

张小娟,张诚忠,齐大鹏,等,2022. 雷达资料在一次大范围冰雹天气过程中的同化试验分析[J]. 气象,48(1):61-72. Zhang X J, Zhang C Z, Qi D P, et al, 2022. Analysis on the experiments of radar data assimilation in a large-range hailstorm[J]. Meteor Mon, 48(1):61-72(in Chinese).

雷达资料在一次大范围冰雹天气过程中的同化试验分析^{*}

张小娟^{1,2,3} 张诚忠² 齐大鹏⁴ 黄 钰^{1,3} 朱文达⁴

1 贵州省人工影响天气办公室, 贵阳 550081

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/区域数值天气预报重点实验室, 广州 510640

3 贵州省冰雹防控技术工程中心, 贵阳 550081

4 贵州省气象台, 贵阳 550002

提 要: 基于华南区域高分辨率数值模式, 采用牛顿连续松弛逼近法(nudging)同化 C 波段多普勒雷达反射率资料, 针对 2018 年 4 月 2 日贵州一次大范围冰雹天气过程进行了数值模拟试验。分析结果表明: 在模式中进行雷达反射率因子信息 nudging 同化后, 调整了分析场中的水凝物信息和热力场结构, 对流层中层的雨水和冰相粒子含量均增加, 水凝物潜热释放加热了云体, 对大气热力场进行了正温度扰动调整, 这种正温度扰动在维持对流发展过程中起重要作用; 通过云分析系统反演云微物理量, 并 nudging 同化到模式中后, 对雹云发展演变、雹云生命史、雹云强度都有明显改进, 并促进了云中云水向冰相粒子的转化过程, 同时对降水预报效果改善也有明显贡献。雷达反射率因子同化对冰雹云天气系统的预报能力有重要意义, 为冰雹云的临近预报提供重要参考。

关键词: 雷达资料同化, 云分析, 数值模拟, 冰雹, nudging

中图分类号: P458, P482

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.072901

Analysis on the Experiments of Radar Data Assimilation in a Large-Range Hailstorm

ZHANG Xiaojuan^{1,2,3} ZHANG Chengzhong² QI Dapeng⁴ HUANG Yu^{1,3} ZHU Wenda⁴

1 Weather Modification Office of Guizhou Province, Guiyang 550081

2 Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangzhou 510640

3 Guizhou Hail Prevention and Control Technology Engineering Center, Guiyang 550081

4 Guizhou Meteorological Observatory, Guiyang 550002

Abstract: An numerical simulation experiment was conducted on a large-scale hail weather process in Guizhou on 2 April 2018 to assimilate C-band Doppler radar reflectivity data by using the Newton continuous relaxation approximation method (nudging) based on the high-resolution numerical model in South China. The analysis results show that the hydrometeor information and the thermal field structure got adjusted after the nudging assimilated the radar reflectivity factor in the model. The content of rainwater and ice particles in the middle troposphere increased, and the latent heat release of the hydrometeor heated the

^{*} 国家自然科学基金项目(41675099, 41965010)、贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2018]2369)、贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2021]一般 217)和贵州省气象局重要业务科研项目(黔气标合 ZY[2018]04)共同资助

2020 年 6 月 4 日收稿; 2021 年 10 月 29 日收修定稿

第一作者: 张小娟, 从事人工影响天气技术研究. E-mail: zhxj19890103@sina.com

通讯作者: 张诚忠, 从事热带天气数值业务预报及中小尺度气象学研究. E-mail: cz_zh@grmc.gov.cn

cloud body and adjusted the positive temperature disturbance for the atmospheric thermal field. This kind of positive temperature disturbance plays an important role in maintaining the development of convection. The cloud analysis system was used in reversing the microphysical quantity, then the nudging assimilated the reversed cloud microphysical quantity into the initial field of the model. Thus, the hail cloud development and evolution, hail cloud life and hail cloud intensity have all improved significantly. The conversion process of cloud water to ice-phase particles in the cloud has been promoted, which has made a significant contribution to the improvement of precipitation forecast effect. Therefore, the assimilation of radar reflectivity factor is of great significance to the forecasting ability of the hail cloud weather system, and could provide an important reference for nowcasting hail clouds.

Key words: radar data assimilation, cloud analysis, numerical simulation, hail, nudging

引言

近年来,随着高分辨率数值模式和资料同化技术的发展,模式对中小尺度天气系统的预报能力有了显著提高。在初始场中引入观测资料可以使其更加接近实际大气状况,从而提高预报效果,并且能够缩短模式 spin-up 时间。与其他观测资料相比,雷达资料时空分辨率高,能够及时监测对流尺度系统的发生、发展。许多学者开展了反演分析、同化反射率因子和同时同化径向速度和反射率因子等多种研究方法(Tuttle and Foote, 1990; Sun et al, 1991; Qiu and Xu, 1992; Laroche and Zawadzki, 1994; Shapiro et al, 1995; Liou, 1999; Snyder and Zhang, 2003; Gao et al, 2004; Xiao et al, 2005; 2007; Liu et al, 2008; Weygandt et al, 2008; Gao and Stensrud, 2012; 孙娟珍等, 2016; 杨雨轩等, 2018), 将雷达资料信息引入到初始场中,以提高模式的预报效果。

国内很多研究者在雷达资料同化对强对流天气预报的影响方面进行了许多研究(李昕等, 2016; 李媛等, 2011; 陈锋等, 2012; 马昊等, 2016; 肖辉等, 2019; 郑淋淋等, 2019; 张兰等, 2019)。薛湛彬等(2017)利用美国 Advanced Regional Prediction System(ARPS)模式的资料分析系统 ARPS Data Analysis System(ADAS)分析了多普勒雷达径向速度和反射率因子同化对初始场的改进作用,同化径向速度对改善模式初始场的动力场有重要贡献,同化反射率因子的主要作用是调整初始场中的水凝物场和热力场,有效缩短了模式的 spin-up 时间,明显改进了定量降水预报;同时同化雷达径向速度和反射率因子模拟效果最佳。盛春岩等(2006)利用

ADAS 系统同化多普勒雷达资料,对一次暴雨过程进行了模拟对比试验,发现同时使用雷达径向风和反射率资料改进初始场对降水的模拟效果最明显。胡金磊和郭学良(2013)利用 ADAS 系统将雷达反射率因子信息引入到模式初始场中,模式对雹云的预报效果改进明显。陈力强等(2009)利用 WRF-3DVar 同化系统对暴雨过程进行了径向风和反射率因子的直接同化试验研究,模式对对流降水的预报有正的影响。张诚忠等(2008)利用 GRAPES-3DVar 系统对一次华南暴雨过程进行不同资料同化试验,发现同化雷达径向风的模拟效果最好。李华宏等(2014)进行了雷达反射率因子和反演风场的三维变分同化试验,发现雷达同化对降水预报改善有明显贡献。陈锋等(2020)利用 GSI-3DVar 系统对一次飑线过程进行了雷达资料同化研究,发现雷达资料同化对飑线过程的模拟效果有明显提升。从已有的研究看,雷达资料同化在数值模式中有较好的应用价值。目前,大部分都是针对暴雨个例的模拟试验,而针对冰雹过程方面的研究较少。贵州是全国冰雹灾害最严重的地区之一,且由于地形原因,贵州多普勒天气雷达均为 CINRAD-CD 型,因此,针对冰雹天气过程将 C 波段雷达资料引入模式预报系统进行试验研究非常有必要。

本文采用牛顿连续松弛逼近法(nudging)将多普勒雷达反射率因子资料云分析得到的水凝物信息逐步 nudging 同化到模式中,对 2018 年 4 月 2 日贵州一次强冰雹天气过程进行了同化模拟试验分析。

