

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).

FY-4A 闪电资料在对流天气数值预报中的影响研究^{*}

徐国强¹ 黄守友^{1,2} 赵晨阳³

1 国家气象中心/数值预报中心, 北京 100081

2 中国科学院软件研究所, 北京 100190

3 民航气象中心, 北京 100021

提 要: 利用 GRAPES 云分析系统, 对 2019 年 8 月 4—5 日发生在山西省中北部的太行山区域强对流降水过程进行了分析和数值试验, 重点分析引入 FY-4A 的闪电成像仪(lightning mapping imager event, LMIE)资料对模式计算的雷达反射率、云微物理变量和降水预报的影响。试验结果表明: 加入 LMIE 资料计算得到的雷达回波更接近实测雷达回波, 并且对云水、云冰和雪等云微物理要素进行了调整, 使发生闪电区域的云微物理要素的含量显著增加, 云微物理要素的极值中心一般与闪电活跃区域分布一致。云信息初始化可以有效提高 24 h 以内的降水预报准确率, 减弱数值模式的 spin-up 现象; 加入 LMIE 资料后, 可以进一步提高 1~12 h 降水预报准确率。

关键词: LMIE 资料, 数值试验, 降水预报

中图分类号: P456, P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.09.004

Influence of FY-4A Lightning Data on Numerical Forecast of Convective Weather

XU Guoqiang¹ HUANG Shouyou^{1,2} ZHAO Chenyang³

1 National Meteorological Centre/CMA Numerical Weather Prediction Centre, Beijing 100081

2 Institute of Software, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

3 Aviation Meteorological Center, Beijing 100021

Abstract: A heavy rainfall process which occurred over the Taihang Mountains in central and northern Shanxi Province during 4—5 August 2019 was analyzed by using the GRAPES cloud analysis system, with which numerical experiments were also designed. The effects of the introduction of lightning mapping imager event (LMIE) data of FY-4A on the radar reflectivity, cloud microphysical variables, and rainfall prediction of the model calculation were mainly analyzed. The results indicate that the radar echo calculated by adding the LMIE data was closer to the measured radar echo, and the cloud microphysical elements such as cloud water, cloud ice and snow got adjusted, significantly increasing the content of cloud microphysical elements in the area where lightning occurs. The extreme centers of microphysical elements were generally consistent with the distribution of active areas of lightning. Thus, cloud information initialization could effectively improve the accuracy of precipitation forecast within 24 hours and reduce the spin-up phenomenon

^{*} 国家重点研发计划(2018YFC1506603, 2018YFC1506902)和国家自然科学基金项目(41590874)共同资助

2019 年 12 月 12 日收稿; 2020 年 6 月 12 日收修定稿

第一作者: 徐国强, 主要从事数值模式的物理过程研究. E-mail: xugq@cma.gov.cn

of numerical model. With the addition of LMIE data, the accuracy of 1–12 h precipitation forecast could be further improved.

Key words: lightning mapping imager event (LMIE) data, numerical experiments, rainfall forecast

引言

强对流天气就是指雷雨中伴随出现的强雷电、短时大风、冰雹,甚至龙卷等灾害天气,强对流天气一般具有突发性强、历时短、强度大特征。这种天气带来的短时强风和暴雨危害很大,是大气科学领域重点研究的问题之一。随着对强对流天气研究的深入和科学技术的进步,特别是多普勒雷达观测技术的应用,在观测资料丰富的区域,预报员已经能对强对流天气过程进行很好的跟踪和临近预报。但在观测资料稀缺的高原和山区,对强对流天气的跟踪和临近预报还存在着不足或较大的预报误差。在山区地形复杂,地形的强迫抬升和辐合作用明显,常常在夏季形成特大暴雨过程(徐国强等,1997)。数值预报是现代天气预报的重要基础,在数值预报中,由于初始时刻云微物理量的缺失或不准确,使得模式预报需要一定的调整适应时间,进而导致模式最初预报结果与实况降水存在较大偏差,这就是数值模式的 spin-up 问题。很多科学家利用多源观测资料改进数值模式初始场的分布,使其更符合大气的实际状况,取得了很多研究进展和成果。Albers et al (1996)通过多源资料融合系统(Local Analysis Prediction System, LAPS),将多种常规和非常规资料进行融合分析,获得较为完善的模式初始场。Zhang(1999)、Xue et al(2003)和薛湛彬等(2017)将雷达径向速度和反射率资料应用于 ARPS(Advanced Regional Prediction System)中的 ADAS(ARPS Data Analysis System)云分析系统,对云信息进行初始化,对三维云场、水汽、温度场进行调整,使初始场在动力和热力上达到平衡。刘瑞霞等(2011)、Liu et al(2014)和朱立娟等(2017)进一步将 FY-2 卫星资料加入到云分析系统中,指出在云分析系统中,雷达反射率能够订正云中、底部信息,而卫星资料能够改善云顶分布,证明可以有效解决初始云场信息缺失问题。

在山区、坡地、海面等区域,数值模式云分析系

统面临的最主要的一个问题就是雷达资料缺失的问题,同时我国西北区域雷达部署较少,无法提供更加详细的雷达资料,这些不确定因素影响云分析结果合理性。强对流天气过程发生时,伴有强烈上升运动,云团迅速发展,云中或云地产生电位差,发出闪电和雷声。雷电最先在云内出现,为我们监测和发布预警提供的时间较长;而冰雹、强降水是对流云强烈发展产物,一旦监测到云中冰雹、强降水后离天气发生已经很近了,给我们发布预警的时间很短。随着闪电观测技术的提高,闪电定位仪的部署,闪电观测时间分辨率更高、受地形影响更小,因此闪电资料能够弥补雷达观测的不足。如何更好地利用闪电资料,为科学防御强对流天气的灾害提供帮助,是数值预报研究的重点内容之一,科研人员开始研究如何将闪电资料同化到数值模式中。Chang et al(2001)与 Pessi and Businger(2009)通过建立数据库,将闪电频率与对流降水率建立联系,进而改进模式预报。Liu et al(2012)也通过统计方式,研究总闪与雷达反射率在不同季节、不同区域的定量关系,进而通过总闪数据转换成雷达最大反射率,对原有观测雷达反射率进行补充。Pessi(2013)、Pessi and Albers(2014)进一步指出闪电频率与雷达反射率之间存在很强的对数相关性,并将闪电频数转换成雷达反射率后进行 LAPS 云分析预报,指出闪电资料能够很好反馈出强对流区域,进而改善模式预报。Hu et al(2009)则将闪电频次与雷达反射率垂直廓线建立联系,再将垂直反射率拓展成三维代理雷达回波,弥补实测雷达观测的盲区。王莹等(2015)、王莹(2017)、孙婵(2018)、孙婵和徐国强(2019)利用该方式将地闪资料同化入模式当中,对强对流天气进行同化预报试验,孙玉婷等(2019)进一步考虑地形差异,指出该方法具有良好的适用性,同化闪电资料可以提高模式预报效果,改善降水预报。然而地闪资料仍具有一定局限性,对于强对流天气系统,地闪只占一小部分,而云闪、云间闪占主要部分,与云中上升运动相关性更好(Schultz et al, 2011; 徐燕等, 2018; 孙凌等, 2019)。

我国首次研制并搭载于 FY-4A 卫星的闪电成像仪 (lightning mapping imager, LMI), 可以对云闪、云间闪、地闪在内的总闪电进行凝视观测, 实现对雷暴系统的实时、连续监测和跟踪 (梁华等, 2017)。如何利用这些高时空分辨率的 LMI 全闪电资料提高数值模式预报水平就显得尤为重要。本文利用 LMI 提供的闪电数据对太行山区一次强降水天气过程进行了数值模拟研究, 试图为更好地使用 LMI 资料提供参考。另外, 本文所有涉及的地图是基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2019)1699 号的中国地图制作, 底图无修改。

