

文章编号:2096 - 5389(2022)03 - 0025 - 07

C 波段雷达资料同化对 GRAPES 中尺度数值模式短临降水预报的影响

齐大鹏, 杨 静, 李彦霖, 周明飞, 朱文达

(贵州省气象台, 贵州 贵阳 550002)

摘 要:将 C 波段雷达资料用 LAPS 模式的云分析系统进行反演, 并采用 Nudging 技术将反演得到的云微物理场引入 GRAPES 中尺度数值模式, 结合 1 次强降水天气过程的模拟实验, 研究了 C 波段雷达资料同化对 GRAPES 中尺度数值模式短临降水预报的影响。结果表明:①雷达资料同化能够改进中尺度模式的降水预报, 模式前 6 h 的降水预报相关系数和不同等级降水 TS 评分都有提高, 同时降水峰值提前了 1 h, 有助于缓解模式 spin - up 问题。②模式降水预报的改进效果主要由强降水贡献, 最大改进效果集中在 4 ~ 6 h。③同化雷达资料后 25 mm 以上强降水预报站数比更接近实况, 落区偏差幅度更小, 降水落区和强度向实况方向得到调整。④10 mm 以下弱降水在吸收雷达资料后, 站数比相较于控制预报, 比实况增加更多, 落区偏差幅度增大, 存在预报过量的问题。弱降水预报过量主要集中在 4 ~ 6 h, 而前 3 h 对降水预报的改进有积极作用。

关键词:C 波段雷达; 雷达同化; GRAPES 模式; 短临预报

中图分类号:TN957.52+5 **文献标识码:**A

The Influence of C - band Radar Data Assimilation on the Short Impending Precipitation Forecast of the GRAPES Mesoscale Numerical Model

QI Dapeng, YANG Jing, LI Yanlin, ZHOU Mingfei, ZHU Wenda

(Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002, China)

Abstract: The C - band radar data is inverted with the LAPS model cloud analysis system, and the cloud microphysical field obtained from the inversion is introduced into the GRAPES mesoscale numerical model using Nudging technology, combined with a simulation experiment of a heavy precipitation weather process to study the influence of C - band radar data assimilation on the short - term precipitation forecast of GRAPES mesoscale numerical model. The results show that: ① Radar data assimilation can improve the precipitation forecast of the mesoscale model. The precipitation forecast correlation coefficient and TS scores of different grades of precipitation in the first 6 hours of the model have been improved. At the same time, the precipitation peak is advanced by 1 hour, which helps to alleviate the model spin - up problem. ② The improvement effect of model precipitation forecast is mainly contributed by heavy precipitation, and the maximum improvement effect is concentrated in 4 ~ 6 hours. ③ After assimilating the radar data, the number of forecasting stations for heavy precipitation above 25 mm is closer to the actual situation, the deviation of the falling area is smaller, and the precipitation falling area and intensity are adjusted to the actual direction. ④ After absorbing radar data for weak precipitation below 10 mm, the number of stations comparison control forecast increased more than the actual situation, the deviation range of the landing area increased, and there was a problem of excessive forecasting. The weak precipitation forecast is mainly concentrated in 4 ~ 6 hours, and the first 3 hours have a positive effect on the improvement of precipitation forecast.

