未被使用。

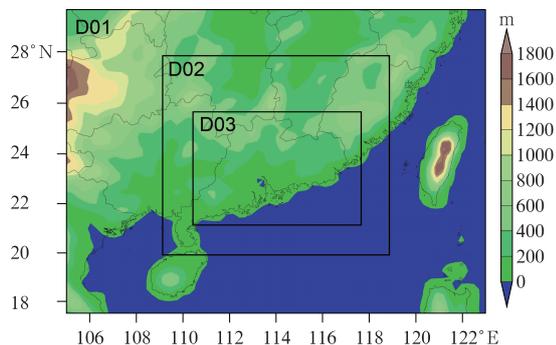


图 2 WRF 模拟域配置(方框)和地形高度(填色)

Fig. 2 Configuration of the WRF simulation domain (box) and terrain height (colored)

本研究所采用的联合同化方案如下: 在同化周期中, 通过 Wang et al(2017)开发的基于 Nudging 技术的闪电资料同化方法对闪电资料进行四维连续同化, 以 15 min 作为一个闪电累积窗口(即以 15 min 累积量计算闪电密度, 并将该数据在对应的 15 min 的模式积分过程中连续同化入模式背景场

中)。此外, 在同化周期中, 通过 WRFDA-3DVAR 系统每间隔 1 h 同化一次地面常规观测资料, 即采用逐 1 h 循环同化更新的同化方式。闪电资料和地面常规观测资料的同化在模拟域 D03 中开展。

为了评估联合同化闪电和地面常规观测资料相比于只同化其中一种资料对中尺度对流系统模拟的改进作用, 开展了以下数值模拟试验: 未同化任何资料的控制试验(CTRL), 地面常规观测资料同化试验(CDA), 闪电资料同化试验(LDA), 地面常规观测资料和闪电资料的联合同化试验(LCDA)。所有试验均采用冷启动的方式进行预报。表 1 给出了各试验的名称缩写及简要描述, 流程如图 3 所示。

1.4 预报技巧评分

为了对各组试验的预报结果进行定量评估, 采用基于领域的预报技巧评分 FSS(fraction skill score)(Roberts and Lean, 2008), 计算了各组试验模拟的雷达组合反射率因子的 FSS:

表 1 各组试验的名称缩写及简要描述

Table 1 Acronyms and description of the numerical simulation experiments		
试验名称缩写	预报窗口时长/h	简要描述
CTRL	6	无资料同化的控制试验
CDA	6	同化 4 h 地面常规观测资料
LDA	6	同化 4 h 闪电资料
LCDA	6	联合同化 4 h 地面常规观测和闪电资料

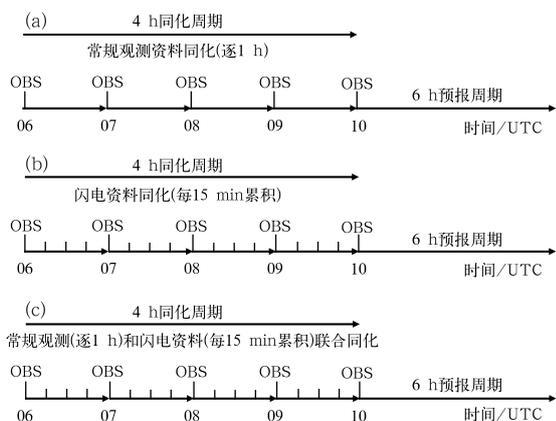


图 3 各组模拟试验的流程图

(a)地面常规观测资料同化, (b)闪电资料同化, (c)联合资料同化

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation experiments of (a) conventional surface observation data assimilation, (b) lightning data assimilation, and (c) joint data assimilation

$$FSS = 1 - \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i - p_o)^2}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_i)^2 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (p_o)^2} \quad (8)$$

式中: N 为验证区域中的网格点数, p_i 和 p_o 分别为预报和观测中的雷达组合反射率因子超过给定阈值的分数覆盖率(单位: %)。FSS 的值越接近于 1, 说明模拟结果与观测结果越接近。