1 天气过程

2018 年 4 月 2 日 17 时至 3 日 03 时(北京时,下同),贵州省中西部地区出现强对流天气,地面累计

24 h降水呈东南—西北向带状分布,有两个强降水中心,最大雨量为 70.5 mm。毕节(纳雍县、黔西县)、六盘水(六枝特区)、安顺(普定县、西秀区、平坝县)、黔南州(惠水县、平塘县)和黔西南州(晴隆县)出现降雹,冰雹最大直径为 15 mm。

从 2 日 20 时环流形势来看(图 1),500 hPa 贵州受两个高空槽过境影响,一个位于贵州西部至云南东部,影响贵州省西部地区,另一个位于重庆西部至贵州西南部,影响贵州省中部地区。700 hPa 切变线位于贵州省东北部,低层 850 hPa 也有切变线位于贵州省的东北部,地面受低压控制。综上所述,此次冰雹天气过程的主要影响系统是双高空槽过境和中低层切变线。

2 同化方法和试验方案

2.1 同化方法

本文采用了 nudging 法将云分析反演得到的水凝物信息逐步引入到模式中。nudging 法(Anthes, 1974; Kistler and McPherson, 1975; Hoke and Anthes, 1976; 刘红亚等, 2007; 张艳霞等, 2012; 张兰等, 2019)就是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,使模式预报逐渐向观测

逼近,其中 δt 取 800 s,即 20 个积分步长。计算公式如下:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \sum F_i + \alpha(W_o - W) \quad (1)$$

式中: 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_o 为对应时刻的观测值。将式(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:

$$W^t = W_m^t + a'(W_o^t - W_m^t) \quad (2)$$

其中:

$$a' = a \times dt \quad (3)$$

式中: W_m^t 为模式积分第 t 步的预报值; W_o^t 为同时刻的观测值(或反演值); dt 为积分时间步长; a' 为张弛逼近系数,取时间步长 dt 与同化时段 δt 的比值,即 0.05; W^t 为经 nudging 同化调整后的第 t 步的预报值。

2.2 试验方案

本文所使用的华南高分辨率区域模式是在中国气象局中尺度天气数值预报系统 CMA-MESO(原 GRAPES-MESO)的基础上开发得到的。模式的起始经纬度为 16°N 、 96°E ,水平格点数为 913×513 ,格距为 0.03° ,垂直方向为 65 层,模式顶层到 30 km,时间积分步长为 40 s。云微物理过程采用 WSM6 类

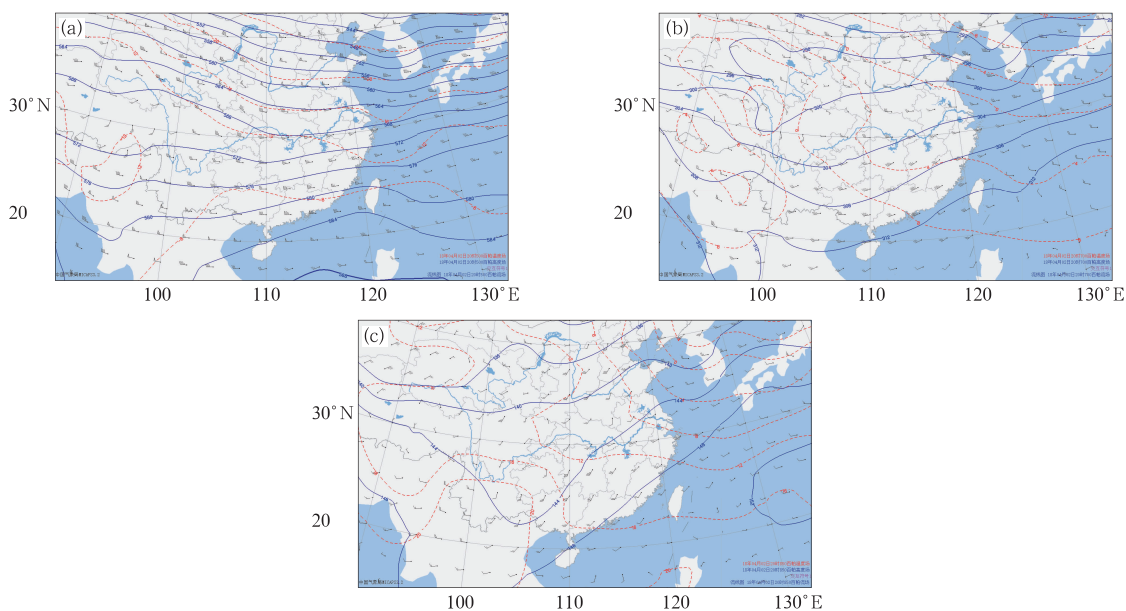


图 1 2018 年 4 月 2 日 20 时 500 hPa(a)、700 hPa(b)、850 hPa(c)天气形势图

(蓝实线为等位势高度线,单位: dagpm; 红虚线为等温线,单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 1 Synoptic chart at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa at 20:00 BT 2 April 2018

(Blue solid line is for geopotential height, unit: dagpm; red dotted line for isotherm, unit: $^\circ\text{C}$)

方案,长波辐射采用 rrtm 方案,短波辐射采用 Dudhia 方案,陆面过程采用 Slab 热量扩散方案,及边界层过程采用 MRF 方案,积云对流参数化采用简化 Arakawa-Schubert(SAS)方案。

为了解 C 波段多普勒雷达资料同化到模式中对预报结果所产生的影响,本文进行了两组试验,为方便起见,将控制试验称为 test1,同化试验称为 test2。test1 从 2018 年 4 月 2 日 08 时开始积分 24 h。由于初始单体回波于 17 时生成, test2 从 4 月 2 日 08 时启动,积分 9 h 后,将贵阳雷达 17:02 雷达反射率因子云分析得到的水凝物信息逐步 nudging 同化到模式中,继续运行至 4 月 3 日 05 时。

模式的初边界资料采用 ECMWF 全球高分辨率模式提供的分析场,分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,时间间隔为 6 h。对于模式同化的贵阳雷达资料,在同化前对雷达资料进行了孤立回波消除、地物回波识别和剔除的数据质量控制(李丰等,2014),然后采用三线性插值方法将反射率因子插值到与模式相匹配的

三维格点坐标上。

3 nudging 同化对分析场的调整

大气中水凝物的准确分布对数值模式微物理过程的发展至关重要,能有效缩短模式的 spin-up 时间。本文设计对比试验用来研究 nudging 同化水凝物信息对分析场的改进作用。下面具体分析 nudging 同化水凝物信息对分析场中的水凝物场和热力场的改善情况。图 2a、2b 分别给出了 test1、test2 分析场 18 时总水凝物分布情况,图 2c 给出了 test2 与 test1 总水凝物混合比的差值,可以看到 nudging 同化水凝物信息积分 1 h 后总水凝物场调整比较明显,总水凝物含量增加,主体云系增强,且在主体云系东侧有分散云系生成。

沿主云系中心 27.35°N (图 2 中绿色虚线所示)做纬向垂直剖面,分析 nudging 同化对云水、雨水、冰晶、雪、霰及水汽的影响。从图 3 中可以看到,云水主要分布在 $700 \sim 400 \text{ hPa}$,中心极值达 $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高