收稿日期:2021 - 07 - 15

第一作者简介:齐大鹏(1988—),男,工程师,主要从事雷达气象和短临预报研究工作,E - mail:dpqnju@126.com。

资助项目:贵州省气象局科研业务项目(黔气科登[2021]05 - 01 号);贵州 C 波段雷达资料在 GRAPES 中尺度数值模式中的同化研究。

Key words: C-band radar; radar assimilation; GRAPES model; short term prediction

0 引言

短临预报一直是天气预报业务关注的重点和难题。中尺度数值模式由于时空分辨率高,同时又实现了快速循环同化更新,有效地提高了短临天气预报的质量。但是,由于模式初始场中没有包含非绝热参数,业务预报系统面临的一个首要问题是不可避免的“Spin-up”现象,导致模式前几个小时的预报特别是降水预报的质量普遍不高^[1]。为解决这一问题,目前已研究出一些利用多普勒天气雷达资料反演大气三维风场、温度场和云微物理场的方法,使得模式在初始时刻就包含了云的微物理特征,改进了模式积分初始场,提高了模式的短临天气预报质量。如王瑾等^[2]用 ARPS 模式的资料三维同化系统 ARPS3DVAR 和复杂云分析模块同化雷达资料后,发现模式在初始时刻就能够调整出一个合理的云微物理量场,减少了模式的热启动时间。张蕾等^[3]的研究表明 S 波段雷达资料同化对一次暴雨过程的降水预报效果有明显提高。李平等^[4]利用 ARPS 模式进行了 C 波段雷达反射率资料同化实验,结果表明雷达资料引入模式初始场后,模式的回波和降水预报效果都有一定提高。上述研究多基于 WRF 和 ARPS 模式,而在 GRAPES 模式方面,张艳霞等^[5]用多普勒雷达资料调整 GRAPES 模式云参数,发现模式初始场中水汽场的修订,尤其是饱和水汽的修订,对模式预报的水汽场有明显影响,从而影响到环流场,改善了模式的雷达回波和降水的预报。张诚忠等^[6]在热启动的基础上,考虑同化雷达反演的水汽后,不仅较好地模拟了前 6 h 的降水,也可以预报出 6~12 h 的降雨带变化趋势。高郁东等^[7]在模式中同化雷达降水率资料后不仅改进了降水分布,而且还能清晰地表现出中尺度对流系统的发展和消亡。张诚忠等^[8]在雷达反演潜热的基础上,评估了潜热对模式短临降水预报的影响,发现通过同化雷达反演的潜热显著提高了模式短临降水预报效果。

上述研究表明通过在模式中同化雷达资料,能够提高模式的短临预报能力,然而针对贵州复杂地形条件下雷达资料同化对模式的影响研究较少,单纯的数值模拟预报偏差较大^[9-10]。本文利用贵州区域 C 波段雷达资料,通过 1 个强降水天气过程的模拟实验,分析和讨论 C 波段雷达资料同化对 GRAPES 中尺度数值模式在贵州的短临降水预报的

影响。

1 资料和方法

1.1 资料来源

本文所用资料有雷达数据、雨量观测数据和 NCEP 的 GFS 全球模式预报数据。雷达资料来自 2017 年 7 月 9 日 02 时贵州区域内 7 部 CD 型号多普勒天气雷达(贵阳、遵义、都匀、黔东南、铜仁、毕节、兴义)观测的基本反射率因子,雷达体扫模式为 VCP21(6 min 扫描 9 个仰角),空间分辨率 250 m,最大探测距离 250 km,鉴于雷达观测存在静锥区以及电磁波衰减,只选择距离雷达站 50~150 km 内的数据进行反演同化。降水观测资料用于模式检验,选取 2017 年 7 月 9 日 02—08 时贵州区域内 1562 个严格考核有质量保障的地面自动站质控后的降水观测数据,时间分辨率为 1 h。NCEP 数据为 GFS 全球模式 2017 年 7 月 8 日 20 时—9 日 08 时的预报结果,时间间隔 6 h,空间分辨率 0.25°,该数据用于为模拟实验提供初始场和边界条件。本文中的时间如无说明均指北京时(BJT)。

1.2 雷达资料前处理方法

雷达资料前处理包括雷达资料质控、坐标转换、雷达组网拼图,多部雷达组网拼图时采用最邻近最大值原则进行(方法略)。

1.2.1 雷达反射率质控 贵州地处高原东侧,地形复杂,雷达回波地物遮挡严重,且 C 波段雷达雨区衰减较大,因此雷达反射率资料在同化前需要做必要的质量控制。李丰等^[11]在现有 S 波段雷达地物识别方法的基础上,对 C 波段雷达地物回波特征进行分析,改进了识别参数的隶属函数,建立适合 C 波段多普勒天气雷达的地物识别方法(MCC 方法)。检验表明该方法可显著提高 C 波段雷达地物回波的识别正确率,并可减少层状云降水回波的误判。

该方法依据地物回波主要出现在较低的仰角、回波径向速度较小、没有明显移动、回波垂直变化大等特征,计算了 4 个能明显区分 C 波段雷达地物回波和降水回波的因子(回波纹理变率、回波垂直变率、回波库间变率、中值滤波径向速度),利用隶属函数对各个识别因子进行模糊化处理,并对模糊权重求和得到识别指数 IAPI。当 IAPI ≥ 0.6 时,识别为地物回波,给予消除。在地物回波识别剔除之前,还进行了孤立回波消除,质控算法详细介绍参见文献[9]。