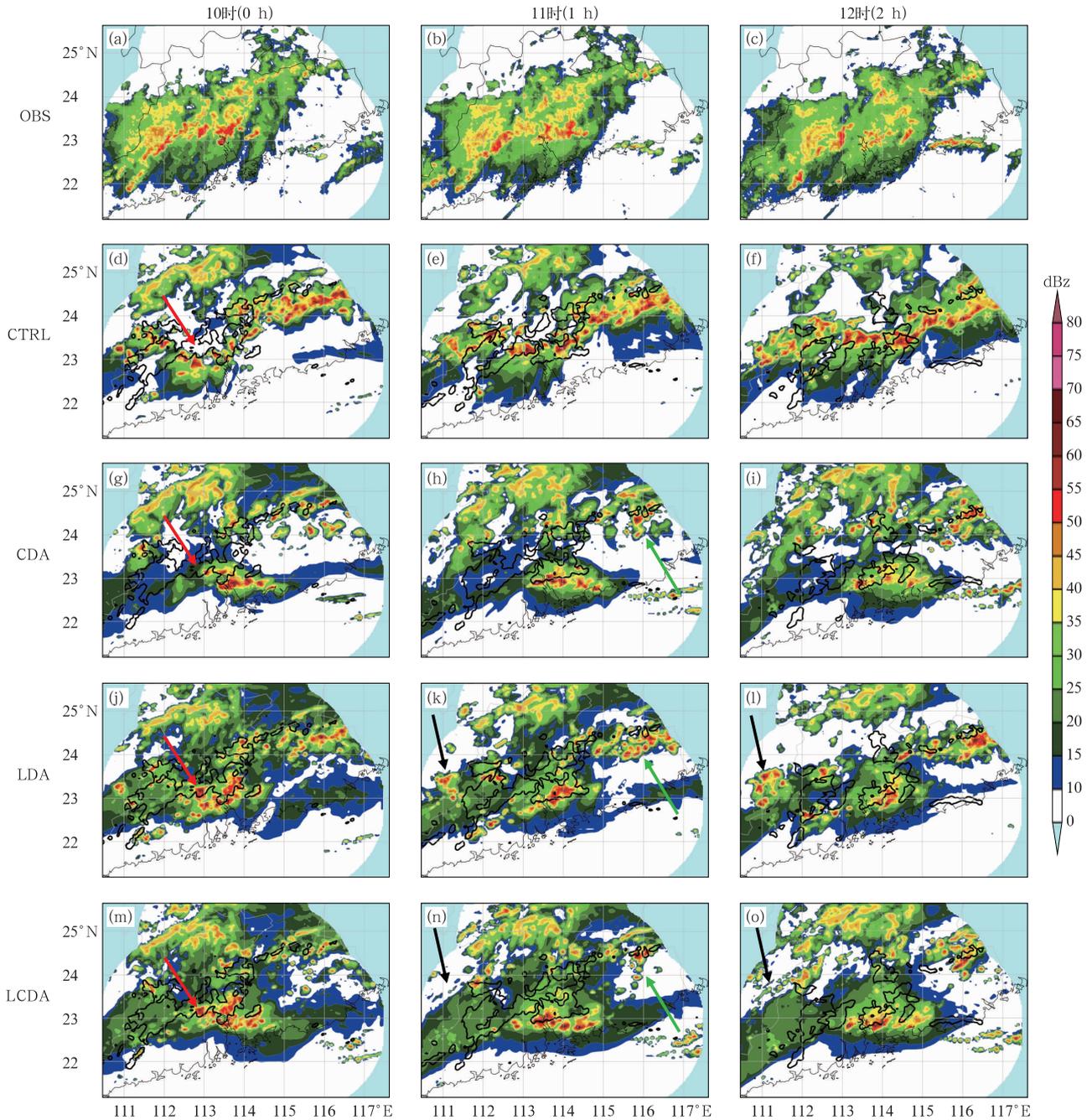
2 结果与分析

2.1 模拟结果分析

通过主观比较和预报技巧评分的方式, 对三组同化试验(CDA、LDA、LCDA)进行评估, 以探究联合同化闪电和地面常规观测资料相比只同化其中一种观测资料的改进效果。

将各组试验模拟的雷达组合反射率因子与地基雷达观测结果进行对比(图 4)。在同化期中,相比于 CTRL 和 CDA, LDA 和 LCDA 更好地模拟出了对流中心的位置,并成功模拟出了 23.3°N、113°E 附近的强对流,但是该区域的强对流在 CTRL 和 CDA

中未能被成功模拟(图 4 红色箭头)。在 LCDA 和 LDA 中,闪电资料的同化缩短了模式预热时间,对流系统在同化期的第一个小时内就已经产生,而同时期的 CDA 和 CTRL 中,对流还未生成(图略)。



注:0 h 为同化期,1 h 和 2 h 为预报期。

图 4 2017 年 6 月 16 日 10—12 时(a~c)观测及(d~o)各组试验模拟(填色)和观测(等值线, ≥35 dBz)的雷达组合反射率因子

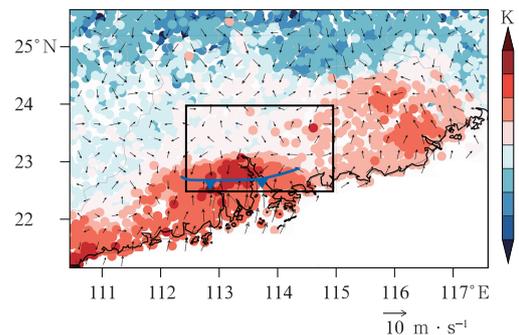
Fig. 4 Composite radar reflectivity factor of (a~c) observations, (d~o) experiments (colored) and observations (contour, ≥35 dBz) from 10:00 UTC to 12:00 UTC 16 June 2017