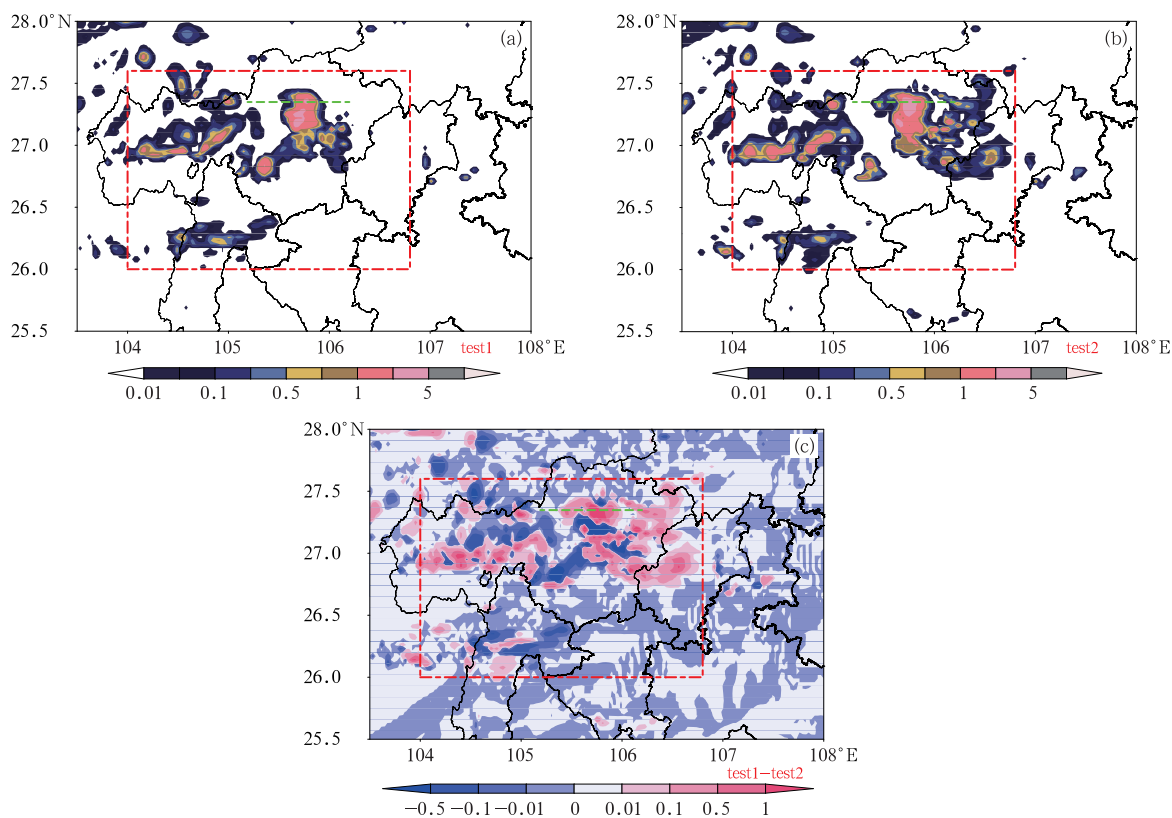


图 2 2018 年 4 月 2 日 18 时 test1(a), test2(b) 总水凝物混合比分布, 及 test2 与 test1 总水凝物混合比的差值(c)(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 2 Mixing ratio of total water hydrometeors for analytical fields of (a) test1, (b) test2 and (c) the differences between test2 and test1 at 18:00 BT 2 April 2018 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

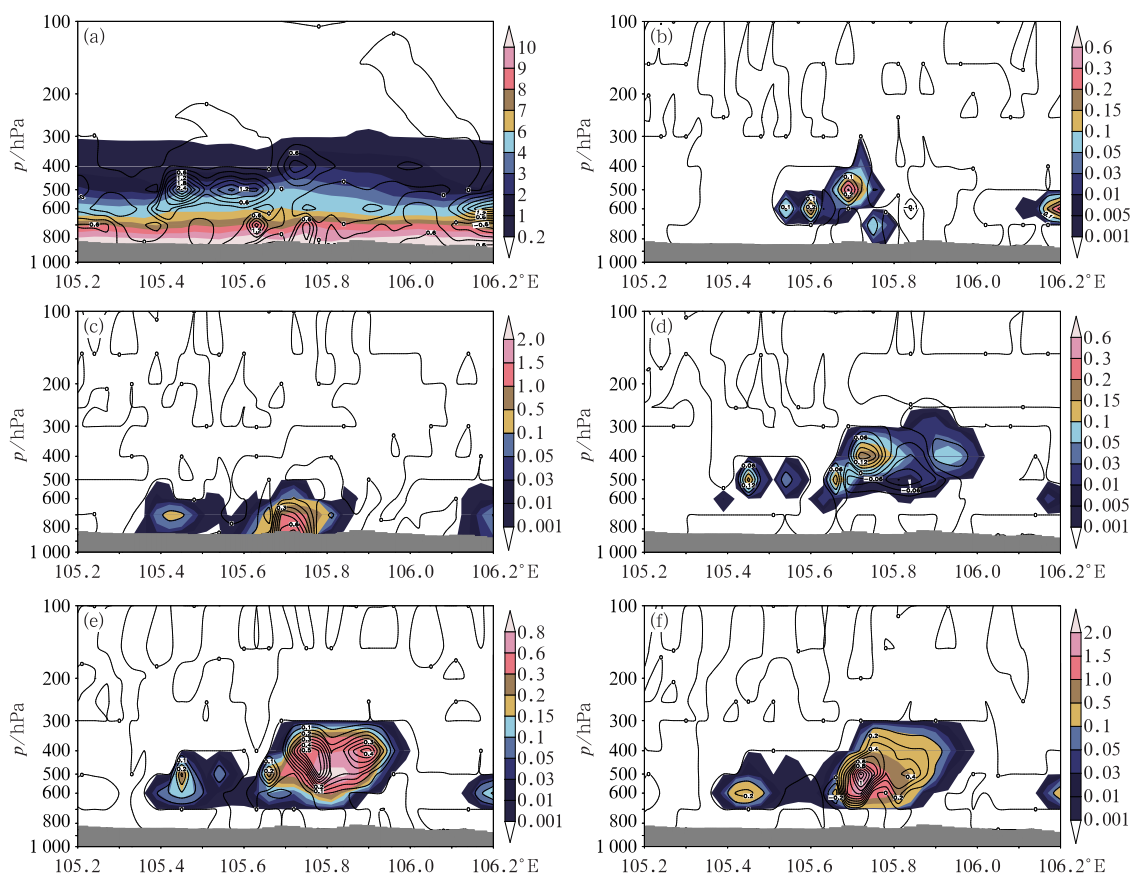


图3 2018年4月2日18时 test2 分析场中水汽(a)、云水(b)、雨水(c)、冰晶(d)、雪(e)、霰(f)的水凝物混合比沿 27.35°N (图2中的绿色虚线) 的纬向垂直剖面(填色, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 以及 test2 与 test1 水凝物混合比差值(等值线, 单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (灰色阴影为地形, 下同)

Fig. 3 Zonal-vertical cross sections of mixing ratio of hydrometeors (shaded, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) of (a) water vapor, (b) cloud water, (c) rain water, (d) ice crystal, (e) snow, and (f) graupel along 27.35°N (green dashed line in Fig. 2) in test2, and the mixing ratio differences of the hydrometeors between test2 and test1 (contour, unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) at 18:00 BT 2 April 2018 (gray shadow: terrain, same as below)

度在 500 hPa 附近;雨水主要集中在地面至 500 hPa 范围内,中心最高可达 $1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上,高值中心在近地面附近,地面有降水发生;冰晶集中分布在 450 ~ 350 hPa,混合比极大值为 $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高度在 400 hPa 附近;雪晶的垂直分布范围与冰晶基本一致,极大值为 $0.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高度在 500 hPa 附近;霰粒子位于冰晶的下方,中心极值达 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,高度在 500 hPa。水汽混合比(图 3a 填色)在大气底层 800 hPa 至地面是大值区,达 $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其增量(图 3a 等值线)主要位于中层,最高达 $2.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,可见同化雷达资料对水汽含量有正的贡献。从 test2 分析场与 test1 分析场水凝物差值垂直分布(图 3b~3f,等值线)可以看到,nudging 同化后云水、雨水、冰晶、雪、霰的混合比均有明显增加,从区