1.2.2 雷达资料坐标转换 雷达观测资料为球坐标,需要转换成与模式相匹配的三维格点坐标。坐标转换方法采用三线性插值方法,分别沿方位角 θ 、径向 r 、仰角 φ 3 个方向进行插值得到格点上的反射率因子。

假设笛卡尔坐标中位于 (x, y, z) 处的格点,经坐

$$\begin{cases} Z_1 = Z(r_{n+1}, \theta_i, \varphi_j) - \frac{Z(r_{n+1}, \theta_i, \varphi_j) - Z(r_n, \theta_i, \varphi_j)}{r_{n+1} - r_n} (r_{n+1} - r) \\ Z_2 = Z(r_{n+1}, \theta_{i+1}, \varphi_j) - \frac{Z(r_{n+1}, \theta_{i+1}, \varphi_j) - Z(r_n, \theta_{i+1}, \varphi_j)}{r_{n+1} - r_n} (r_{n+1} - r) \\ Z(r, \theta, \varphi_j) = Z_2 - \frac{Z_2 - Z_1}{\theta_{i+1} - \theta_i} (\theta_{i+1} - \theta) \end{cases} \quad (1)$$

通过式(1)可得点 (r, θ, φ) 在它的 2 个相邻仰角的高仰角锥面上垂直投影点 (r, θ, φ_j) 处的反射率 $Z(r, \theta, \varphi_j)$ 。同理可得低仰角上的反射率 $Z(r, \theta, \varphi_{j-1})$ 。插值过程如图 1 所示。

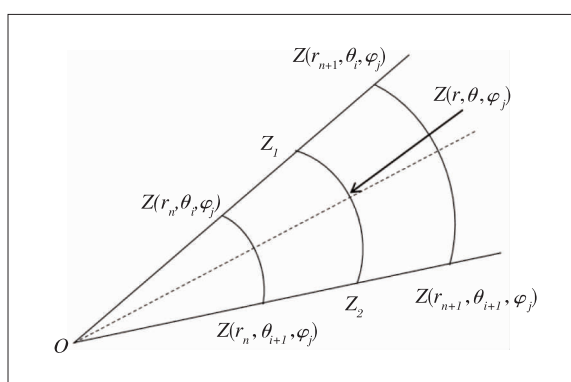


图 1 双线性插值示意图

Fig. 1 Bilinear interpolation diagram

再用这 2 个回波值按仰角线性插值(式 2),即可得到笛卡尔坐标中网格点上的值 $Z(x, y, z)$ 。

$$Z(x, y, z) = Z(r, \theta, \varphi) = Z(r, \theta, \varphi_j) - \frac{Z(r, \theta, \varphi_j) - Z(r, \theta, \varphi_{j-1})}{\varphi_j - \varphi_{j-1}} (\varphi_j - \varphi) \quad (2)$$

1.3 同化方法

目前有多种雷达资料同化方法,张诚忠等^[12],徐道生等^[13]比较了几种不同的雷达回波反演技术,发现利用 LAPS 系统云分析方案反演云物理量并用 Nudging 技术调整模式水汽场是一套比较适合华南区域高分辨率模式的技术路线。

1.3.1 云微物理量反演方法 LAPS 云分析模块主要分析产品包括三维的云量场、云水及云冰混合比、云及降水类型、结冰严重指数、雹混合比、云底及云顶高度等^[2]。本文云微物理量反演采用张兰等^[14]提出的方法,利用 LAPS 云分析系统对云水(q_c)和雨水(q_r) 2 个微物理量进行反演。首先利

用模式背景场的气压和温度计算空气密度,然后根据雷达回波反演 q_r ,公式如下:

$$q_r = \frac{10^{\left(\frac{dbz-43.1}{17.5}\right)}}{\rho} \quad (3)$$

其中, ρ 为空气密度, dbz 为雷达反射率因子。

云水(q_c)由雨水(q_r)及其下落末速度计算得到,下落末速度计算公式如下:

$$V_t = 5.40 \times \left(\frac{P_s}{P}\right)^{0.4} \times q_r^{0.125} \quad (4)$$

其中, V_t 为下落末速度, P 为各层气压, P_s 为地面气压, q_r 为雨水。

为了获得 q_c ,还需要计算 1 个与水成物降落有关的量 i_r :

$$i_r = \frac{q_{r1} \times v_{t1} \times \rho_1 - q_{r2} \times v_{t2} \times \rho_2}{(dbz_1 - dbz_2) \times \rho} \quad (5)$$