对于广东省东北部的虚假对流(图 4 绿色箭头), CDA 中虚假对流被抑制, 而在 LDA 中, 抑制效果并不明显。相比之下, LCDA 在准确模拟出对流活动的同时, 对上述虚假对流抑制更明显。同时, LCDA 还成功抑制了 LDA 中广东省西部地区出现的虚假强对流(图 4 黑色箭头)。地面常规观测资料在同化周期内的引入, 减少了大尺度范围内地面温度、风速、水汽的误差, 改善了要素场的分布情况, 进而减小了模式对对流活动的模拟误差, 抑制了部分虚假对流的产生, 使得对流活动的空间分布准确度也得到了提高。

在预报期内, CTRL 和 CDA 中模拟的对流中心位置明显偏离于雷达观测的对流中心。相比之下, LDA 和 LCDA 更准确地预报出了对流中心的位置和空间范围。然而, LCDA 和 LDA 对于广东省西部对流区域的模拟均不理想, 这是由于在同化窗口中该区域观测到的闪电非常少, 缺少对流云的信息。此外 LCDA 中的虚假对流也要明显弱于 CTRL 和 LDA 试验中对应区域的虚假对流。由于大多数闪电产生于对流系统的对流区域, 不能很好地反映层状云区域的信息(Lund et al, 2009), 导致 LCDA 对于层状云区域模拟范围与观测值的结果偏

差较大, 而层状云区的信息对对流活动的模拟结果有很大影响(Peters and Schumacher, 2014)。随着时间的推移, 一些对流单体在预报期中并没有被维持, 模拟结果与观测结果之间逐渐出现偏差。

为了研究联合资料同化对模式热动力场的影响, 解释其对强对流天气预报准确度提升的原因, 对模式模拟的 2 m 气温和 10 m 风场与观测进行对比。如图 5、图 6 中方框所示, CTRL 中强对流部分



注: 方框表示对流区域, 蓝线表示阵锋, 下同。

图 5 2017 年 6 月 16 日 10 时 2 m 气温(彩色圆点)和 10 m 风场(风矢)观测

Fig. 5 Observed 2 m temperature (colored dot) and 10 m wind field (wind vector) at 10:00 UTC 16 June 2017

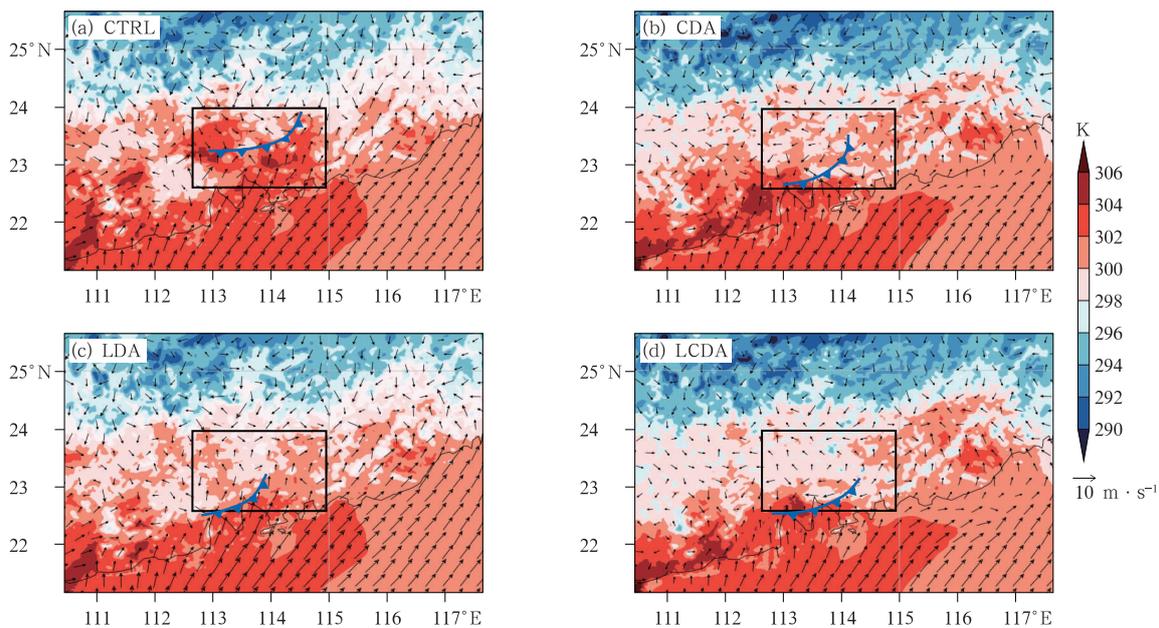


图 6 2017 年 6 月 16 日 10 时不同试验 2 m 气温(填色)和 10 m 风场(风矢)的模拟结果

Fig. 6 Simulated 2 m temperature (colored) and 10 m wind field (vector) in different experiments at 10:00 UTC 16 June 2017

区域的模拟温度比观测结果高 4~6 K, 即其模拟的冷池范围小于实际观测。模式初始温度场的偏差和相应的冷锋误差是导致 CTRL 的对流过程模拟失败的主要原因。相比于 CTRL, LDA 中的冷池范围变大, 但仅对对流发生区域的温度场进行了调整。而 CDA 对整个模拟区域的温度场进行了调整, 降低了整个模拟区域 2 m 气温的误差, 但冷池范围相比 LDA 更小。相比于其他三组试验, LCDA 在对流