域平均的各水凝物混合比垂直廓线(图 4)也能发现同样的变化特征。

从 27.35°N 假相当位温的垂直剖面来看(图 5), test1 冷空气从中层 500 hPa 入侵, 105.6°E 附近有假相当位温高能舌自地面向上伸展。test2 相比 test1 有明显变化,中层侵入的冷空气明显加强,假相当位温高能舌增温近 4 K, 700 hPa 以下假相当位温升高,暖中心最高可达 342 K,这是由于水凝物潜热释放加热了云团。nudging 同化对大气热力场进行了正温度扰动调整,这种正温度扰动在维持对流发展过程中起重要作用。由此可见,雷达反射率因子云分析调整了初始场中的热力场,“上冷下暖”更明显,有利于对流的发展和维持。

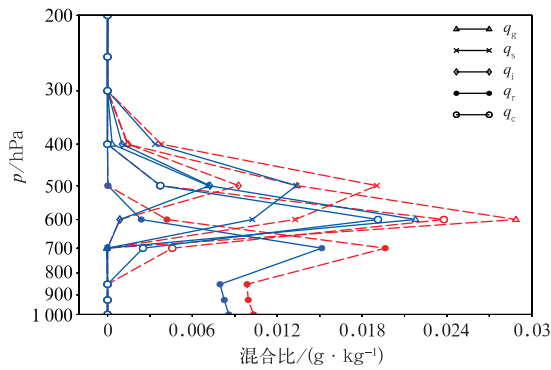


图 4 2018 年 4 月 2 日 18 时 test1(蓝实线)和 test2(红虚线)分析场中云水(q_c)、雨水(q_r)、冰晶(q_i)、雪(q_s)、霰(q_g)的区域平均的水凝物混合比垂直廓线
(区域平均范围如图 2 中的红色矩形区域所示)

Fig. 4 Vertical profiles of mixing ratio of hydrometeors of cloud water (q_c), rain water (q_r), ice crystal (q_i), snow (q_s), graupel (q_g) in test1 (blue solid lines) and test2 (red dotted lines) at 18:00 BT 2 April 2018
(The regional averaging is the red rectangle area in Fig. 2)

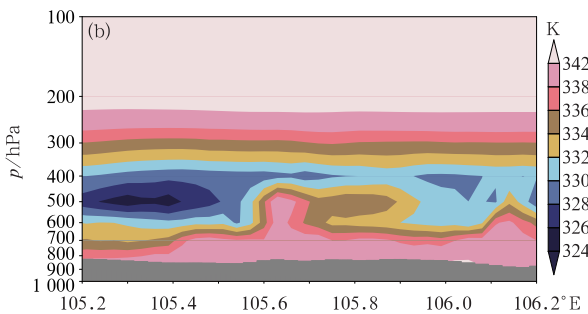
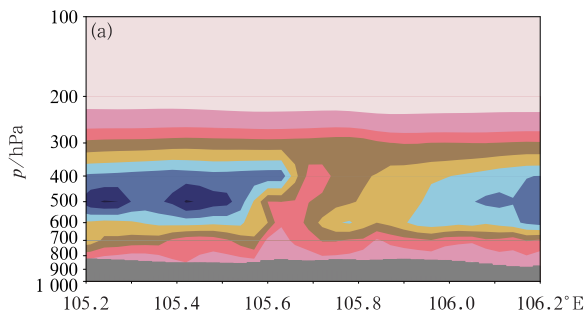


图 5 2018 年 4 月 2 日 18 时 test1(a), test2(b)沿 27.35°N (图 2 中的绿色虚线)的假相当位温垂直剖面

Fig. 5 Vertical cross sections of pseudo-equivalent potential temperature along 27.35°N (green dashed line in Fig. 2) of (a) test1, (b) test2 at 18:00 BT 2 April 2018

表 1 雹云宏观特征

Table 1 The macro characteristics of hail clouds			
宏观特征	实况	test1	test2
雹云源地	毕节	毕节	毕节
雹云生命史/h	10	7	9
雹云移动方向	东偏南	东	东
最大回波强度/dBz	>60	45.6	46.4

(图 6c), 多个对流单体覆盖在贵州中北部地区上空, 最大回波强度达到 65 dBz 以上, 回波中心位于毕节东部。对于 test1, 18 时(图 6a)多个对流单体出现在贵州西北部, 中心强度 40 dBz 以上, 强回波中心范围与实况相差不大, 强度较实况偏弱, 位置偏西。对于 test2, 在模式积分 1 h 后(图 6b), 毕节东部地区上空强对流中心最大回波达到 45 dBz 以上。

4 试验结果分析

4.1 雹云宏观特征分析

表 1 给出了 test1、test2 雹云部分宏观特征与实况的比较, 其中 test1 和 test2 中模拟雹云源地与实况是一致的, 均为毕节东北部地区。实际观测雹云生命史约 10 h, 最大雷达回波强度达 60 dBz 以上, 移动方向为先向东移动, 后转向东南方向移动; 而 test1 模拟雹云的生命史为 7 h, 最大雷达组合反射率为 45.6 dBz, 且雹云自西向东移动; test2 中雹云的生命史为 9 h, 最大雷达组合反射率为 46.4 dBz, 移动方向与 test1 一致。可见, 雷达资料同化使得雹云的生命史变长, 回波强度增加, 与实况更接近。

4.2 雷达反射率演变分析

4 月 2 日 18:02 雷达组合反射率因子图显示

总体来看, 在该时刻 test2、test1 将强对流范围较好地再现出来, 而在回波强度和空间位置上, 两组试验较实况都有一定的偏差, test2 较 test1 略有改善。

从 19:02 雷达组合反射率图(图 7c)上来看, 贵州中北部地区上空的强回波中心向东偏南方向移动, 强回波中心区域面积增大, 且在毕节中部地区有新的对流单体生成发展。图 7a 中对流单体的位置和范围与实况对应较好, 但强度仍有较大出入; 西部的对流单体同时向东发展, 回波中心强度增强, 回波范围增大。在 test2 中模式积分 2 h 后, 强回波区域面积增大, 回波强度变化不大, 回波向东发展; 西部的对流单体同时向东发展, 回波中心强度增强, 回波范围增大。与雷达观测实况相比, test1 和 test2 模

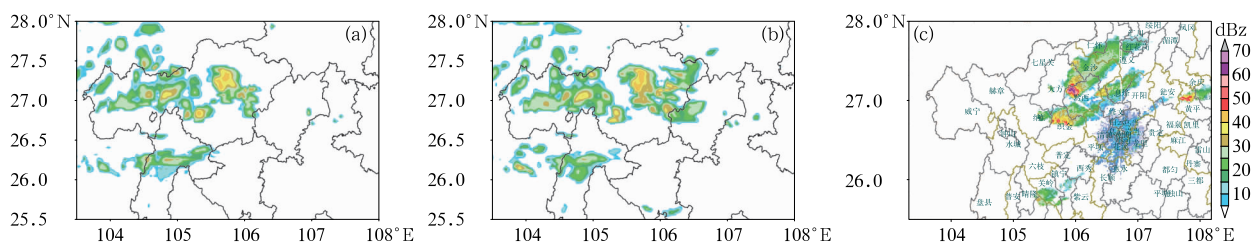


图 6 2018 年 4 月 2 日 18:00 test1(a), test2(b)模拟, 18:02 观测(c)雹云的雷达组合反射率因子

Fig. 6 The simulations of (a) test1, (b) test2 at 18:00 BT and (c) observation at 18:02 BT composite radar reflectivity of hail clouds on 2 April 2018