其中,下标 1 和 2 表示相邻 2 层变量,其余项意义同上。

最后,根据 i_r 和 q_r 计算出 q_c ,公式如下:

$$q_c = \frac{-i_r}{0.002 \times q_r^{0.875}} \quad (6)$$

1.3.2 Nudging 方法 Nudging 是在模式积分的同化时段 δt 内,在预报方程中增加一个线性强迫项,该项与模式预报值和实况值之差成正比,其作用是使模式预报逐渐向观测逼近^[15-16]。

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \sum F_i + \alpha(W_0 - W) \quad (7)$$

W 为模式预报变量, $\sum F_i$ 代表模式中的所有物理过程变率, $\alpha > 0$ 为张弛逼近系数, W_0 为对应时刻的观测值。将方程(1)对时间进行积分,并采用准隐式分步计算方法写成离散形式如下:

$$W^t = W_m^t + \alpha'(W_0^t - W_m^t) \quad (8)$$

其中, $\alpha' = \alpha \times \delta t$, 式中 W_m^t 为模式积分第 t 步的预报值; W_0^t 为同时刻的观测值(或反演值); $1 > \alpha'$

>0 , 本文仍称作张弛逼近系数, 其取值视实际情况而定; dt 为积分时间步长; 为 W^t 经 Nudging 调整后的第 t 步预报值。同化时段取为 $\delta t = 30 \text{ min}$; 模式积分时间步长取 $dt = 60 \text{ s}$; 张弛逼近系数 α' 取为 0.5。

2 模式设计和个例实验

2.1 个例简介

2017 年 7 月 8—9 日, 受梅雨锋西段的影响, 贵州中南部出现了 1 次暴雨天气过程, 部分地区还出现了大暴雨。此次过程以稳定的层状云降水为主, 雷达回波以层状云回波为主。过程主要影响时段: 2017 年 7 月 8 日 20 时—9 日 16 时。9 日 02—08 时, 在锋面上有明显的带状回波自西北向东南影响贵州, 在贵州中南部造成了暴雨到大暴雨天气, 以下对该时段进行数值模拟实验。

2.2 模式和实验设计

模式采用华南精细预报模式, 该模式是基于 GRAPES 的高分辨率数值预报模式^[17]。模式范围: $96 \sim 123.36^\circ \text{E}$, $16 \sim 31.36^\circ \text{N}$, 水平分辨率 3 km, 模式其他参数设定同文献^[6]。

本文拟通过设计 2 种实验方案, 对 2017 年 7 月 9 日早晨发生在贵州中南部的暴雨天气过程进行模拟, 分析雷达资料同化对模式前 6 h 降水预报的影

响。设计方案 1 (Exp1): 当天 12 UTC NCEP 资料积分 6 h, 并将第 6 h 预报产品作为模式初始场; 设计方案 2 (Exp2): Exp1 背景场, 同化 18 UTC 雷达反射率因子后的分析场。

2.3 结果分析

图 2 展示了 2017 年 7 月 9 日 02—08 时累计降水观测实况 (图 2a) 及 Exp1 (图 2b) 和 Exp2 (图 2c) 2 组模拟实验预测的降水空间分布情况。从图 2a 可以看到, 此次过程强降水主要集中在贵州中南部, 强降水区域呈东北—西南向带状分布, 降水量级以中到大雨为主, 局地出现暴雨和大暴雨, 暴雨主要分布在黔南州中部和安顺市南部。对比实况和控制实验 (Exp1, 图 2b) 发现, Exp1 成功模拟出了这次强降水过程中东北—西南向的强降水雨带, 但是强降水位置较实况偏北且面积比实况更小。例如 Exp1 暴雨落区主要位于安顺市西北部, 而实况的暴雨面积更大且位置更加偏南。对比控制实验 Exp1 和对照实验 (Exp2, 图 2c) 可以发现, 同化雷达资料后的实验 Exp2 对强降水空间分布做了调整。可以明显看出, Exp1 实验在黔南州中部、安顺市南部没有预测暴雨, 存在漏报现象。Exp2 实验在这些区域预测了多个暴雨点, 虽然这些暴雨点面积较实况偏小, 但是较 Exp1 实验而言更加接近实况。