1 资料与研究方法

1.1 资料选取

采用 FY-4A 的 L2 级全圆盘标称 $10.8 \mu\text{m}$ TBB 数据, 空间分辨率为 4 km, LMI 1 min 事件 (LMIE) 产品数据, 光谱范围为 777.4 nm, 观测间隔为 2 ms, 考虑 FY-4A 无总云量产品, 故采用 FY-2G 的 L2 级 CTA 总云量数据, 空间分辨率为 5 km, 及多普勒雷达反射率因子三维拼图数据, 空间分辨率为 1 km。

其中 LMIE 数据是 LMI 获得的最基本的闪电信号单元。LMI 实时事件处理器将检测到的闪电光辐射的辐亮度与一定的背景阈值进行比较, 提取高于阈值的像元, 判断为一次闪电“事件”, 即像元观测区域云中闪电光辐射透过云层的发光现象, 而对应于 LMI-CCD 面阵该像元中心即为本次闪电“事件”所在位置 (曹冬杰, 2016)。

1.2 质量控制

在使用 LMIE 资料前, 需要对该数据进行质量控制, 滤除闪电分布无效值。由于闪电频次与雷达反射率存在很强的相关性, 因此通过实测雷达反射率对闪电频数进行质量控制。需先根据 LMIE 中的质量控制参数剔除 LMIE 数据中不可信的部分, 再以 330 ms 和 16.5 km 作为闪电聚类条件, 如果两次或多次闪电“事件”发生时间间隔小于 330 ms 且水平位置小于 16.5 km, 则认为这两次或多次闪电“事件”为一次闪电 (陈亚芳等, 2019)。再计数初

始时刻前 25 min, 后 5 min (时间窗口 30 min) 内半网格距的闪电发生的总频次。设置闪电频次阈值为 30 次, 即超过该阈值则将闪电频次强制记录为 30 次。如果统计区域内最大反射率低于 10 dBz, 且记录超过 30 次的, 认为此次记录无效。

1.3 云分析方法

首先根据统计学关系, 通过 GLD360 (Global Lightning Dataset, Vaisala) 和 ENTLN (Earth Networks Total Lightning Network) 提供的闪电数据与雷达反射率建立冷、暖季的定量联系。通过该关系可将闪电频数转换为垂直方向各高度层最大反射率, 进而转换成三维雷达反射率因子代理回波, 并将代理回波填充到实测雷达反射率因子三维拼图数据中, 并作为最终反射率进入模式。再利用 ADAS 云分析系统, 将雷达代理回波及卫星观测资料做云分析处理, 运用新 Smith-Feddes 方案分离出云水、云冰, 运用 SMO 反射率方程方案得到雨水、雪水和雹。最终上述云微物理变量在同化过程中采用松弛逼近 (nudging) 方法进行云内信息初始化, 即在模式积分前 10 步中, 在预报方程中添加线性强迫项, 该项与模式预报和实况之差成正比, 使模式预报逐渐向观测逼近。通过逐步长逼近将同化变量加入到对应变量中, 故可将同化 10 步长后的变量作为模式初始时刻。同化方程为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \sum F_i + a(q_t - q) \quad (1)$$

式中: q 表示在 nudging 逼近同化变量, 主要包括水汽、云水、云冰、云雪、云雨、雹和温度; $\sum F_i$ 表示模式预报方程的其他物理量; a 为 nudging 逼近系数 ($a > 0$); q_t 表示对应时刻 t 的云微物理变量分析得到的值。

闪电频次同化公式为:

$$vref = table\{\max[1, \min(30, nlig)]\} \quad (2)$$

$$tmp_profile = wgt_profile \times$$

$$\left\{h, \min\left[4, 1 + \text{int}\left(\frac{vref - 30}{5}\right)\right]\right\} \times vref \quad (3)$$

式中: $nlig$ 为闪电频数, $table$ 为冷暖季查找表 (表 1), $vref$ 为垂直方向最大反射率, 二者转换关系见表 1; h 为高度层; $wgt_profile$ 表示频次转反射率的关于高度的权重系数 (见图 1); $tmp_profile$ 则表示各高度层上反射率值。

表 1 暖季不同闪电频次对应的最大雷达反射率因子
Table 1 The maximum radar reflectivity corresponding to different lightning frequencies in warm season

<i>nlig</i>	<i>verf</i> /dBz	<i>nlig</i>	<i>verf</i> /dBz	<i>nlig</i>	<i>verf</i> /dBz
1	30.13	11	37.74	21	41.50
2	30.61	12	38.00	22	51.65
3	32.78	13	38.56	23	41.85
4	33.86	14	38.85	24	42.08
5	34.68	15	39.10	25	42.77
6	35.34	16	39.37	26	43.03
7	36.13	17	39.78	27	43.26
8	36.15	18	39.98	28	43.53
9	37.02	19	40.64	29	43.74
10	37.04	20	41.33	30	43.73

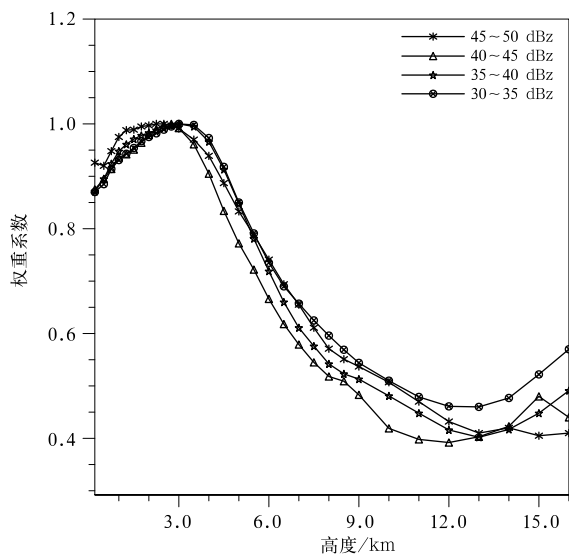


图 1 暖季四组反射率随高度变化的权重系数
Fig. 1 Weight coefficients of four groups of reflectivity varying with height in warm season

2 个例选取与试验设计

2.1 个例选取

本文选取 2019 年 8 月 4—5 日(UTC,下同)山西中北部的太行山区域的强对流降水过程,本次过程山西省气象局分别发布地质灾害气象风险预警、重大气象灾害(暴雨)IV 级应急响应命令。降水实况是在山西省的中东部出现了大暴雨过程。

为对这次强降水过程有直观的了解,首先制作了预报初始时刻的闪电、雷达和卫星 TBB 分布(图 2),由图 2a 可见,在山西省中部存在着一

条东北走向的闪电频数大值区,其中最大值出现在这条闪电大值区的北部,说明这个区域对流旺盛、闪电频繁;在雷达观测拼图中(图 2b),山西省中北部存在着一

2.2 试验设计

数值预报模式采用 GRAPES-Meso 4.3 版,研究区域为 $35^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$,模式背景场为美国 NCEP $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ 的 GFS 资料,模式水平分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$,垂直分层为 50 层,起报时间为 2019 年 8 月 4 日 12 时,积分步长为 60 s,积分时间为 24 h。参数化方案包括:WSM6 微物理方案、Dudhia 短波辐射方案、RRTM 长波辐射方案、Morin-Obukhov 近地面层方案、Noah 陆面过程方案、MRF 边界层方案。

为了探究 LMIE 资料对数值预报结果的影响,对本次强降水过程进行多组数值试验:

试验 1 为模式冷启动,即仅使用 NCEP_GFS 资料做初始场,不添加其他资料进行模式预报,简称 COLD 试验;

试验 2 为控制试验,在 COLD 试验的基础上,添加 FY-4A 的 TBB 数据、FY-2G 的总云量 CTA 数据和雷达反射率数据,简称 CTRL 试验;

试验 3 为闪电影响试验,在 CTRL 试验的基础上再增加 LMIE 数据,重点研究加入闪电数据后对模式预报的影响,简称 TEST 试验。

具体试验方案如表 2 所示:

表 2 试验设计方案
Table 2 Experimental schemes

试验	GFS 背景场	雷达反射率	卫星资料 (TBB、CTA)	LMIE 资料
COLD	✓	×	×	×
CTRL	✓	✓	✓	×
TEST	✓	✓	✓	✓

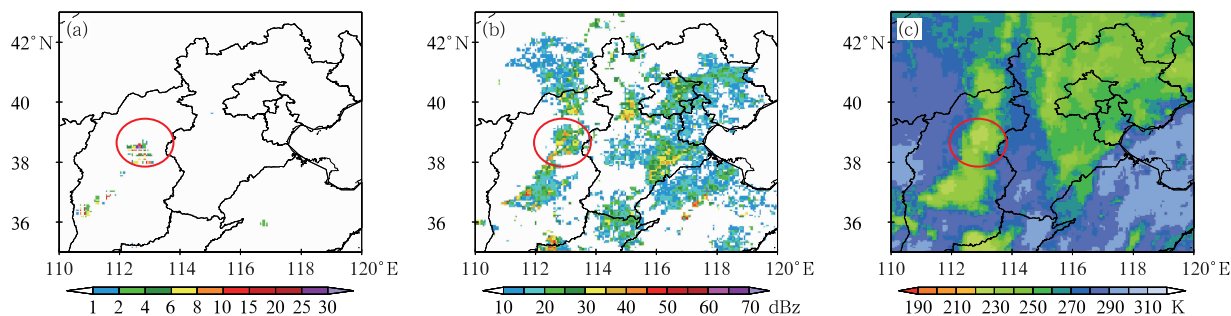


图2 2019年8月4日12时(a)闪电事件频数,(b)雷达反射率因子,(c)TBB分布

Fig. 2 (a) Number of lightning events within 30 min (b) radar reflectivity, (c) temperature of brightness blackbody around 1200 UTC 4 August 2019

3 试验结果分析

本次试验将雷达、TBB、CTA 及 LMIE 资料接入云分析系统,获得初始时刻云微物理量场,再接入 GRAPES-Meso 系统中,进行模式热启动和进行模式预报。本文重点研究卫星闪电资料对对流天气数值预报的影响,分别分析了云初始场和预报降水的变化。

3.1 雷达反射率

首先分析了模式初始时刻观测和各组试验计算得到的雷达反射率图(图3),由于模式冷启动,无云信息资料进入,故没有提供模式冷启时刻的反射率积分值。从图3可以看到,CTRL试验(图3a)和TEST试验(图3b)计算得到的雷达反射率与实况场(图2b)大致接近,只不过回波强度和范围都比实况小一些。在河北省区域,TEST试验与CTRL试

验的雷达反射率基本一致;在山西省区域,两个试验的回波范围没有明显区别,其中在山西中部红圈区域(下同),TEST试验的回波要强于CTRL试验,更接近于观测,而这一回波的增强,正是由于加入闪电资料而引起的。这说明加入LMIE资料计算得到的雷达回波更接近实测雷达回波,即LMIE资料能够较好地捕捉到强对流降水信号。

3.2 云微物理量对比

通过GRAPES云分析系统可以得到初始时刻云微物理量场的三维分布信息,各组试验的云中微物理量的变化就能反映出初始时刻云微物理量的差别。

图4是云水含量三维分布,图4a,4b分别表示CTRL试验、TEST试验在700 hPa层的云水分布,图4c,4d分别为对应于图4a,4b中黑线(38.5°N)所在位置的垂直剖面,图4e表示TEST-CTRL的剖面差值,模式冷启动云水含量为 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,故图略。