区域 2 m 气温误差为 1~2 K, 冷池范围更大, 更加接近观测值, 且其阵风锋的位置更接近实况。LCDA 通过同化大范围的地面观测资料调整了非对流区域的温度场, 进一步提高了地面冷池的准确度。

图 7 为各试验分析场中的 10 m 经向风速和纬向风与地面观测结果的偏差。相较于 CTRL, CDA 降低了整个模拟区域 10 m 经向风和纬向风的误差, 大部分地区减少了约 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。LDA 对风场

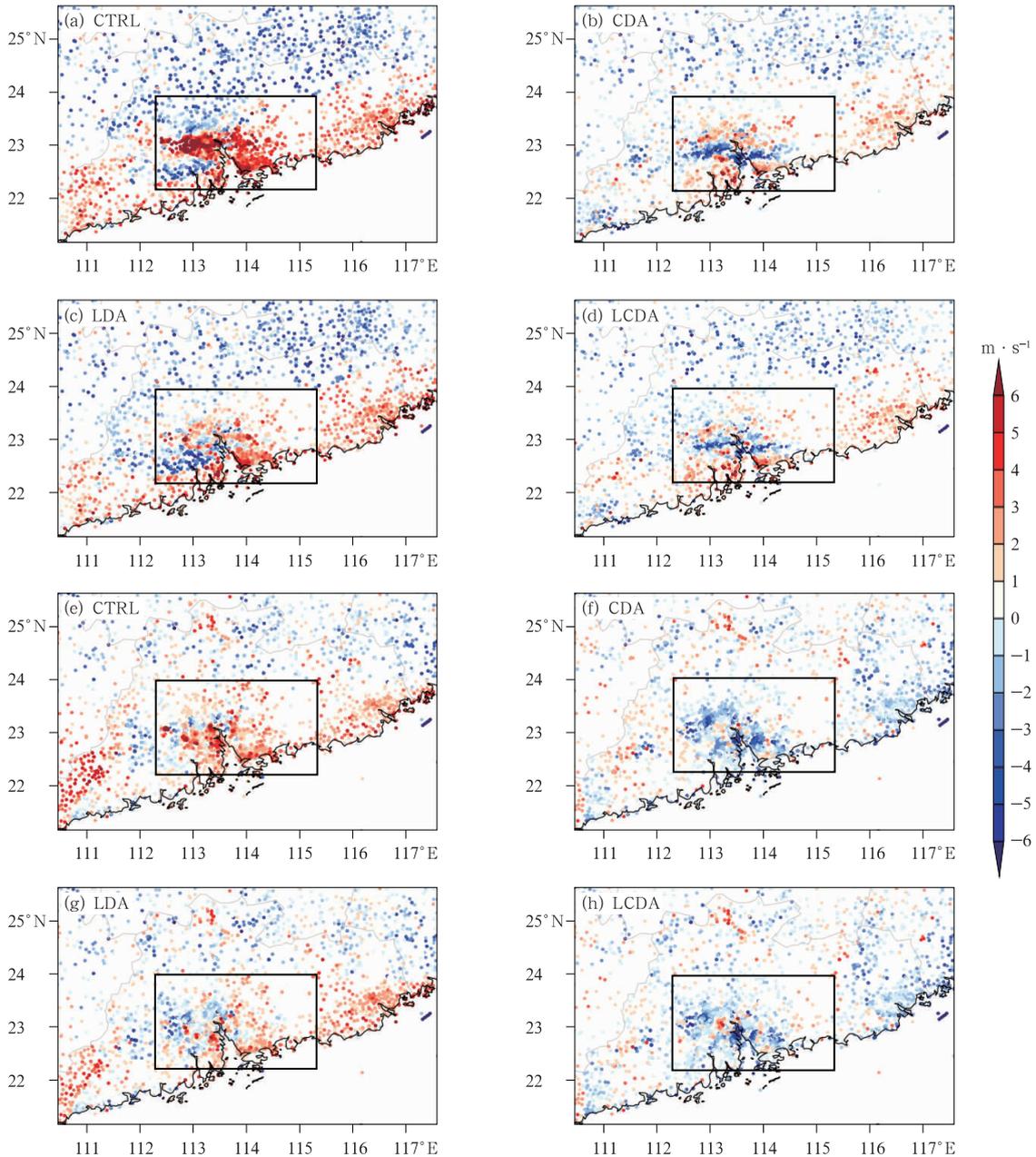


图 7 2017 年 6 月 16 日 10 时不同试验中(a~d)10 m 经向风和(e~h)10 m 纬向风的风速与地面观测的偏差

Fig. 7 Biases of simulated (a~d) 10 m V and (e~h) 10 m U wind components in different experiments relative to observations at 10:00 UTC 16 June 2017