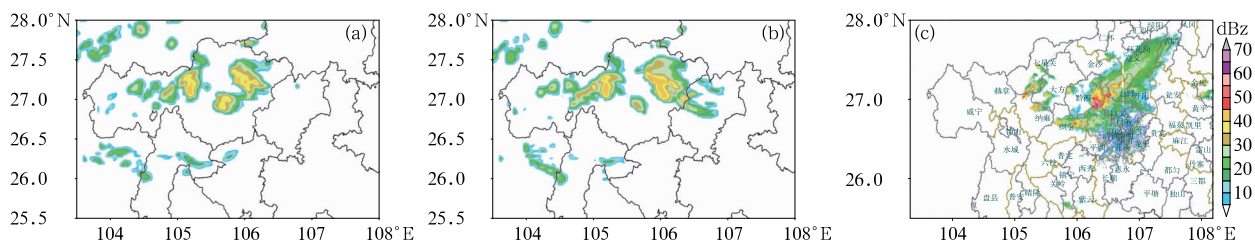


图 7 同图 6, 但为 2018 年 4 月 2 日 19:00 test1(a), test2(b)模拟和 19:02 观测(c)

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for simulations of (a) test1, (b) test2 at 19:00 BT and (c) observation at 19:02 BT 2 April 2018

拟结果在雹云位置上有良好的表现, 但雹云强度和雹云移向模拟出现偏差。

由 20:02 雷达组合反射率因子图(图 8c)可知, 东部的对流单体回波继续向东偏南方向移动, 回波中心强度减弱, 强回波区域减小; 西部对流单体继续发展, 回波中心强度增强, 最大回波强度超过 55 dBZ。从两组试验的模拟结果来看, 主体对流单体西南侧的单体继续向东移动, 与主体强对流单体并排一起, 形成一个呈南北走向的强回波带, 40 dBZ 以上的回波中心衰减成多个小回波中心; 西部强对流单体继续向东发展。总的来说, 积分 3 h 后模拟雹云雷达组合反射率与实况的偏差较 0~2 h 的大。

4.3 降雨量分析

从 2018 年 4 月 2 日 17 时至 3 日 05 时地面 12 h 累计降水实况(图 9c)来看, 贵州出现大范围强

降雨, 降雨呈西北—东南带状分布, 主要集中在贵州的中部地区, 中北部和中南部各有 1 个降水中心, 北部中心雨量为 47.9 mm, 南部中心 12 h 地面累计雨量最大可达 70.5 mm。从 test1 模拟结果来看(图 9a), 贵州中北部有 1 个降水中心, 12 h 最大累计雨量约为 24.1 mm, 与实况相比, 模式模拟出了贵州中北部的降水中心, 位置略偏北, 降雨量级略偏小, 而南部的强降水中心漏报。test2 中, 贵州中部以北有一个强降水中心, 中心雨量为 44.6 mm, 与实况相比, 北部的降水中心强度相当, 位置略偏东, 预报效果较好, 而南部的强降水中心预报也存在同样问题。

4.4 水凝物场分析

过雹云中心作自西向东的垂直剖面, 分析两组试验水凝物的垂直分布差异。图 10~图 12 给出了

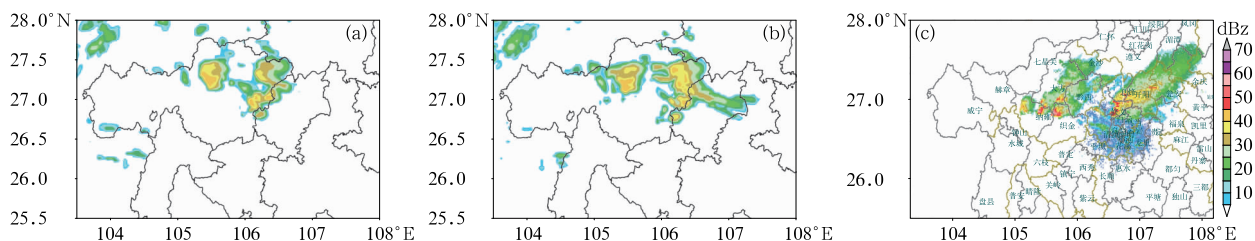


图 8 同图 6, 但为 2018 年 4 月 2 日 20:00 test1(a), test2(b)模拟和 20:02 观测(c)

Fig. 8 Same as Fig. 6, but for simulations of (a) test1, (b) test2 at 20:00 BT and (c) observation at 20:02 BT 2 April 2018

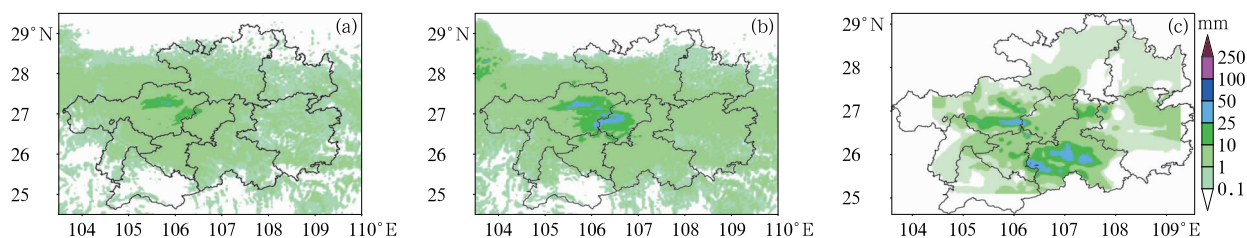


图 9 2018 年 4 月 2 日 17 时至 3 日 05 时 test1(a), test2(b) 模拟, 实况(c) 地面 12 h 累计降水量

Fig. 9 The simulations of (a) test1, (b) test2 and (c) observed 12 h accumulated rainfall