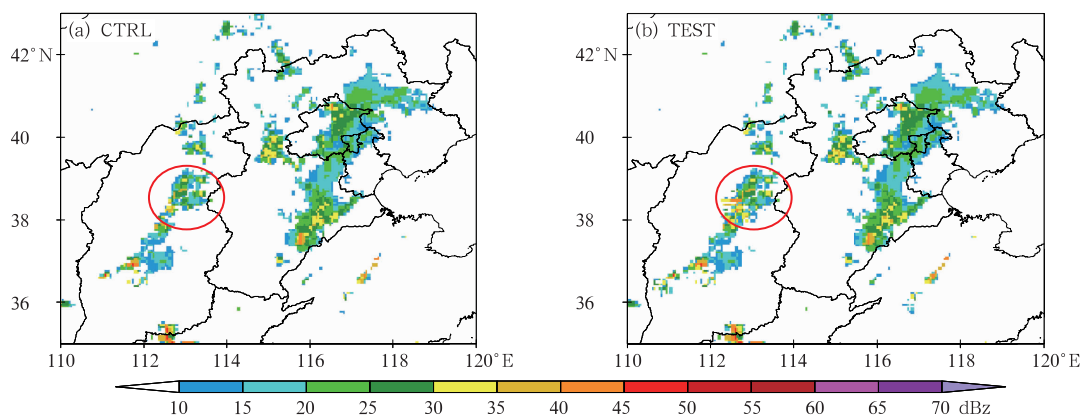


图3 2019年8月4日12时雷达反射率

(a)CTRL试验,(b)TEST试验

Fig. 3 Radar reflectivity at 1200 UTC 4 August 2019

(a) CTRL, (b) TEST

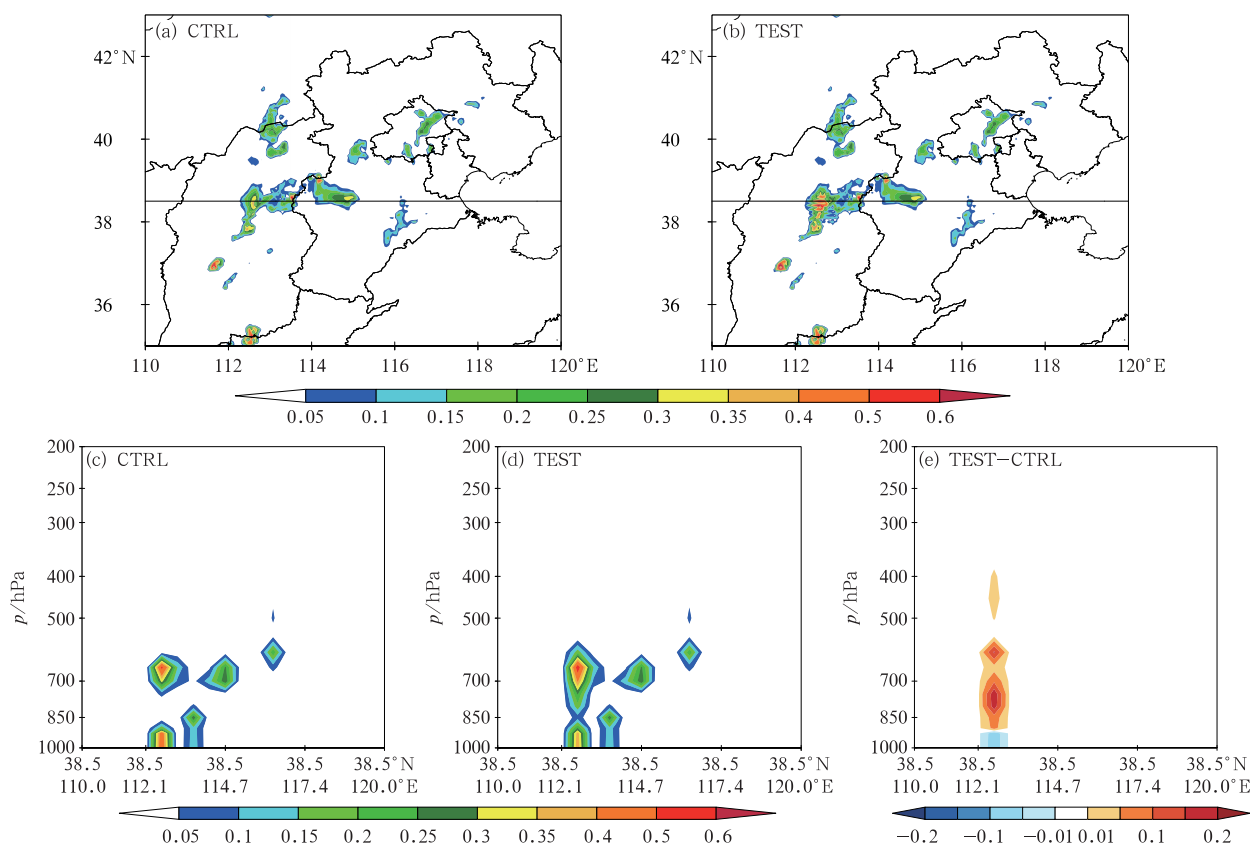


图 4 CTRL 试验 700 hPa(a)云水水平分布和(c)沿图 4a 黑线剖面的云水垂直分布;TEST 试验 700 hPa(b)云水水平分布和(d)沿图 4b 黑线剖面的云水垂直分布;以及沿黑线剖面的云水垂直方向差值(e, TEST-CTRL)(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Horizontal distribution of cloud water at 700 hPa in CTRL (a) and TEST (b),

vertical distribution of cloud water along black lines in CTRL (c) and TEST (d),

vertical difference of cloud water along black lines (e, TEST minus CTRL) (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

从各组试验的云水三维分布(图 4a, 4b)可以明显看到,在 CTRL 试验和 TEST 试验中很大程度提高了模式初始时刻的云水含量,云水含量的分布与雷达反射率最强的区域(图 2b)和亮温最低的区域(图 2c)大致对应,说明该区域中低云系较为密集,而其他区域云水较少,揭示出可能以中高云系为主。从剖面图来看(图 4c, 4d),云水主要分布于 600 hPa 至地面之间;云水极大值中心的分布也能反馈出雨带的分布和强对流中心位置,在对流旺盛区域,云顶旺盛发展,云水物质也随云团被带入到对流层中上层。通过对比剖面差值(图 4e),可以得出,而在加入 LMIE 资料后其主要在对流层中低层对云水物质进行调整,其中 112.3°E 附近的 900~600 hPa 的云水含量显著增加。这表明加入 LMIE 资料后可以在空间上更好地反映强降水区域初始时刻的云水分布情况,为更好地预报强降水过程提供了更准确的云水初始场。

前面分析了低层云水的分布,那么在高层云冰的分布是什么情况呢?为此本文制作了云冰含量三维分布图(图 5),图 5a, 5b 分别表示 CTRL 试验、TEST 试验在 300 hPa 层的云冰分布,图 5c, 5d 分别为对应于图 5a, 5b 中黑线(38.5°N)所在位置的垂直剖面,图 5e 表示 TEST-CTRL 的剖面差值。从各组试验的云水三维分布(图 4a, 4b)可以明显看到,CTRL 试验和 TEST 试验很大程度提高了模式初始时刻的云冰含量,云冰含量的分布与雷达反射率实况(图 2b)大致对应,和亮温(图 2c)非常相似,说明该区域中高云系较为密集。分析图 5c, 5d 可以得到,云冰主要分布于 500~200 hPa,并主要集中于 300 hPa 高度附近。由剖面差值(图 5e)可知,在 112.3°E 附近,LMIE 资料加入后,主要在 500~300 hPa 对云冰进行调整,使云冰含量显著增加,其中在 400 hPa 附近增加最明显,极值中心与闪电活跃区域分布一致,这也间接反映真实大气中该区域存在

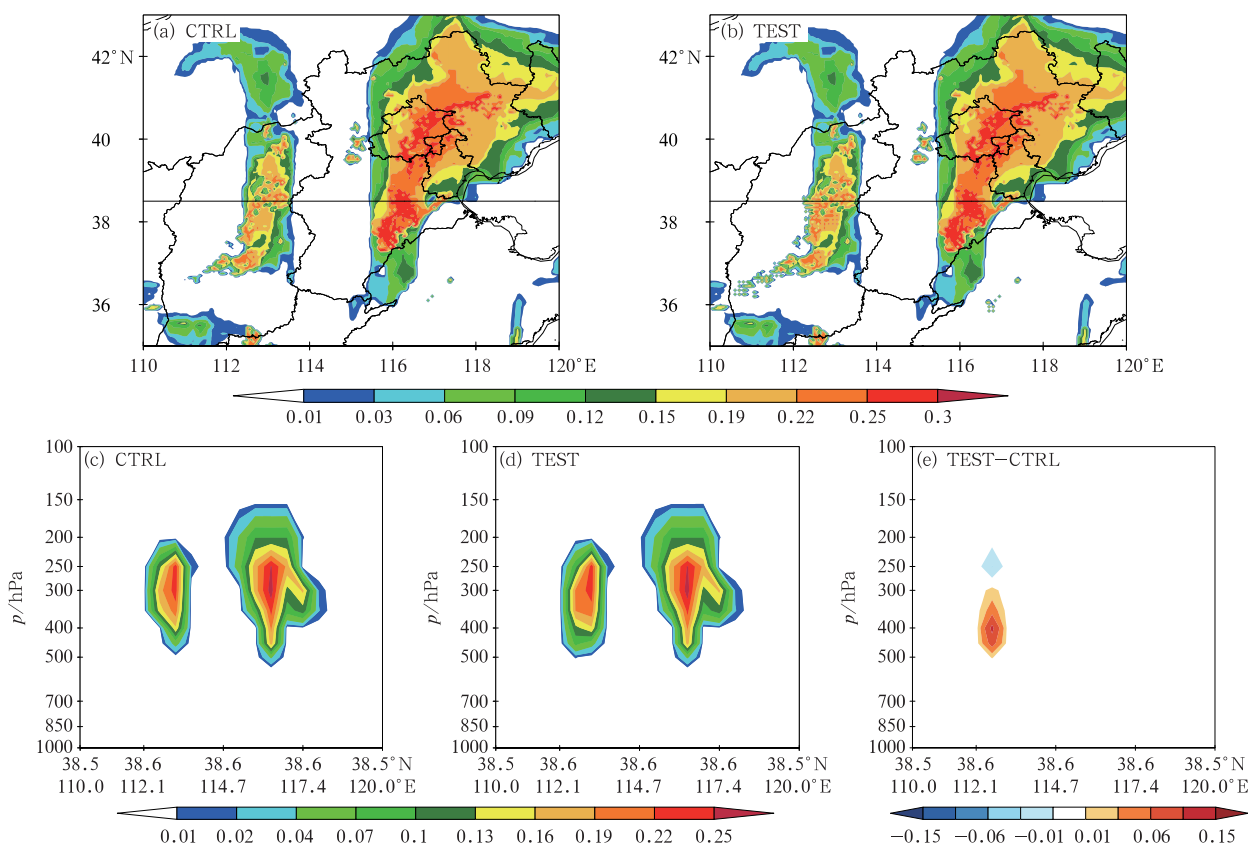


图5 CTRL 试验 300 hPa(a)云冰水平分布和(c)沿图 5a 黑线剖面的云冰垂直分布;

TEST 试验 300 hPa(b)云冰水平分布和(d)沿图 5b 黑线剖面的云冰垂直分布;

以及沿黑线剖面的云冰垂直方向差值(e, TEST-CTRL)(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 5 Horizontal distribution of cloud ice at 300 hPa in CTRL (a) and TEST (b),

vertical distribution of cloud ice along black lines in CTRL (c) and TEST (d),

vertical difference of cloud ice along black lines (e, TEST minus CTRL) (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