的改善主要体现在强对流区域, 整体上对于水平风场的改善效果不及 CDA。LCDA 对 10 m 经向风场的误差减小更为显著。CTRL 中强对流部分区域的 10 m 经向风风速的误差约 $4\sim 5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 而这一误差在 LCDA 中被减小到了 $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此, 相比于 LDA, LCDA 进一步减小了水平风场的误差。

如图 8 所示, 在 CTRL 中, 广东省西南部地区的大气偏干, 水汽含量相对较少, 不利于强对流的产生, 而 LCDA 试验同化周期中广东西南部的水汽更充沛, 为中尺度对流系统的发展提供了水汽条件。LDA 试验中的水汽质量混合比仅在闪电发生区域得到相应调整, 在没有闪电发生的区域对水汽误差

改善并不明显。CDA 试验通过同化地面常规观测资料, 地面水汽的整体分布得到调整。在 LCDA 试验中, 强对流区域的地面水汽质量混合比误差得到进一步减小, 约为 $0.001\sim 0.002\text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 水汽的整体分布也更加接近观测值。LCDA 通过补充大范围地面常规观测资料的水汽信息, 较 LDA 进一步缩小了大范围水汽场的误差。然而, 在后续预报期内, 中尺度对流系统北部的水汽含量较少, 导致向东南方向推进的阵风锋未能持续激发出新的对流(图略)。

图 9 为各组循环同化试验中 2 m 气温和 2 m 水汽质量混合比的均方根误差(RMSE)。在同化期

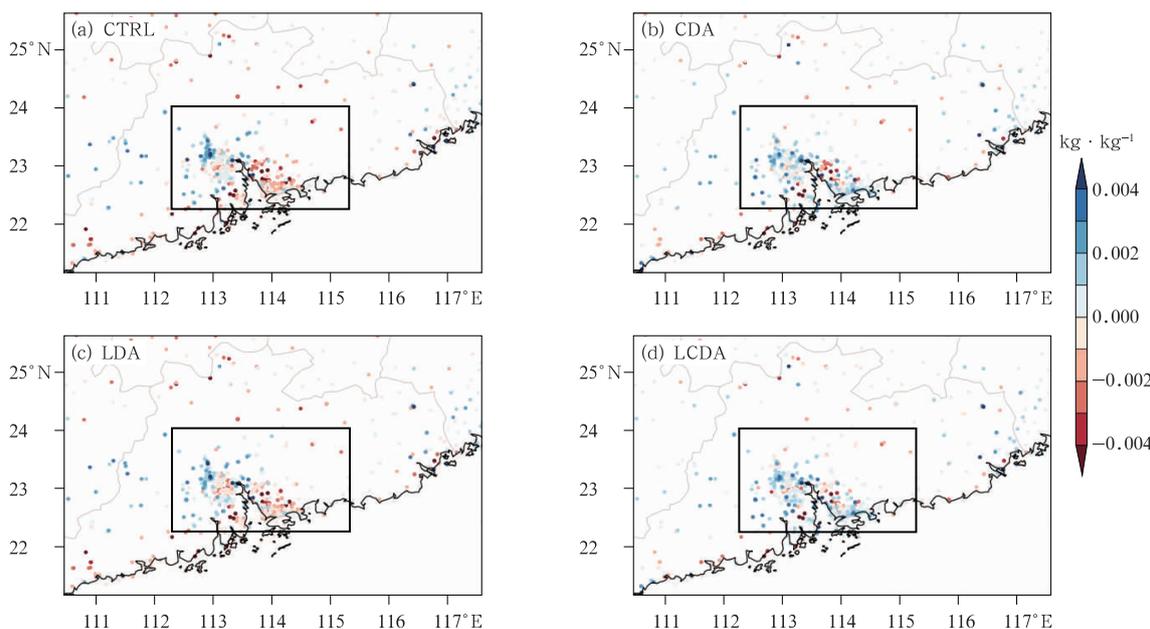


图 8 2017 年 6 月 16 日 10 时不同试验中 2 m 水汽质量混合比与地面观测的偏差

Fig. 8 Biases of simulated 2 m vapor mass mixing ratio in different experiments relative to observations at 10:00 UTC 16 June 2017

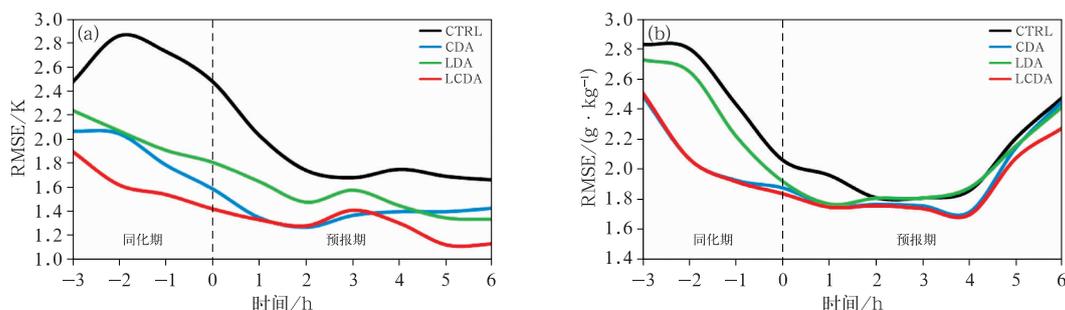


图 9 同化 4 h 观测资料试验的均方根误差

(a) 2 m 气温, (b) 2 m 水汽质量混合比

Fig. 9 RMSE of (a) 2 m temperature and (b) 2 m vapor mass mixing ratio in 4 h data assimilation experiments