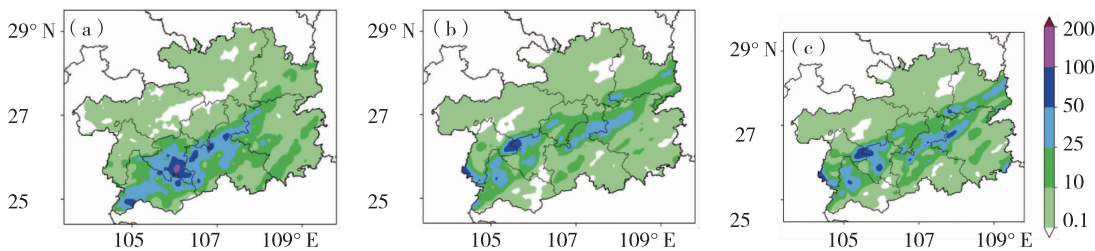


图 2 2017 年 7 月 9 日 02—08 时实况降水 (a) 和实验模拟 6 h 降水 (b. Exp1; c. Exp2)

Fig. 2 Actual precipitation (a) and simulated 6 h precipitation (b. Exp1; c. Exp2) at 02—08 on July 9th, 2017

为定量描述 2 组实验模拟的降水在雨带位置偏差和降水强度方面的差异, 利用 2017 年 7 月 9 日 02—08 时的累计降水实况和对应时段的预报降水, 分别计算了 5 ~ 50 mm 共 6 个等级的降水偏差幅度和站数比。降水实况选取贵州区域 1562 个质控后的雨量观测站数据, 预报降水为利用线性插值方法将模式输出的格点降水插值到 1562 个观测站上的数据, 结果如图 3 所示。

降水偏差幅度用于描述预报降水与实况之间空间位置的偏差程度, 计算公式如下:

$$B = \left| \frac{NA + NB}{NA + NC} - 1 \right| \quad (9)$$

其中, NA 为预报正确的站 (次) 数、 NB 为空报站 (次) 数、 NC 为漏报站 (次) 数。 NA 、 NB 、 NC 由表 1 给出, 表中 T 为降水量级。 B 为介于 0 ~ 1 之间的数, 数值越小说明预测的降水空间分布越接近实况, 预报效果越好。

表 1 降水检验评定表

Tab. 1 Precipitation inspection and evaluation table

实况	预报	预报
	$\geq T$	$< T$
$\geq T$	NA	NC
$< T$	NB	ND

站数比通过计算实况或预测降水中大于某个

降水量级 T 的站数和总降水观测站数的比乘以 100 得到。

图 3a 为各降水等级对应的偏差幅度,横坐标为降水等级,纵坐标为偏差幅度得分。从图 3a 中可以看出,未同化雷达的 Exp1 实验对于 5 mm 和 10 mm 等级降水预报较好,偏差幅度小于 0.1。但是当降水量级大于 25 mm 后,偏差幅度快速增大,雨带位置偏离实况越来越多,在 50 mm 处,最大约等于 0.5。同化雷达后 Exp2 实验在大于 25 mm 的强降水量级中的偏差幅度得分较 Exp1 大幅减少,全部评分都低于 0.1。雨带位置得到调整,相比 Exp1 更加接近实况分布。但是,Exp2 实验在较弱的降水量级(5、10

mm)中的偏差幅度得分较 Exp1 反而升高了,尤其是 5 mm 对应的评分超过 0.2,预报效果较 Exp1 差。

图 3b 为各降水等级对应的站数比率。从图中可以看到,Exp1 实验预测的 5 mm 量级降水站数比较实况偏大。当降水量级大于 10 mm 以后,Exp1 降水站数比低于实况,说明对于较强的降水量级控制实验降水强度比实况偏弱。对比 Exp1 和 Exp2 发现,同化雷达资料后,所有量级的降水站数比都增加了。结合实况的站数比分析发现,当降水大于 25 mm 后,Exp2 的站数比与实况几乎一致,比 Exp1 的预测效果更好。而对于 5 mm 和 10 mm 的降水,Exp2 站数比与实况的偏差更大,存在过度预报。