较高值的云冰含量。而在河北省区域,由于没有 LMIE 的闪电记录,CTRL 试验、TEST 试验的云冰没有变化。

类似分析云雪含量(图 6),由图 6a,6b 可知,CTRL 试验和 TEST 试验在 400 hPa 层的云雪水平分布基本一致,但其范围明显比云冰的要小一些;分析其沿黑线(38.5°N)垂直剖面图(图 6c,6d)及两个试验的垂直剖面差值图(图 6e)可以得到,在添加 LMIE 资料后,对云雪调整也较为明显,在闪电活跃的 112.3°E 附近,600~200 hPa 高度层上云雪含量也是明显增加。

3.3 模拟降水结果对比

为研究各组试验的模拟降水的情况,分别制作了 1 h、3 h 和 6 h 降水分布图(图 7~图 9),其中每幅图

中各分图 a、b、c、d 均分别表示对应时刻的实况降水、模式冷启动预报降水量、CTRL 试验和 TEST 试验预报降水量。由图 7a 可以看出,实况 1 h 降水雨带主要呈东北—西南走向,降水中心主要在山西省中东部的红圈区域,由图 7b~7d 可以看出,模式向后预报 1 h 后,模式冷启动(图 7b)的预报降水很小,即存在明显的 spin-up 现象;CTRL 试验和 TEST 试验在降水范围上,与实况大致相似;在红圈强降水区域,两个试验预报的降水中心都小于实况,对比发现,TEST 试验的降水大于 CTRL 试验,更接近实况降水。

继续向后预报 3 h,如图 8 所示,模式冷启动(图 8a)预报降水仍然很小,预报效果不理想,仍然存在 spin-up 现象;CTRL 试验和 TEST 试验与实况比较,降水落区较为吻合,但预报降水的中心(红圈区域)强度仍然偏小,相对来说,TEST 试验更接近观测。

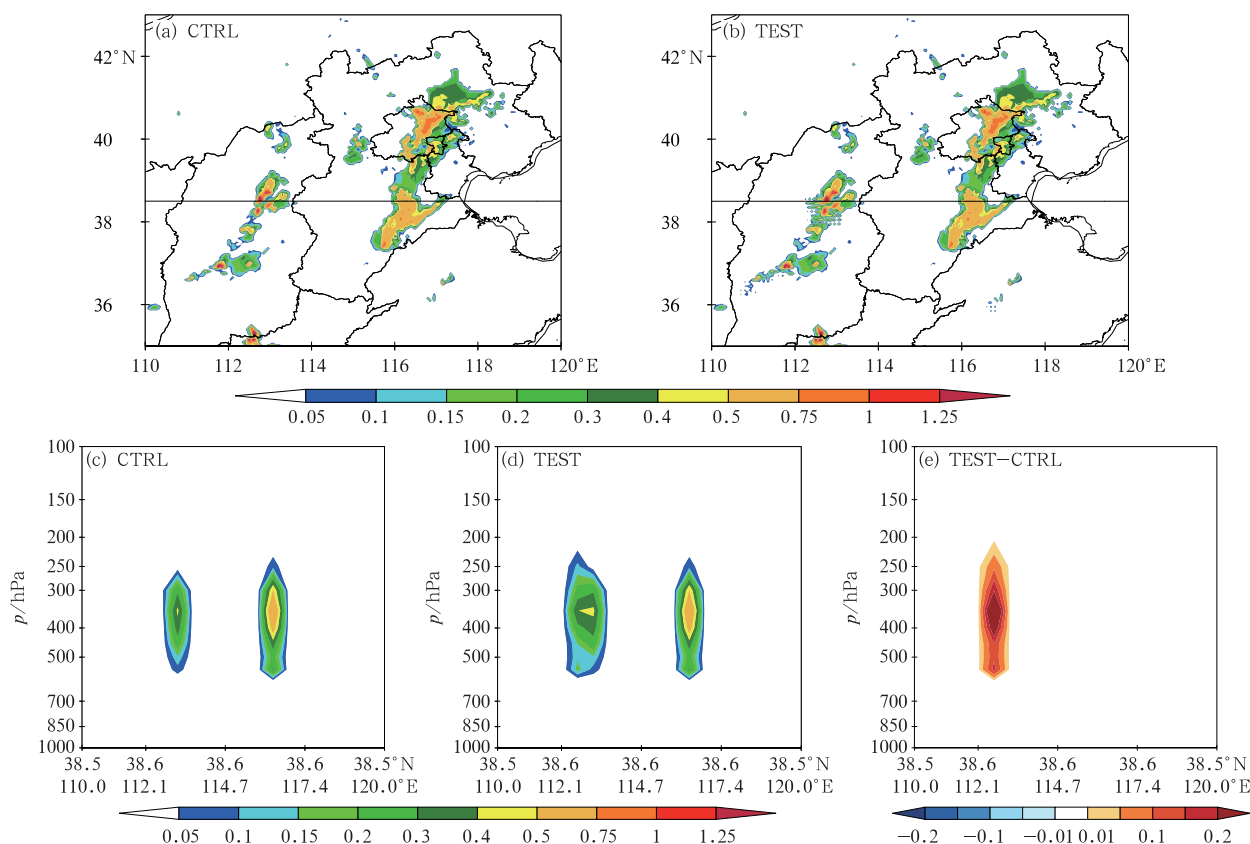


图 6 CTRL 试验 400 hPa(a)云雪水平分布和(c)沿图 6a 黑线剖面的云雪垂直分布;TEST 试验 400 hPa(b)云雪水平分布和(d)沿图 6b 黑线剖面的云雪垂直分布;以及沿黑线剖面的云雪垂直方向差值(e, TEST-CTRL)(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 6 Horizontal distribution of cloud snow at 400 hPa in CTRL (a) and TEST (b),

vertical distribution of cloud snow along black lines in CTRL (c) and TEST (d),

vertical difference of cloud snow along black lines (e, TEST minus CTRL) (unit: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

从 6 h 预报降水分布图(图 9)可以看出,随着模式向后积分,COLD 试验预报降水逐渐加大,但预报的降水范围和强度与实况相比仍明显偏小;CTRL 试验和 TEST 试验与实况相比,降水分布较为一致;同时可以看到,两个试验预报的红圈区域与实况降水中心相比,CTRL 试验预报降水明显偏小,而 TEST 试验在此区域预报的降水中心强度大致吻合,但中心位置略偏西一些。在 12 h 和 24 h 的降水预报中(图略),结果与图 7 类似,也是 TEST 试验的降水预报优于 CTRL 试验。

综合以上分析可以得到,COLD 试验存在明显的 spin-up 现象,加入雷达和卫星等资料可以明显提高数值模式短时预报的准确率,减缓 spin-up 现象;加入 LMIE 闪电资料后,可以提高短时强降水预报的准确率。

上文定性地分析了各组试验预报结果。为了进一步检验 3 组数值试验降水预报效果,根据表 3 给

定的累计降水分级表对 3 组试验进行了更细致的评估分析,评估指标包括 TS 评分和降水偏差 Bias。如图 10 所示,在 1~24 h 的累计降水预报中,TEST 试验和 CTRL 试验的 TS 评分总体都较 COLD 试验偏高,特别是在 1 h(图 10a)、3 h(图 10b)、6 h(图 10c)和 12 h(图 10d)的评分都比 COLD 试验明显偏高;TEST 试验和 CTRL 试验比较,在 1~12 h 各预报时段的所有降水量级 TEST 试验的 TS 评分都略高于 CTRL 试验,在 24 h 累计降水评分中(图 10e),在小雨和暴雨量级,TEST 试验的 TS 评分略高于 CTRL 试验,而中雨和大雨量级,两者差别不大。

分析各组试验的降水偏差(图 11),在 1~24 h 的累计降水预报中,COLD 试验的偏差值一般小于 1.0,说明该试验预报的降水偏少;TEST 试验和 CTRL 试验的偏差都比 COLD 试验的偏差大且更接近于数值 1.0,说明这两组试验预报的降水量优