from 17:00 BT 2 to 05:00 BT 3 April 2018

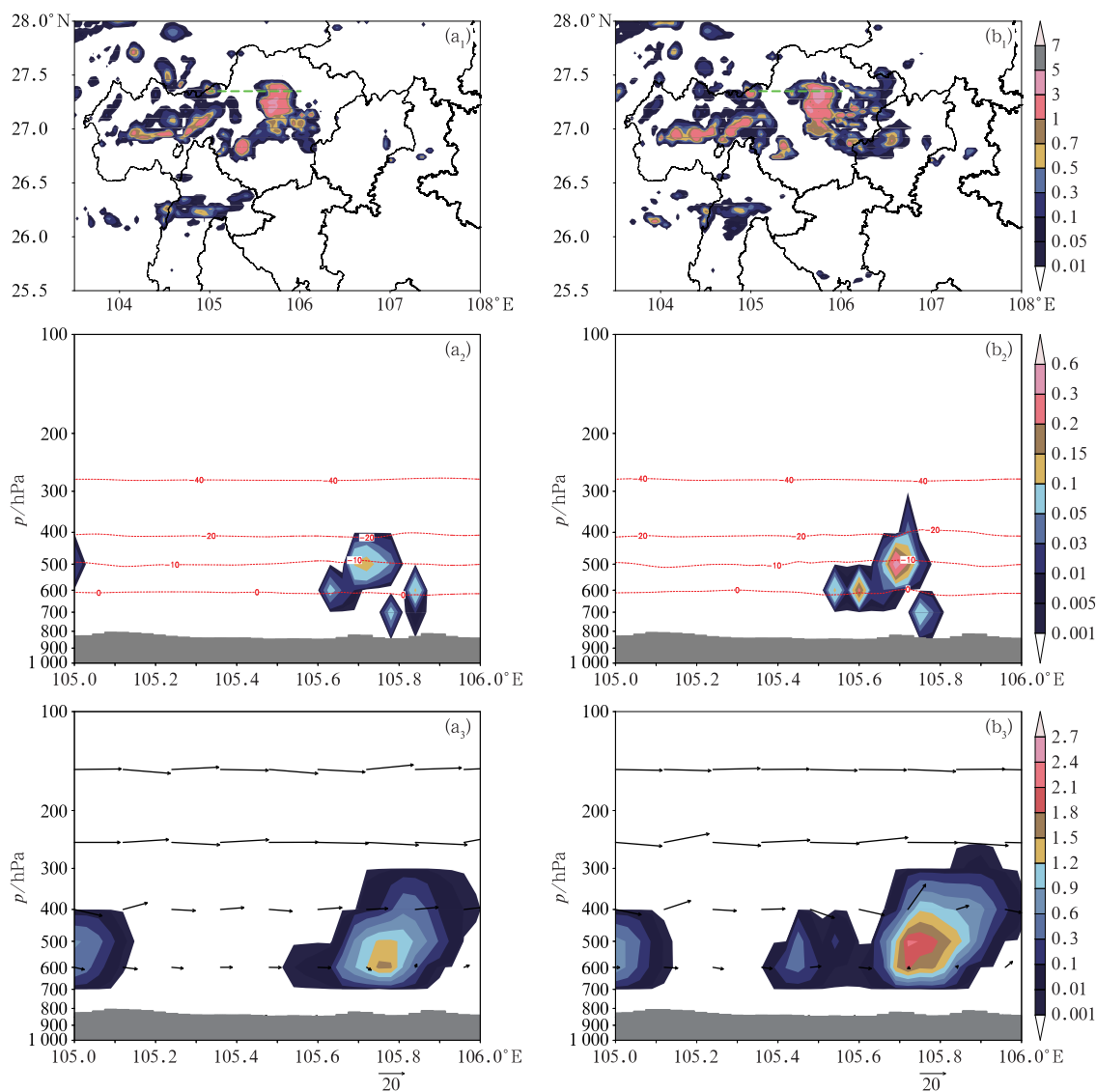


图 10 2018 年 4 月 2 日 18 时 test1(a), test2(b) 云系总水凝物混合比(a_1, b_1)和沿 27.35°N

(图 $10a_1, 10b_1$ 中绿色虚线) 的云水(a_2, b_2)和冰相粒子(a_3, b_3)的垂直剖面(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(图 $10a_3, 10b_3$ 中矢量为风矢, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Mixing ratio of total hydrometeors (a_1, b_1) and vertical profiles of cloud water (a_2, b_2),

ice phase particles (a_3, b_3) along 27.35°N (horizontal green dashed line in Figs. $10a_1$ and $10b_1$)

of test1 (a), test2 (b) at 18:00 BT 2 April 2018 (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

(Vector in Figs. $10a_3$ and $10b_3$ is wind, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

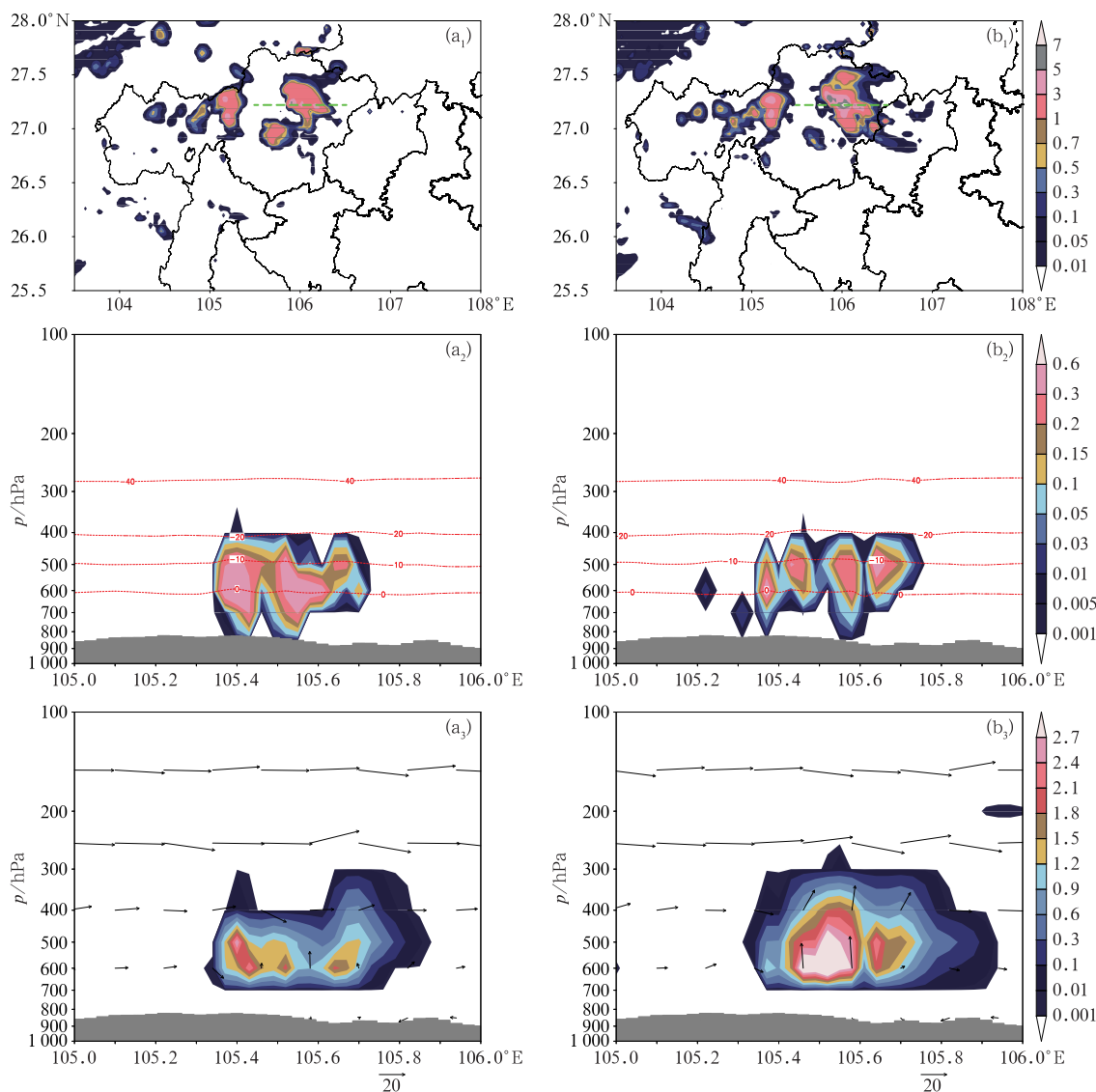


图 11 同图 10, 但为 2018 年 4 月 2 日 19 时

Fig. 11 Same as Fig. 10, but at 19:00 BT 2 April 2018

4 月 2 日 18—20 时云带分布及沿云带中心的云水和冰相粒子(冰晶、雪和霰)纬向垂直分布。

如图 10 所示, 18 时, test2 中, 云水主要分布在 $105.5^{\circ}\sim 105.8^{\circ}\text{E}$, 极值为 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高度在 500 hPa 附近, 冰相粒子混合比含量主要分布在 $105.4^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$, 高度在 700~250 hPa, 极大值达 $2.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 高度为 600 hPa, 云顶附近有明显上升气流。与 test1 相比, 云水和冰相粒子的垂直分布基本一致, 水平分布范围更大, 极值更高, 云内上升气流更强, 有利于对流云继续向上发展。同化过后, 低层加热作用, 使得对流发展更加旺盛, 低层丰沛水汽, 促进了水汽向云水的转化, 以及云水向雪和霰的转化。

test2 模式积分 2 h 以后(图 11), 云带向东移至

$105.8^{\circ}\sim 106.4^{\circ}\text{E}$, 云水主要分布在 $-10\sim 0^{\circ}\text{C}$, 为过冷云水, 极大值超过 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 冰相粒子主要分布在 600~400 hPa, 极值为 $2.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 云中以上升气流为主。test1 中, 云水混合比含量超过 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的区域面积较 test2 大, 云中云水含量较丰沛, 而冰相粒子含量较少, 极值为 $2.4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 左右, 云中上升气流较弱。可见, test2 中雹云发展较 test1 迅速。