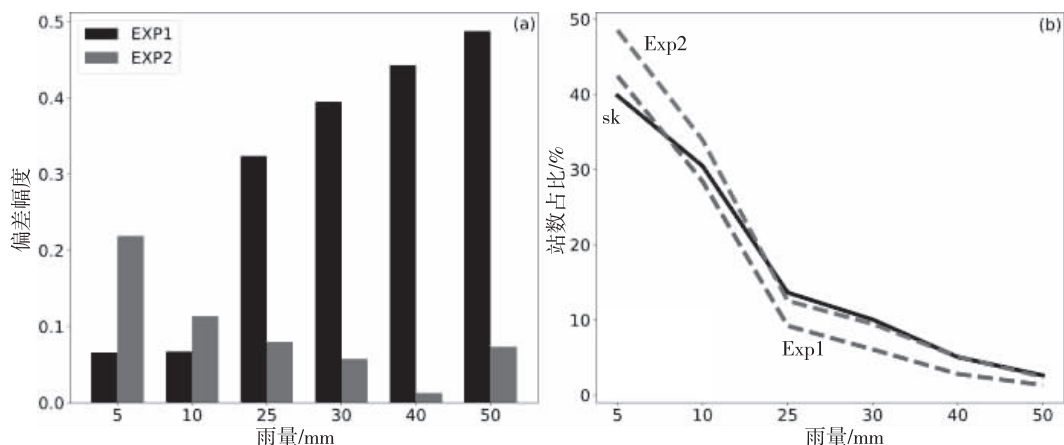


图 3 2017 年 7 月 9 日 02—08 时分等级降水预报相对实况偏差幅度(a);各等级降水站数相对总雨量站数比率(b)

Fig. 3 The magnitude of precipitation forecast relative to the actual deviation(a); The ratio of the number of precipitation stations at each level to the total number of stations(b) between 02:00 and 08:00 on July 9th, 2017.

为考察同化雷达资料前后模式逐小时降水预报效果差异,计算了 7 月 9 日 02—08 时逐小时降水站数比、偏差幅度、分等级 TS 评分和相关系数,结果如图 4 所示。

TS 评分描述预报的命中情况,计算公式如下:

$$TS = \frac{NA}{NA + NB + NC} \quad (10)$$

式中,NA、NB、NC 意义与公式 9 相同,计算方法见表 1。

相关系数反映了预报与实况之间相关关系的密切程度,是一个常用的统计学量,限于篇幅,计算方法此处省略。

图 4a 显示了 5mm 降水量级逐小时的站数比,横坐标为预报时间,纵坐标为站数比。从图中可以看到,随着时间推移,实际的降水站数先升高后下降,峰值出现在预报的第 2 h,降水在前 1~3 h 较强,其后逐渐减弱。从 Exp1 实验来看,5 mm 以上的

站数比也呈现先升高后下降的趋势,峰值出现在第 5 h,前 3 h Exp1 站数较实况小,第 4 h 后站数高于实况,6 h 后逐渐降低趋近实况。总体而言,由于初始场中没有足够的水汽,导致控制实验(Exp1)在开始的前 3 h 降水预报偏弱,降水预报较实况存在滞后性,也就是存在 spin-up 问题。对比 Exp2 发现,同化雷达后站数比也呈现先上升后下降得趋势,但是前 3 h Exp2 比 Exp1 预报了更多的降水,与实况更接近。而且站数比峰值出现在第 4 h,较 Exp1 提前了 1 h。通过吸收雷达资料,调整初始场中的水汽,Exp2 缩短了模式 spin-up 时间。

相应的,从前 6 h 内逐小时 5 mm 量级降水预报相对实况的偏差幅度(图 4b)可以看出,同化雷达后在预报前 3 h Exp2 对 5 mm 降水量级的预报偏差幅度小于 Exp1,同样说明吸收雷达资料对缓解模式 spin-up 问题有积极作用,但这种作用主要集中在前 3 h。