中,对于气温和水汽的模拟,各组同化试验相较于 CTRL 都有一定程度的改善。在大部分时刻,联合同化试验 LCDA 中温度、水汽含量的均方根误差更小,例如,10 时 CTRL 中的 2 m 气温 RMSE 为 2.48 K, LDA、CDA 和 LCDA 的 RMSE 分别为 1.92、1.59 和 1.46 K。此外,LCDA 和 CDA 中水汽质量混合比的 RMSE 较其他试验也更小。

2.2 预报技巧评分

图 10 为以 24 km 容错半径(即 8 个模式网格点)和 40 dBz 阈值为基准的 FSS 技巧评分结果。40 dBz 的雷达组合反射率因子被选择为表征对流区域的反射率因子阈值。同化期内联合同化试验 LCDA 的 FSS 评分较其他试验更高。CDA 由于缺少闪电资料提供的对流区域内的信息, FSS 评分低于包含闪电资料同化的试验(LDA 和 LCDA)。这是由于闪电资料同化在观测到闪电的区域引入了潜热增量,促进了上升运动,此外同化过程中引入的霰粒子质量混合比增量通过冷云降水过程更快地在背景场中形成冷池和阵风锋,促进对流系统的进一步发展。在预报期的前 4 h 内, CDA 的 FSS 评分高于 LDA, LCDA 的 FSS 评分仍然略高于 LDA 和 CDA (图 10)。这是由于联合资料同化窗口中模拟出的大气温、压、湿、风以及微物理信息,以及更准确的对流云、阵风锋的位置使得 LCDA 在预报周期中的模拟也更为准确。综上所述,相比于只同化一种观测资料,闪电资料和地面常规观测资料联合同化可以进一步提高模式对对流区域的预报准确度。

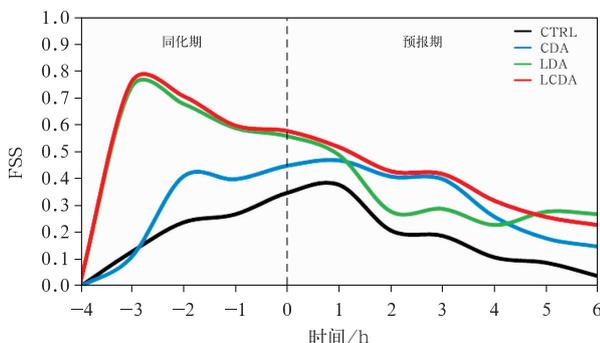


图 10 同化 4 h 观测资料的雷达反射率因子 FSS 技巧评分

Fig. 10 FSS of composite radar reflectivity factor in 4 h data assimilation experiments

3 结论与讨论

本研究以 2017 年 6 月 16 日发生在广东省的一次中尺度对流过程为例,分析了联合同化上述两种资料相比于只同化其中一种资料对中尺度对流系统模拟和预报的改进作用,结果显示:

(1)相比于无资料同化的控制试验,单独同化地面常规观测资料、闪电观测资料以及联合同化地面常规观测资料和闪电资料均提高了对该中尺度对流系统的模拟和预报准确度。

(2)相比于只同化地面常规观测资料的试验,联合同化常规和闪电观测资料试验更好地模拟出了对流中心的位置和整体形态,并成功模拟出了漏报的对流。在同化窗口中,联合同化试验的 FSS 预报技巧评分显著高于地面常规观测资料同化试验,在之后的预报周期中其 FSS 预报技巧评分整体略高于地面常规观测资料同化试验。这是由于闪电资料的引入通过潜热、霰粒子质量混合比增量,提高了背景场中上升气流、冷池和阵风锋的准确度,进而改善了对该对流系统的模拟准确度。

(3)相比于只同化闪电观测资料,联合同化试验中地面常规观测资料的引入减小了更大范围温度、水汽、风场的背景场误差,抑制了部分地区虚假对流的发展,整体上提高了对该对流系统的模拟准确度。

需要指出的是,本研究为个例研究,后续的研究中将连续的、大量的、不同类型的强对流天气个例进行试验,对闪电和地面常规观测资料联合同化的效果进行更为系统性的评估。此外,使用具有流依赖背景场误差协方差特征的 EnKF 同化方法对闪电资料和地面常规观测资料进行联合同化也是下一步研究的重点内容。