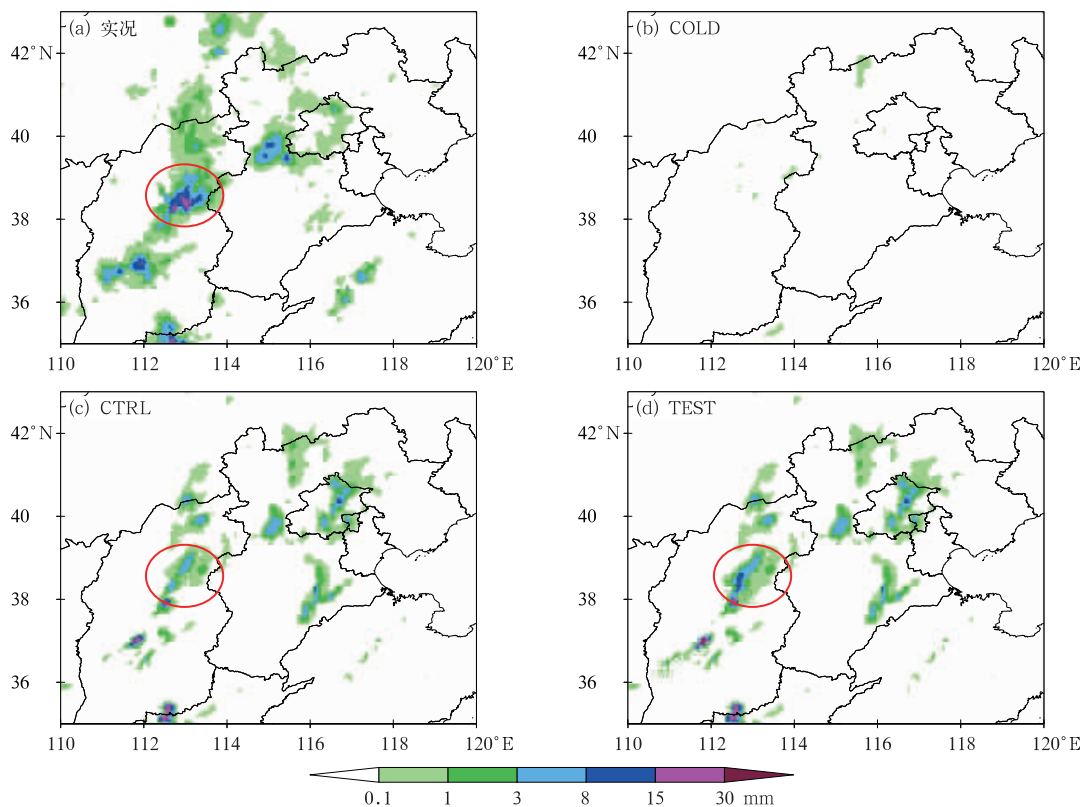


图7 2019年8月4日12—13时(a)实况,(b)COLD试验,(c)CTRL试验,(d)TEST试验1 h累计降水量

Fig. 7 The 1 h accumulated rainfall from 1200 to 1300 UTC 4 August 2019

(a) observation, (b) COLD, (c) CTRL, (d) TEST

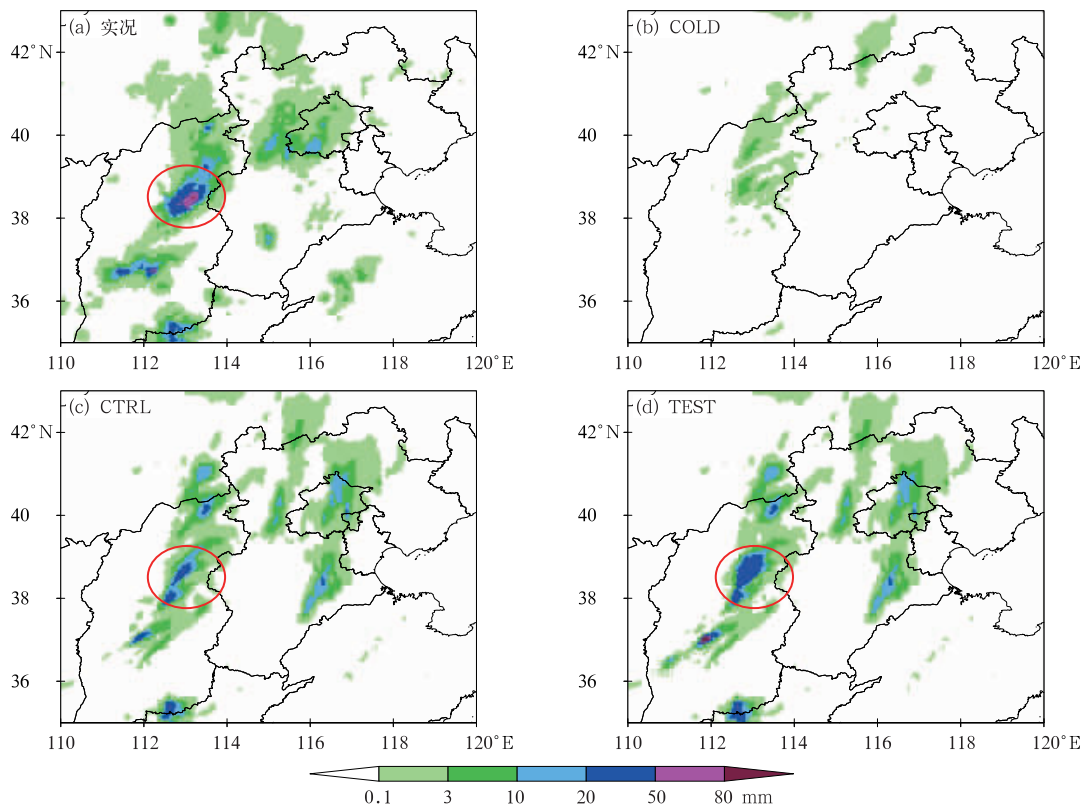


图8 同图7,但为2019年8月4日12—15时3 h累计降水量

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the 3 h accumulated rainfall from 1200 to 1500 UTC 4 August 2019

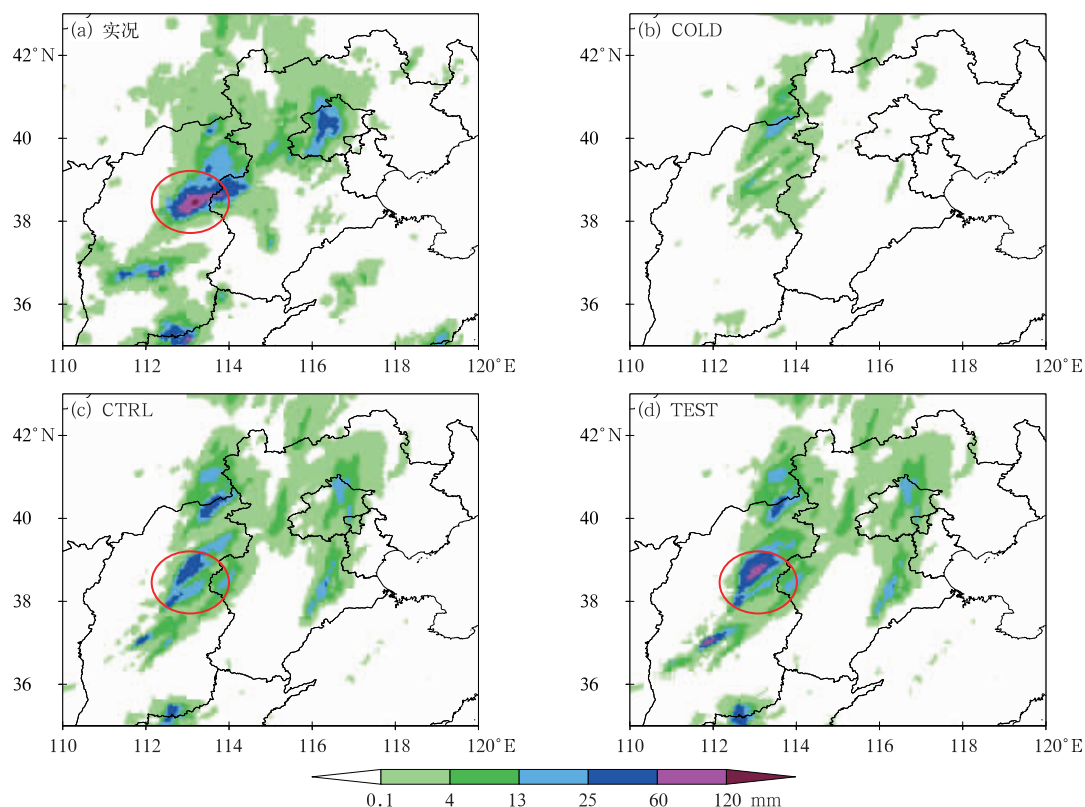


图 9 同图 7, 但为 2019 年 8 月 4 日 12—18 时 6 h 累计降水量

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for the 6 h accumulated rainfall from 1200 to 1800 UTC 4 August 2019