积分 3 h 后, 20 时(图 12)东部雹云处于衰亡阶段, 西部雹云发展较旺盛。test2 中, 西部雹云中以冰相粒子为主, 为双层云结构, 云体中上部有上升气流, 云水混合比含量极大值为 $0.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 冰相粒子混合比含量极大值超过 $2.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且地面有固态降水。test1 中, 云水含量较 test2 多, 雹云发展

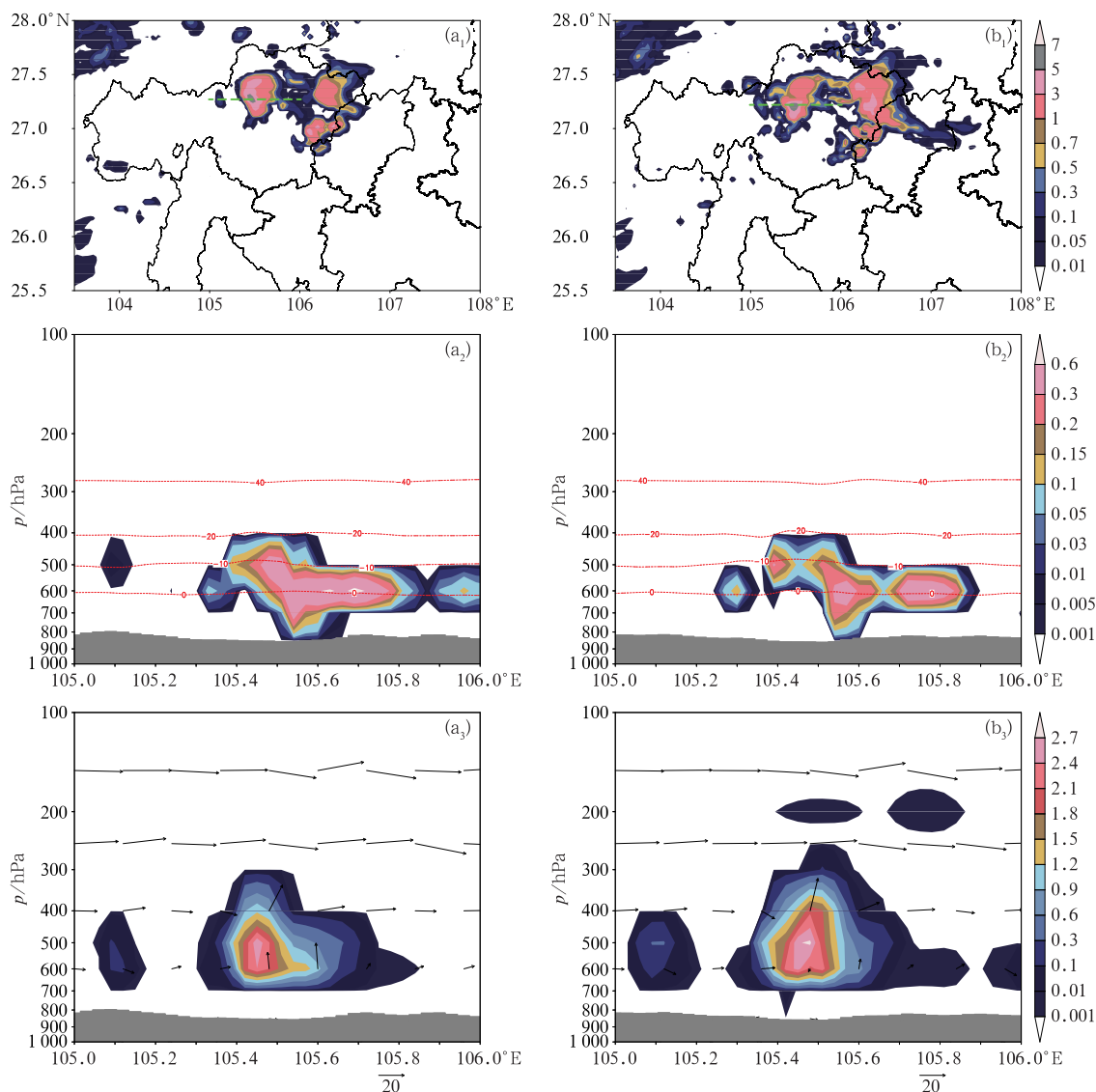


图 12 同图 10, 但为 2018 年 4 月 2 日 20 时

Fig. 12 Same as Fig. 10, but at 20:00 BT 2 April 2018

没有 test2 旺盛, 为单层云结构, 云中以上升气流为主。

5 结论与讨论

本文采用牛顿连续松弛逼近法(nudging)将多普勒雷达反射率因子资料云分析反演得到的水凝物信息 nudging 同化到模式中, 分析了 nudging 同化对分析场的改进作用, 并基于 GRAPES 中尺度数值模式对 2018 年 4 月 2 日贵州省一次大范围冰雹天气过程进行了模拟试验和对比分析。通过对同化雷达反射率因子后的分析场和模拟物理量场的诊断分析, 得到以下结论:

(1)nudging 同化可以有效地利用雷达反射率因子信息对热力场和云微物理量场进行调整。这种调整增加了中层雨水和冰相粒子含量, 水凝物潜热释放加热了云团, 对大气热力场进行了正温度扰动调整, 这种正温度扰动在维持对流发展过程中起重要作用。由此可见, 雷达反射率因子同化调整了分析场中的热力场和水凝物场, 使得云体含水量更加丰沛, 对流发展更加旺盛。

(2)雷达反射率因子同化对雹云发展演变、雹云生命史、雹云强度等有明显改进, 对降水强度的预报效果改善也有明显贡献。雷达反射率因子同化对雹云的微物理量结构有明显的促进作用, 模式积分 1 h, 雹云内的云水和冰相粒子含量都较多, 云顶上

升气流明显较强;2 h后,云内上升气流也较强,雹云以冰相粒子为主,冰相粒子较多,而云水含量则相反;3 h后,雹云云底出现固态降水,在初始场中同化雷达反射率因子后,明显加快了雹云中液相粒子向固态粒子的转化。可见,雷达反射率因子同化对提高冰雹云天气系统的模拟能力有重要意义,为冰雹云的临近预报提供重要参考。

本文只进行了一个冰雹天气过程的单次同化模拟分析,对于南部降水漏报现象,可以考虑进行连续同化试验研究,分析预报结果是否有改进。另外,考虑到不同的雹云天气过程形成的云物理机制和初边条件误差不同,结论具有一定的局限性,今后需要进行多个个例同化试验研究。