参考文献

- 崔春光,杜牧云,肖艳姣,等,2021. 强对流天气资料同化和临近预报技术研究[J]. 气象,47(8):901-918. Cui C G, Du M Y, Xiao Y J, et al, 2021. Study on the technique of data assimilation and nowcasting of severe convective weather[J]. Meteor Mon, 47(8):901-918(in Chinese).
- 龚建东,2013. 同化技术:数值天气预报突破的关键——以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例[J]. 气象科技进展,3(3):6-13. Gong J D, 2013. Data assimilation: a key technology for NWP—technical review of data assimilation in ECMWF[J]. Adv Meteor Sci Technol, 3(3):6-13(in Chinese).
- 何邓新,赖安伟,康兆萍,等,2021. 闪电资料在快速更新同化系统中

- 的应用研究[J]. 气象, 47(8):995-1008. He D X, Lai A W, Kang Z P, et al, 2021. Application of lightning data to high-resolution rapid refresh assimilation system[J]. Meteor Mon, 47(8):995-1008(in Chinese).
- 何光碧, 屠妮妮, 张利红, 等, 2013. 青藏高原东侧一次低涡暴雨过程地形影响的数值试验[J]. 高原气象, 32(6):1546-1556. He G B, Tu N N, Zhang L H, et al, 2013. Numerical experiment of terrain effect of vortex rainstorm process on east side of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteor, 32(6):1546-1556(in Chinese).
- 矫梅燕, 龚建东, 周兵, 等, 2006. 天气预报的业务技术进展[J]. 应用气象学报, 17(5):594-601. Jiao M Y, Gong J D, Zhou B, et al, 2006. An overview of the development of weather forecasting[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5):594-601(in Chinese).
- 孟智勇, 唐晓静, 岳健, 等, 2019. 地面和探空资料的 EnKF 同化对北京 7·21 极端暴雨模拟的影响[J]. 北京大学学报(自然科学版), 55(2):237-245. Meng Z Y, Tang X J, Yue J, et al, 2019. Impact of EnKF surface and rawinsonde data assimilation on the simulation of the extremely heavy rainfall in Beijing on July 21, 2012[J]. Acta Sci Nat Univ Pekinensis, 55(2):237-245(in Chinese).
- 邵长亮, 闵锦忠, 2019. 基于地面资料集合均方根滤波同化方案的京津冀暴雨模拟研究[J]. 气象学报, 77(2):233-242. Shao C L, Min J Z, 2019. A numerical study of the rainstorm in Beijing-Tianjin-Hebei Region based on assimilation of surface AWS data using the ensemble square root filter[J]. Acta Meteor Sin, 77(2):233-242(in Chinese).
- 盛春岩, 荣艳敏, 刘诗军, 等, 2018. 一次局地大暴雨的地面观测资料同化预报试验研究[J]. 海洋气象学报, 38(4):71-80. Sheng C Y, Rong Y M, Liu S J, et al, 2018. Numerical study of surface data assimilation to a local torrential rain forecast[J]. J Mar Meteor, 38(4):71-80(in Chinese).
- 师春香, 潘畅, 谷军霞, 等, 2019. 多源气象数据融合格点实况产品研发进展[J]. 气象学报, 77(4):774-783. Shi C X, Pan Y, Gu J X, et al, 2019. A review of multi-source meteorological data fusion products[J]. Acta Meteor Sin, 77(4):774-783(in Chinese).
- 王平, 王晓峰, 张蕾, 等, 2017. 地面观测资料在快速更新同化系统中的敏感性试验[J]. 气象, 43(8):901-911. Wang P, Wang X F, Zhang L, et al, 2017. Sensitivity analysis of surface observation data in WRF-ADAS rapid refresh system[J]. Meteor Mon, 43(8):901-911(in Chinese).
- 王宇, 鄒秀书, 王东方, 等, 2015. 北京闪电综合探测网(BLNET): 网络构成与初步定位结果[J]. 大气科学, 39(3):571-582. Wang Y, Qie X S, Wang D F, et al, 2015. Beijing Lightning Network (BLNET): configuration and preliminary results of lightning location[J]. Chin J Atmos Sci, 39(3):571-582(in Chinese).
- 徐国强, 黄守友, 赵晨阳, 2020. FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究[J]. 气象, 46(9):1165-1177. Xu G Q, Huang S Y, Zhao C Y, 2020. Influence of FY-4A lightning data on numerical forecast of convective weather[J]. Meteor Mon, 46(9):1165-1177(in Chinese).
- 张鑫宇, 陈敏, 孙娟珍, 等, 2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用[J]. 气象学报, 79(1):104-118. Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al, 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA[J]. Acta Meteor Sin, 79(1):104-118(in Chinese).
- 周易, 江志红, 邱欣, 等, 2016. WRF 模式与自动站资料同化相结合的辽宁高分辨 2012 年 1 月气温场建立试验[J]. 气象科学, 36(5):639-646. Zhou Y, Jiang Z H, Qiu X, et al, 2016. Construct experiment for high resolution temperature field of Liaoning in January 2012 combined with WRF model and automatic weather station data assimilation[J]. J Meteor Sci, 36(5):639-646(in Chinese).
- Bullock O R, Alapaty K, Herwehe J A, et al, 2014. An observation-based investigation of nudging in WRF for downscaling surface climate information to 12-km grid spacing[J]. J Appl Meteor Climatol, 53(1):20-33.
- Carey L D, Bain A L, Matthee R, 2014. Kinematic and microphysical control of lightning in multicell convection over Alabama during DC3[R]. Tucson; 23rd International Lightning Detection Conference.
- Cressman G P, 1959. An operational objective analysis system[J]. Mon Wea Rev, 87(10):367-374.
- Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al, 2003. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for environmental prediction operational mesoscale Eta model[J]. J Geophys Res Atmos, 108(D22):8851.
- Grell G A, Freitas S R, 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for weather and air quality modeling[J]. Atmos Chem Phys, 14(10):5233-5250.
- Guo F X, Lu G Y, Wu X, et al, 2016. Occurrence conditions of positive cloud-to-ground flashes in severe thunderstorms[J]. Sci China Earth Sci, 59(7):1401-1413.
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al, 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. J Geophys Res Atmos, 113(D13):D13103.
- Janjić Z I, 1994. The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes[J]. Mon Wea Rev, 122(5):927-945.
- Kong R, Xue M, Fierro A O, et al, 2020. Assimilation of GOES-R geostationary lightning mapper flash extent density data in GSI EnKF for the analysis and short-term forecast of a mesoscale convective system[J]. Mon Wea Rev, 148(5):2111-2133.
- Lin L F, Pu Z X, 2020. Improving near-surface short-range weather forecasts using strongly coupled land-atmosphere data assimilation with GSI-Enkf[J]. Mon Wea Rev, 148(7):2863-2888.
- Liu C T, Cecil D J, Zipser E J, et al, 2012. Relationships between lightning flash rates and radar reflectivity vertical structures in thunderstorms over the tropics and subtropics[J]. J Geophys Res Atmos, 117(D6):D06212.
- Lund N R, MacGorman D R, Schuur T J, et al, 2009. Relationships between lightning location and polarimetric radar signatures in a