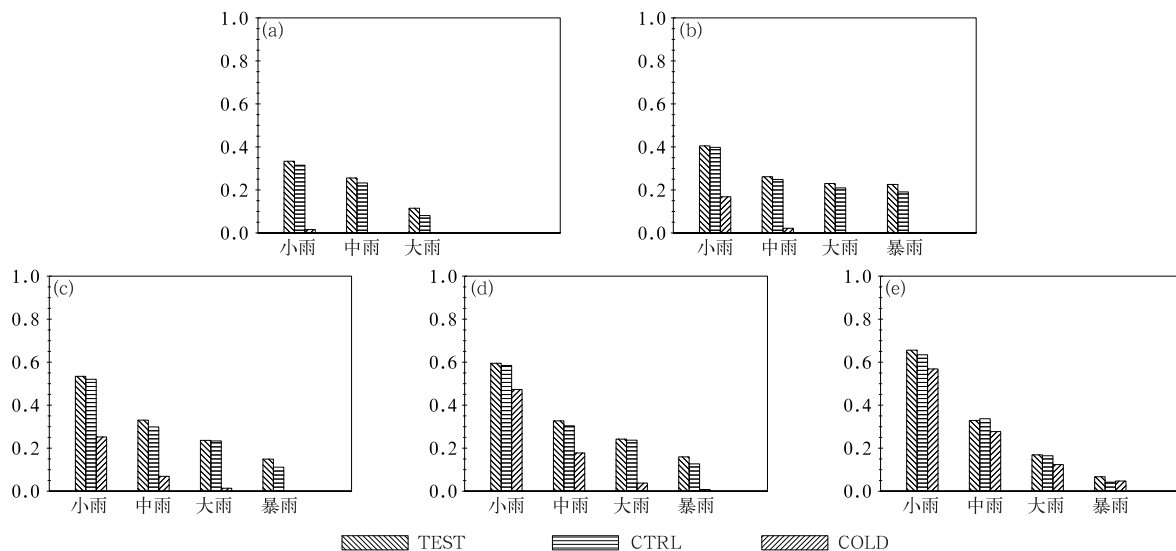


图 10 2019 年 8 月 4—5 日 1 h(a), 3 h(b), 6 h(c), 12 h(d), 24 h(e) 累计降水 TS 评分

Fig. 10 The TS of (a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 12 h and (e) 24 h precipitation forecast for the three experiments

于 COLD 试验的结果。对比分析 TEST 试验和 CTRL 试验, 在 1~6 h 预报的各时间段中(图 11a~11c), 除 1 h 预报的暴雨外, TEST 试验的降水偏差

值基本都比 CTRL 试验更接近数值 1.0, 说明 TEST 试验预报的降水量级更接近实况; 在 12 h(图 11d)和 24 h(图 11e)的预报中, 两组试验的降水偏

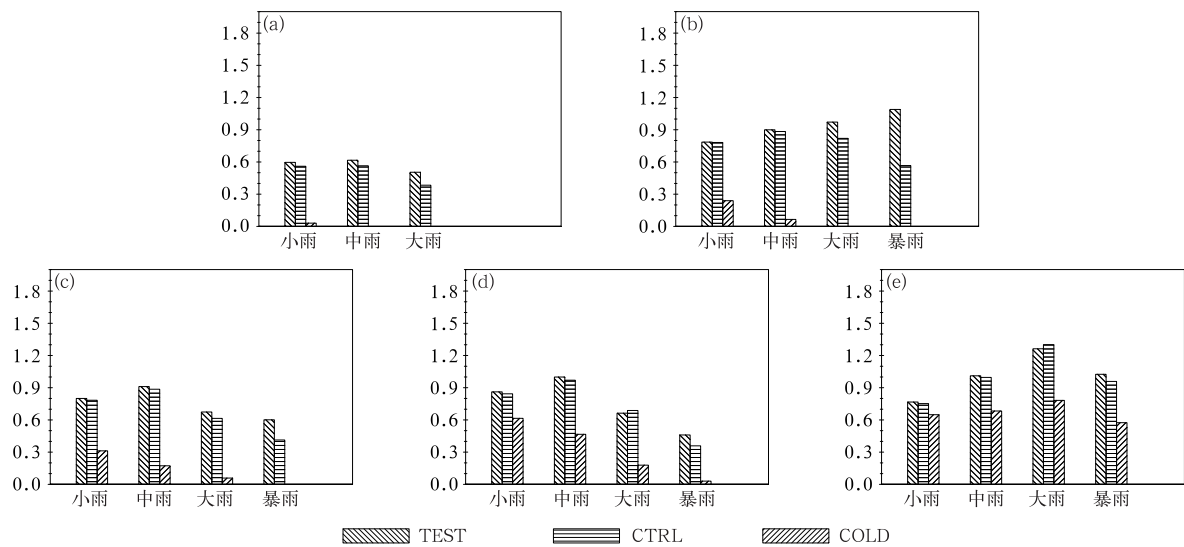


图 11 同图 10, 但为 Bias 评分
Fig. 11 Same as Fig. 10, but for the Bias

差值各有优劣,基本相当。

综合以上分析可以得到,TEST 试验和 CTRL 试验总体都优于 COLD 试验,COLD 试验预报的降水偏少;在 1~12 h 降水预报时段中,TEST 试验的降水预报优于 CTRL 试验,24 h 预报两者基本相当。这说明在 LMIE 数据加入后,对短时降水预报具有明显的正效果。

表 3 累计降水分级(单位:mm)

Table 3 Classification of precipitation (unit: mm)

累计时效/h	小雨	中雨	大雨	暴雨
1	≥0.1	≥1.5	≥7.0	≥15.0
3	≥0.1	≥3.0	≥10.0	≥20.0
6	≥0.1	≥4.0	≥13.0	≥25.0
12	≥0.1	≥5.0	≥15.0	≥30.0
24	≥0.1	≥10.0	≥25.0	≥50.0

4 结论与讨论

本文利用 GRAPES 云分析系统同化 FY-4A 亮温、LMIE 数据、FY-2G 总云量、三维雷达回波数据,对三维云内信息初始化,并应用于短时临近预报过程中。对 2019 年 8 月 4—5 日发生在山西省中北部的太行山区域强对流降水过程进行了分析和数值试验。重点对比分析了加入 LMIE 资料计算得到的雷达回波与实测雷达反射率的区别;分析多种资料

加入后对初始时刻三维云微物理变量的影响;最后分析各试验 1~24 h 降水预报效果,得出如下结论:

(1)加入 LMIE 资料计算得到的雷达回波更接近实测雷达回波,即 LMIE 资料能够较好地捕捉到强对流降水信号。

(2)LMIE 资料加入后,对云水、云冰和雪等云微物理要素进行了调整,一般使发生闪电区域的云微物理要素的含量显著增加,云微物理要素的极值中心一般与闪电活跃区域分布一致。