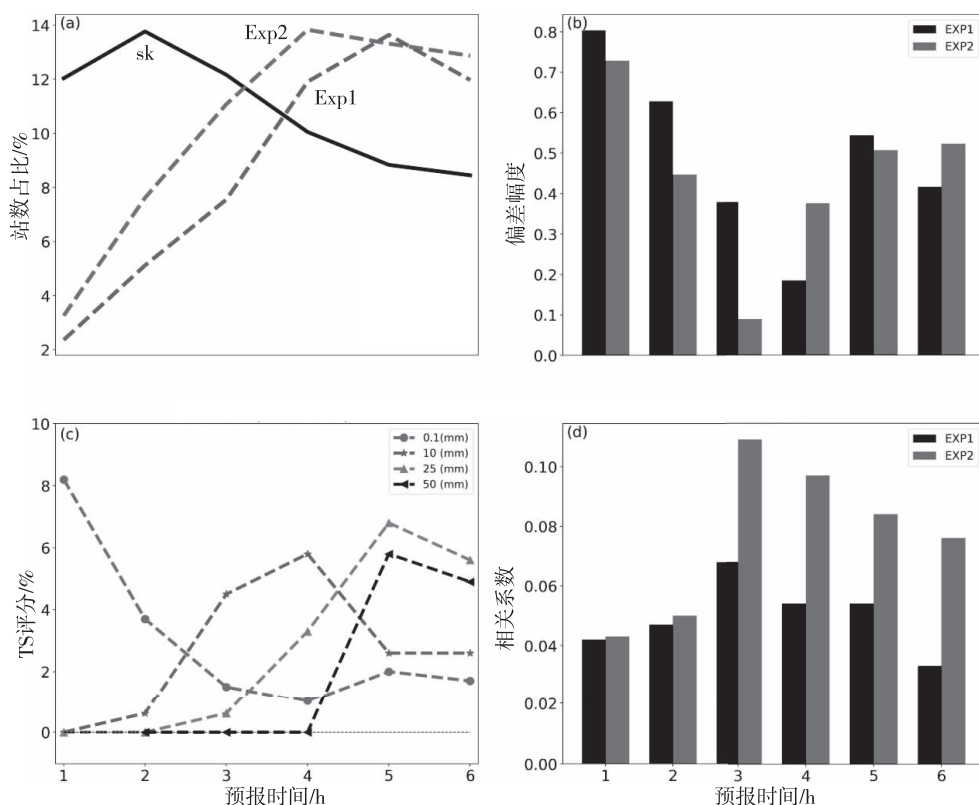


图4 7月9日02—08时逐小时5 mm量级降水站数比(a);逐小时5 mm量级降水偏差幅度(b);
分等级逐小时降水预报TS评分差(c);逐小时预报降水与实况的相关系数(d)

Fig.4 5 mm precipitation stations number ratio(a); Hourly precipitation deviation range of 5 mm(b);
Graded hourly precipitation forecast TS score difference(c); Correlation coefficient between hourly forecast precipitation
and actual situation(d) from 02:00 to 08:00 on July 9th for hourly rainfall.

3 h后,雷达资料同化产生了副作用,例如在预报的第4~6 h,Exp2比Exp1预报了更多的降水(图4a),比Exp1偏离实况更多,图4b中4~6 h的偏差幅度对比也能印证这一点。结合图3b的分析可以看出,偏多的降水主要由10 mm以下的弱降水贡献,且主要来源于预报的4~6 h。同化雷达能够弥补模式前6 h强降水预报偏弱的不足,但是产生了更多的弱降水,导致模式对10 mm以下的弱降水预报较实况偏差幅度更大(图3a)。

图4c为利用实况和预报的降水分别检验了2组模拟实验7月9日02—08时之间逐小时累计降水预报分等级TS评分,然后对TS评分进行相减,用来定量考察雷达资料同化对模式短临降水预报效果的改进,预报降水仍然采用线性插值方法插值到1562个观测站上与实况比较。图中虚线为同化了雷达资料的对照实验Exp2分等级降水TS评分减去未同化雷达资料的控制实验Exp1对应时段的TS评分,正值表示同化雷达资料后降水预报质量得到提升,负值相反,值越大表示提升或下降越大。

从图4c中可以看到,同化雷达资料后模式前6 h逐小时的降水预报在所有降水等级中的评分都有提高。晴雨预报质量开始时刻提升最大随后迅速下降,中雨以上量级降水预报质量的提升主要集中在4~6 h,呈先上升后下降的趋势,峰值出现在4~5 h。从TS评分的变化可以看出,雷达资料的同化明显改善了模式前6 h的降水预报质量,改进主要由强降水贡献,且主要集中在第4~6 h。

从逐小时的相关系数(图4d)来看,吸收雷达资料后Exp2比Exp1与实况的相关性更高,相关系数都随时间先升高后下降,2组相关系数的差值在第3~6 h更大。总体而言,雷达资料同化改进了模式前6 h的降水预报质量。

3 结论与讨论

本文在雷达反射率因子质控的基础上,利用Laps模式云分析系统对雷达资料做了反演,然后利用Nudging方法将雷达反演的云微物理量引入中尺度模式,通过2017年贵州1次强降水天气过程模拟