参考文献

- 陈锋,董美莹,苏涛,等,2020. 雷达资料同化对一次浙江初春罕见飑线过程数值模拟的影响分析[J]. 气象,46(4):462-477. Chen F, Dong M Y, Su T, et al, 2020. Influence of radar data assimilation on the numerical simulation of a rare squall line in Zhejiang Province in early spring[J]. Meteor Mon, 46(4):462-477 (in Chinese).
- 陈锋,冀春晓,董美莹,等,2012. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响[J]. 气象,38(10):1170-1181. Chen F, Ji C X, Dong M Y, et al, 2012. The effects of radar radial velocity data assimilation on the simulation of Typhoon Matsa[J]. Meteor Mon, 38(10):1170-1181(in Chinese).
- 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. Chen L Q, Yang S, Xiao Q N, 2009. Experiment of Doppler radar data assimilation for convection in cold vortex[J]. Meteor Mon, 35(12):12-20 (in Chinese).
- 胡金磊,郭学良,2013. 基于雷达资料的云分析在冰雹云短时预报中的应用[J]. 气象科技,41(4):682-689. Hu J L, Guo X L, 2013. Application of cloud analysis with radar data in hail cloud now-casting[J]. Meteor Sci Technol, 41(4):682-689(in Chinese).
- 李丰,刘黎平,王红艳,等,2014. C波段多普勒天气雷达地物识别方法[J]. 应用气象学报,25(2):158-167. Li F, Liu L P, Wang H Y, et al, 2014. Identification of ground clutter with C-band Doppler weather radar[J]. J Appl Meteor Sci, 25(2):158-167(in Chinese).
- 李华宏,王曼,曹杰,等,2014. 雷达资料在云南一次强降水过程中的三维变分同化试验[J]. 热带气象学报,30(5):881-893. Li H H, Wang M, Cao J, et al, 2014. The three-dimensional variational assimilation of Doppler radar data for a torrential rain case in Yunnan[J]. J Trop Meteor, 30(5):881-893(in Chinese).
- 李昕,王元,明杰,等,2016. 雷达径向风和反演风联合同化在台凤灿都(2010)数值预报中的研究[J]. 气象,42(6):649-663. Li X, Wang Y, Ming J, et al, 2016. A combined radar data assimilation strategy of radial velocity and retrieved wind and its impact on the forecasting of Tropical Cyclone Chanthu (2010)[J]. Meteor Mon, 42(6):649-663(in Chinese).
- 李媛,刘健文,董佩明,等,2011. GRAPES-3Dvar 雷达资料直接同化对江淮暴雨数值预报影响的分析研究[J]. 气象,37(4):403-411. Li Y, Liu J W, Dong P M, et al, 2011. Analysis of the impact of radar data assimilation on the numerical forecast of Jianghuai rainstorm by using GRAPES-3Dvar[J]. Meteor Mon, 37(4):403-411(in Chinese).
- 刘红亚,徐海明,薛纪善,等,2007. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用 II:数值模拟试验[J]. 气象学报,65(6):906-918. Liu H Y, Xu H M, Xue J S, et al, 2007. Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving mesoscale model. Part II: numerical simulation experiments[J]. Acta Meteor Sin, 65(6):906-918(in Chinese).
- 马昊,梁旭东,罗义,等,2016. GRAPES_3Dvar 中雷达径向风同化改进观测算子的应用[J]. 气象,42(1):34-43. Ma H, Liang X D, Luo Y, et al, 2016. Application of advanced observation operator of Doppler radar radial velocity assimilation in GRAPES_3Dvar[J]. Meteor Mon, 42(1):34-43(in Chinese).
- 盛春岩,浦一芬,高守亭,2006. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响[J]. 大气科学,30(1):93-107. Sheng C Y, Pu Y F, Gao S T, 2006. Effect of Chinese Doppler radar data on now-casting output of mesoscale model[J]. Chin J Atmos Sci, 30(1):93-107(in Chinese).
- 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. Sun J Z, Chen M X, Fan S Y, 2016. Radar data assimilation methods: review and future perspective[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(3):17-27(in Chinese).
- 肖辉,万齐林,刘显通,等,2019. 基于 WRF-EnKF 系统的雷达反射率直接同化对台风“天鸽”(1713)预报的影响[J]. 热带气象学报,35(4):433-445. Xiao H, Wan Q L, Liu X T, et al, 2019. The impact of radar reflectivity on numerical forecast of Typhoon Hato (1713) based on WRF-ENKF system[J]. J Trop Meteor, 35(4):433-445(in Chinese).
- 薛湛彬,陈炯,吴俞,等,2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用[J]. 大气科学,41(4):673-690. Xue C B, Chen X, Wu Y, et al, 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast[J]. Chin J Atmos Sci, 41(4):673-690(in Chinese).
- 杨雨轩,张立凤,张斌,等,2018. 多普勒天气雷达资料同化对冬季暴雨模拟的影响研究[J]. 大气科学,42(5):1096-1108. Yang Y X, Zhang L F, Zhang B, et al, 2018. Impact of Doppler radar data assimilation on the simulation of a heavy winter rainfall[J]. Chin J Atmos Sci, 42(5):1096-1108(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).
- 张兰,徐道生,胡东明,等,2019. 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, 38(6):1208-1220.
- Zhang L, Xu D S, Hu D M, et al, 2019. Nudging radar data impact on Southern China rainstorm short-term forecast[J]. Plateau Meteor, 38(6):1208-1220(in Chinese).
- 张艳霞, 陈子通, 蒙伟光, 等, 2012. 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, 28(6):785-796.
- Zhang Y X, Chen Z T, Meng W G, et al, 2012. The influence of cloud parameterization adjustment using reflectivity of Doppler on GRAPES model nowcasting[J]. J Trop Meteor, 28(6):785-796(in Chinese).
- 郑淋淋, 邱学兴, 钱磊, 2019. 同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究[J]. 气象, 45(1):73-87.
- Zheng L L, Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J]. Meteor Mon, 45(1):73-87(in Chinese).
- Anthes R A, 1974. Data assimilation and initialization of hurricane prediction models[J]. J Atmos Sci, 31(3):702-719.
- Gao J D, Stensrud D J, 2012. Assimilation of reflectivity data in a convective-scale, cycled 3DVar framework with hydrometeor classification[J]. J Atmos Sci, 69(3):1054-1065.
- Gao J D, Xue M, Brewster K, et al, 2004. A three-dimensional variational data analysis method with recursive filter for Doppler radars[J]. J Atmos Ocean Technol, 21(3):457-469.
- Hoke J E, Anthes R A, 1976. The initialization of numerical models by a dynamic-initialization technique[J]. Mon Wea Rev, 104(12):1551-1556.
- Kistler R E, McPherson R D, 1975. On the use of a local wind correction technique in four-dimensional data assimilation[J]. Mon Wea Rev, 103(5):445-449.
- Laroche S, Zawadzki I, 1994. A variational analysis method for retrieval of three-dimensional wind field from single-Doppler radar data[J]. J Atmos Sci, 51(18):2664-2682.
- Liou Y C, 1999. Single radar recovery of cross-beam wind components using a modified moving frame of reference technique[J]. J Atmos Oceanic Technol, 16(8):1003-1016.
- Liu Y B, Warner T T, Bowers J F, et al, 2008. The operational meso-gamma-scale analysis and forecast system of the U. S. Army Test and evaluation command. Part I: overview of the modeling system, the forecast products, and how the products are used [J]. J Appl Meteor Climatol, 47(4):1077-1092.
- Qiu C J, Xu Q, 1992. A simple adjoint method of wind analysis for single-Doppler data[J]. J Atmos Oceanic Technol, 9(5):588-598.
- Shapiro A, Ellis S, Shaw J, 1995. Single-Doppler velocity retrievals with Phoenix II data: clear air and microburst wind retrievals in the planetary boundary layer[J]. J Atmos Sci, 52(9):1265-1287.
- Snyder C, Zhang F Q, 2003. Assimilation of simulated Doppler radar observations with an ensemble Kalman filter[J]. Mon Wea Rev, 131(8):1663-1677.
- Sun J Z, Flicker D W, Lilly D K, 1991. Recovery of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-Doppler radar data[J]. J Atmos Sci, 48(6):876-890.
- Tuttle J D, Foote G B, 1990. Determination of the boundary layer air flow from a single Doppler radar[J]. J Atmos Oceanic Technol, 7(2):218-232.
- Weygandt S S, Benjamin S G, Smirnova T G, et al, 2008. Assimilation of radar reflectivity data using a diabatic digital filter within the rapid update cycle[C]//Preprint, 12th Conf on IOAS-AOLS. New Orleans: Amer Meteor Soc.
- 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]. J Appl Meteor Climatol, 44(6):768-788.
- Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al, 2007. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of Typhoon Rusa (2002) at landfall[J]. J Appl Meteor Climatol, 46(1):14-22.

(本文责编:王婷波 戴洋)