(3)通过对三维云内信息初始化,提高了 24 h 以内的降水预报准确率,可以有效消除或减弱数值模式的 spin-up 现象。在加入 LMIE 资料后,可以进一步提高 1~12 h 降水预报准确率。

本文通过对一个强对流天气个例的分析,表明 LMIE 资料,能够较好地改善或者降低 spin-up 现象,提高短临预报准确性,为 LMIE 资料在数值预报中的进一步应用提供了有益的参考。从本文的结果也可看出,LMI 资料在地基观测资料相对缺乏的山区和西部高原荒漠地区可能得到更充分有效的应用。

需要指出的是,为了应用 LMIE 资料,首先将其转换成雷达回波的做法实际上是在地面雷达回波(通常对应 LMIE)基础上增强了,因此可以预料到对于控制试验或冷启动试验中模拟降水偏弱的情

况下,应用 LMIE 资料将会得到更强的降水(即改善了模拟结果)。对于控制试验或冷启动试验中模拟降水偏强的情况,则模拟结果的正效果可能不明显。本文仅是通过将 LMIE 资料转换为雷达回波的方式在云分析中进行了应用,未来还需对 FY-4A 的 LMIE 资料及其他资料进行更加深入的分析和广泛的应用,为更好地利用 FY-4A 资料提高数值模式的预报精度提出更多的研究方法和技术手段。

参考文献

- 曹冬杰,2016. 风云四号静止卫星闪电成像仪监测原理和产品算法研究进展[J]. 气象科技进展,6(1):94-98. Cao D J,2016. The development of product algorithm of the Fengyun-4 geostationary lightning mapping imager[J]. Adv Meteor Sci Technol,6(1):94-98(in Chinese).
- 陈亚芳,张其林,张晓黄,等,2019. 风云四号闪电成像仪聚类算法的参数化方案[J]. 电瓷避雷器,(2):103-108,114. Chen Y F,Zhang Q L,Zhang X H,et al,2019. Parameterization scheme of clustering algorithm for FY-4 lightning mapping imager[J]. Insul Surge Arresters,(2):103-108,114(in Chinese).
- 梁华,鲍书龙,陈强,等,2017. FY-4 卫星闪电成像仪设计与实现[J]. 上海航天,34(4):43-51. Liang H,Bao S L,Chen Q,et al,2017. Design and implementation of FY-4 geostationary lightning imager[J]. Aeros Shanghai,34(4):43-51(in Chinese).
- 刘瑞霞,陈洪滨,师春香,等,2011. 多源观测数据在 LAPS 三维云量场分析中的应用[J]. 应用气象学报,22(1):123-128. Liu R X,Chen H B,Shi C X,et al,2011. The application of multi-source data to three-dimensional cloud amount analysis in LAPS[J]. J Appl Meteor Sci,22(1):123-128(in Chinese).
- 孙婵,2018. 闪电资料在 GRAPES 云分析中的应用研究[D]. 北京:中国气象科学研究院:18-50. Sun C,2018. Study on the application of lightning data in GRAPES cloud analysis system[D]. Beijing:Chinese Academy of Meteorological Sciences:18-50(in Chinese).
- 孙婵,徐国强,2019. 闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验[J]. 大气科学,43(1):131-141. Sun C,Xu G Q,2019. Application of lightning location and radar data in cloud analysis system and numerical experiments[J]. Chin J Atmos Sci,43(1):131-141(in Chinese).
- 孙凌,陈志雄,徐燕,等,2019. 北京一次强飚线过程的闪电辐射源演变特征及其与对流区域和地面热力条件的关系[J]. 大气科学,43(4):759-772. Sun L,Chen Z X,Xu Y,et al,2019. Evolution of lightning radiation sources of a strong squall line over Beijing metropolitan region and its relation to convection region and surface thermodynamic condition[J]. Chin J Atmos Sci,43(4):759-772(in Chinese).
- 孙玉婷,赖安伟,王明欢,等,2019. 基于地形差异的闪电频数与雷达回波关系分析[J]. 高原气象,38(6):1320-1331. Sun Y T,Lai A W,Wang M H,et al,2019. Analysis of the relationship between lightning flashes and radar echo based on terrain difference[J]. Plateau Meteor,38(6):1320-1331(in Chinese).
- 王莹,2017. 闪电资料同化对降水模拟改进的研究[D]. 兰州:兰州大学. Wang Y,2017. Study of lightning data assimilation on improving precipitation simulation[D]. Lanzhou:Lanzhou University(in Chinese).
- 王莹,杨毅,邱晓滨,2015. 集合均方根滤波同化地闪资料的试验研究[J]. 干旱气象,33(5):761-768. Wang Y,Yang Y,Qiu X B,2015. Assimilating cloud-to-ground lightning data using ensemble square root filter[J]. J Arid Meteor,33(5):761-768(in Chinese).
- 徐国强,胡欣,苏华,1997. 太行山地形对“96.8”暴雨影响的数值试验研究[J]. 气象,25(7):3-7. Xu G Q,Hu X,Su H,1997. Simulation study of Taihang Mountain terrain effects on heavy rain in august 1996[J]. Meteor Mon,25(7):3-7(in Chinese).
- 徐燕,孙竹玲,周筠珺,等,2018. 一次具有对流合并现象的强飚线系统的闪电活动特征及其与动力场的关系[J]. 大气科学,42(6):1393-1406. Xu Y,Sun Z L,Zhou Y J,et al,2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields[J]. Chin J Atmos Sci,42(6):1393-1406(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).
- 朱立娟,龚建东,黄丽萍,等,2017. GRAPES 三维云初始场形成及在短临预报中的应用[J]. 应用气象学报,28(1):38-51. Zhu L J,Gong J D,Huang L P,et al,2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to GRAPES numerical weather prediction nowcasting[J]. J Appl Meteor Sci,28(1):38-51(in Chinese).
- Albers S C,McGinley J A,Birkenheuer D L,et al,1996. The Local Analysis and Prediction System (LAPS): analyses of clouds, precipitation, and temperature[J]. Wea Forecasting,11(3):273-287.
- Chang D E,Weinman J A,Morales C A,et al,2001. The effect of spaceborne microwave and ground-based continuous lightning measurements on forecasts of the 1998 Groundhog Day storm [J]. Mon Wea Rev,129(8):1809-1833.
- Hu M,Weygandt S S,Benjamin S G,et al,2009. Assimilation of lightning data using cloud analysis within the rapid refresh[C]//89th American Meteorological Society Annual Meeting. Phoenix,Arizona:AMS.
- 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.
- Liu R X, Chen H B, Chen D H, et al, 2014. A case study of impact of FY-2C satellite data in cloud analysis to improve short-range precipitation forecast[J]. Atmos Oceanic Sci Lett, 7(6): 527-533.
- Pessi A T, 2013. Characteristics of lightning and radar reflectivity in continental and oceanic thunderstorms[C]//93th Annual American Meteorological Society Meeting. Austin: AMS.
- Pessi A T, Albers S, 2014. A lightning data assimilation method for the Local Analysis and Prediction System (LAPS); impact on modeling extreme events[C]//94th Annual American Meteorological Society Meeting. Atlanta: AMS.
- Pessi A T, Businger S, 2009. The impact of lightning data assimilation on a winter storm simulation over the North Pacific Ocean [J]. Mon Wea Rev, 137(10): 3177-3195.
- Schultz C J, Petersen W A, Carey L D, 2011. Lightning and severe weather: a comparison between total and cloud-to-ground lightning trends[J]. Wea Forecasting, 26(5): 744-755.
- Xue M, Wang D H, Gao J D, et al, 2003. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. Meteor Atmos Phys, 82(1-4): 139-170.
- Zhang J, 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations[D]. Norman: University of Oklahoma: 25-183.