实验,得到如下结论:

①雷达资料同化能够改进中尺度模式的降水预报,TS 评分检验显示同化雷达资料后模式前 6h 的降水预报在所有降水等级中的评分都有提高,同化雷达使得降水预报相关系数更高。降水峰值提前 1 h,有助于缓解模式 spin-up 问题。

②模式降水预报的改进效果主要由强降水贡献,最大改进效果集中在第 4~6 h。

③同化雷达资料后 25 mm 以上强降水预报站数比更接近实况,落区偏差幅度更小,降水落区和强度向实况方向得到调整。

④ 10 mm 以下弱降水在吸收雷达资料后,站数比较控制预报比实况增加更多,落区偏差幅度增大,存在预报过量的问题。弱降水预报过量主要集中在 4~6 h,而前 3 h 对降水预报的改进有积极作用。

本文的研究表明,C 波段雷达资料同化,对 GRAPES 中尺度模式前 6 h 降水预报有改善作用,但是存在弱降水预报过量的问题,下一步将深入分析其原因并研究改进方法。另外,本次实验仅仅基于 1 个强降水个例,今后还需要选取多种类型的降水过程做更广泛的验证。

参考文献

- [1] 孙娟珍,陈明轩,范水勇. 雷达资料同化方法:回顾与前瞻[J]. 气象科技进展,2016,6(3):17-27.
- [2] 王瑾,刘黎平. CINRAD/CD 雷达反射率因子同化对中尺度数值模式云微物理量场调整的分析[J]. 高原气象,2009,28(1):173-185.
- [3] 张蕾,王振会,杨艳蓉. 多普勒天气雷达资料在数值模式 ARPS 中的试验[J]. 气象科学,2011,31(5):567-575.
- [4] 李平,解以扬,李英华,等. C 波段雷达反射率资料的同化与数值模拟[J]. 气象科技,2013,41(3):506-515.
- [5] 张艳霞,陈子通,蒙伟光,等. 用多普勒雷达资料调整 GRAPES 模式云参数对短临预报的影响[J]. 热带气象学报,2012,28(6):785-796.
- [6] 张诚忠,陈子通,万齐林,等. 雷达反演水汽在华南前汛期短时临近降水预报应用试验[J]. 热带气象学报,2014,30(5):801-810.
- [7] 高郁东,万齐林,薛纪善,等. 同化雷达估算降水率对暴雨预报的影响[J]. 应用气象学报,2015,26(1):45-56.
- [8] 张诚忠,薛纪善,冯业荣,等. 雷达反演潜热在华南区域数值模式汛期短时临近降水预报的应用试验[J]. 热带气象学报,2017,33(5):577-587.
- [9] 杨秀庄,李刚,周明飞,等. 贵州地区一次持续性暴雨天气成因及预报误差分析[J]. 中低纬山地气象,2020,44(4):3-12.
- [10] 黄天福,高鹏,吴安坤,等. 基于 WRF 模式对贵州一次山地暴雨数值模拟研究[J]. 中低纬山地气象,2018,42(4):8-15.
- [11] 李丰,刘黎平,王红艳,等. C 波段多普勒天气雷达地物识别方法[J]. 应用气象学报,2014,25(2):158-167.
- [12] 张诚忠,薛纪善,张林,等. 基于雷达反射率反演降水率的一维+三维变分同化研究及试验[J]. 气象学报,2012,70(5):1128-1136.
- [13] 徐道生,张艳霞,张诚忠,等. 华南区域高分辨率模式中不同雷达回波反演技术方案的比较试验[J]. 热带气象学报,2016,32(1):9-18.
- [14] 张兰,徐道生,胡东明,等. 雷达反演资料的 Nudging 同化对华南暴雨过程短临预报的影响[J]. 高原气象,2019,38(6):1208-1220.
- [15] 李明妍,崔志强,王澄海. Nudging 方法对中国西北强降水过程的模拟试验研究[J]. 气候与环境研究,2017,22(5):563-573.
- [16] 刘红亚,徐海明,薛纪善,等. 雷达反射率因子在中尺度云分辨率模式初始化中的应用Ⅱ:数值模拟实验[J]. 气象学报,2007,65(6):906-918.
- [17] 薛纪善,陈德辉,等. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社,2008:383.