- small mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 137(12): 4151-4170.
- Makowski J A, MacGorman D R, Biggerstaff M I, et al, 2013. Total lightning characteristics relative to radar and satellite observations of Oklahoma mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 141(5): 1593-1611.
- Peters J M, Schumacher R S, 2014. Objective categorization of heavy-rain-producing MCS synoptic types by rotated principal component analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 142(5): 1716-1737.
- Ribaud J F, Bousquet O, Coquillat S, 2016. Relationships between total lightning activity, microphysics and kinematics during the 24 September 2012 HyMeX bow-echo system[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 142(S1): 298-309.
- Roberts N M, Lean H W, 2008. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. *Mon Wea Rev*, 136(1): 78-97.
- Rudlosky S D, Fuelberg H E, 2013. Documenting storm severity in the Mid-Atlantic region using lightning and radar information[J]. *Mon Wea Rev*, 141(9): 3186-3202.
- Ruggiero F H, Sashegyi K D, Madala R V, et al, 1996. The use of surface observations in four-dimensional data assimilation using a mesoscale model[J]. *Mon Wea Rev*, 124(5): 1018-1033.
- Sun H, Wang H L, Yang J, et al, 2022. Improving forecast of severe oceanic mesoscale convective systems using FY-4A lightning data assimilation with WRF-FDDA[J]. *Remote Sens*, 14(9): 1965.
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al, 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: implementation of a new snow parameterization[J]. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115.
- Wang H L, Liu Y B, Cheng W Y Y, et al, 2017. Improving lightning and precipitation prediction of severe convection using lightning data assimilation with NCAR WRF-RTFDDA[J]. *J Geophys Res Atmos*, 122(22): 12296-12316.
- Wang H L, Liu Y B, Zhao T L, et al, 2018. Continuous assimilation of lightning data using time-lagged ensembles for a convection-allowing numerical weather prediction model[J]. *J Geophys Res Atmos*, 123(17): 9652-9673.
- Wang H L, Yuan S Q, Liu Y B, et al, 2022. Comparison of the WRF-FDDA-based radar reflectivity and lightning data assimilation for short-term precipitation and lightning forecasts of severe convection[J]. *Remote Sens*, 14(23): 5980.
- Xiao X, Qie X, Chen Z X, et al, 2021. Evaluating the performance of lightning data assimilation from BLNET observations in a 4DVar-based weather nowcasting model for a high-impact weather over Beijing[J]. *Remote Sens*, 13(11): 2084.
- Yang J, Zhang Z Q, Wei C Y, et al, 2017. Introducing the new generation of Chinese geostationary weather satellites, Fengyun-4[J]. *Bull Am Meteor Soc*, 98(8): 1637-1658.
- Zhang Y J, Lü W T, Chen S D, et al, 2016. A review of advances in lightning observations during the past decade in Guangdong, China[J]. *J Meteor Res*, 30(5): 800-819.

(本文责编:张芳)