

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 Chan, Xu Guoqiang. 2019. Application of lightning location and radar data in cloud analysis system and numerical experiments [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (1): 131–141, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17233.

闪电定位和雷达观测资料在云分析中的应用及数值试验

孙婵¹ 徐国强²

¹ 中国气象科学研究院, 北京 100081

² 国家气象中心, 北京 100081

摘 要 本文针对 2016 年 6 月山西、山东地区一次强对流活动, 通过 GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System) 云分析系统融合了多普勒雷达反射率三维组网拼图资料和 ADTD (Active Directory Topology Diagrammer) 闪电定位资料, 对模式初始场的云水、云冰等云微物理变量进行了调整和分析, 并对这次强对流过程设计了 3 组数值试验。结果表明: (1) 云分析系统在加入雷达反射率资料以后, 能在模式初始场中较准确的计算模式的初始水物质; (2) 闪电定位资料转换成的替代雷达反射率对原有的雷达反射率有一定的补充作用, 使模式的初始场与真实状况更接近; (3) 从模式降水的角度看, 在加入雷达资料以后, GRAPES 云分析可以显著提高 6 小时以内降水的模拟效果, 而闪电定位资料的加入, 对中雨以上量级的降水模拟有进一步的改进作用。

关键词 云分析 雷达反射率 闪电定位

文章编号 1006-9895(2019)01-0131-11

中图分类号 P456

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17233

Application of Lightning Location and Radar Data in Cloud Analysis System and Numerical Experiments

SUN Chan¹ and XU Guoqiang²

¹ Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

² National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract In this study, we analyze a strong convective activity occurred in Shanxi Province and Shandong Province in June 2016. Combined with Doppler weather radar three-dimensional mosaic reflectivity data and ADTD (Active Directory Topology Diagrammer) lightning location data, cloud microphysical variables (such as cloud water, cloud ice, etc.) in the initial field can be adjusted and analyzed by the Cloud Analysis System in GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System). Based on this strong convective activity, three sets of experiments are designed. The results indicate that: (1) The cloud analysis system in GRAPES can more accurately analyze cloud microphysical variables in the initial field when the radar reflectivity data is used. (2) The lightning location data can complement radar reflectivity data, making the initial field closer to the real state of atmosphere. (3) From the perspective of precipitation, 6-h forecast of precipitation is improved when the radar reflectivity data is applied. For

收稿日期 2017-09-12; 网络预出版日期 2018-07-02

作者简介 孙婵, 女, 1993 年出生, 硕士研究生, 主要从事数值模式的物理过程研究。E-mail: chan_inspiration@163.com

通讯作者 徐国强, E-mail: xugq@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41590874, 国家重点研发专项 2018YFC1506600

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grant 41590874), National Key Research and Development Program (Grant 2018YFC1506600)

moderate and heavier rain, the application of lightning data can further improve the simulation.

Keywords Cloud analysis, Radar reflectivity, Lightning location

1 引言

云参数是描述积云尺度大气状态的关键要素之一,但是由于观测资料的缺乏,通常云分析模式的初始场仅包含水平风场、气压场、温度场等信息,云水、云冰等云的微物理量在初始场都被设置为零,只有在模式的积分一段时间后才能逐渐产生云块。因为在初始时刻地面观测站已经观测到有降水存在或者正在降水,或者某些区域上空已经观测到形成了深厚的云系,但是模式在积分一段时间后才能成云致雨,这也就造成了模式降水形成的滞后以及降水强度或降水落区与实况存在显著偏差。

在对云分析问题的大量研究中可以看出,目前将雷达资料引入到中尺度模式中来研究强对流天气过程已经取得了一些重要进展。在局地分析预报系统(Local Analysis Prediction System,简称LAPS)云分析基础上发展的ARPS(Advanced Regional Prediction System)数据同化模式/ADAS(ARPS Data Assimilation System)模式,反射率因子能够改进初始场,改进了模拟中的云过程、云水混合比(Zhang, 1999)。在ARPS模式中利用雷达数据对初始场进行调整并进行云分析,能够有效减少模式spin-up(启动预热)的时间(Xue et al., 2003)。盛春岩等(2006a, 2006b)将国内的CINBAD-SA雷达资料同化到中尺度ARPS模式中,通过对比试验发现雷达反射率和径向风信息后,可改进模拟降水效果,且雷达资料的同化比单纯的提高模式分辨率效果更明显。通过ARPS/ADAS云分析系统将雷达反射率因子信息引入到模式的初始场中,可以改进了初始场中水凝物信息和温度场,使得初始场更加符合实际大气状况,降水降雹的峰值也提前出现,明显减少模式spin-up时间,提高模式的准确性(胡金磊和郭学良, 2013)。GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)模式中的云分析模块,是以ARPS模式中云分析方案为基础方案,综合各种资料的云和降水信息,根据云热力—动力学原理和观测试验经验关系等,对云的信息进行分析(朱立娟等, 2017)。

此外,强对流天气过程的一个重要特点是其经

常伴随有频繁的闪电活动,而闪电活动对深对流系统有很好的指示作用。Fierro et al. (2012)通过网格内闪电频率和模拟霰混合比的一个平滑连续方程,将水汽含量加入到混合相态区域($0^{\circ}\text{C} \sim -20^{\circ}\text{C}$)。Qie et al. (2014)建立了闪电频率与冰相粒子之间的经验公式,根据闪电频率调整混合相态层内冰相粒子的浓度,并进行了数值试验。陈志雄等(2017)结合以上两种方法,根据闪电定位资料和模式自身动力与热力状况,增加低层大气内的水汽混合比和混合相态层内的软雹混合比。Zhang et al. (2017)利用闪电频率、水汽混合比和霰混合比的经验关系,调整模式的相对湿度,然后用WRF的3D-var 10 min循环同化方法,并找到合适的同化时间窗口长度,使之与初值条件和随后的预报相适应,使三小时内的预报效果显著提高。王莹等(2014, 2015)将闪电资料作为雷达资料的补充,将闪电资料转换为三维代理回波,再利用集合均方根方法进行同化,可提高三小时内短时临近降水的预报精度。当前,地基低频闪电定位网已经基本覆盖了我国人口聚居地区,可实现对我国主要地区地闪活动的实时监测。另外,我国新一代地球静止轨道定量遥感气象卫星风云四号已于2016年底发射成功,其上搭载有高速闪电成像仪(500帧每秒),可对中国区域及其周边地区的闪电活动进行连续监测(Cao et al., 2014; 董瑶海, 2016)。闪电定位资料能够详细的给出对流云所产生放电的时间、位置、数量、极性和强度等信息,加之其受地形影响较小,可以探测到雷达扫描的盲区,且卫星上搭载的闪电成像仪还可以识别海上的区域,因此从某种意义上闪电资料探测范围广,加之其时间分辨率高(可达毫秒级别),这使得其在强对流天气的预报中具有一定优势。这一方面将拓展闪电资料的覆盖面、保障闪电资料的时空连续性,便于我们更全面的地监测我国及周边地区的闪电活动,同时也为我们如何有效地利用闪电数据提出了更高更迫切的要求。但是,相对于卫星、雷达等其他观测资料而言,闪电资料的研究起步较晚,且闪电观测量并不是模式常规变量,因此不能直接应用于模式初始化中。目前国内对闪电资料在数值预报的应用和影响的研究相对较少。

本文融合我国多普勒雷达反射率三维组网拼图资料和 ADTD (Active Directory Topology Diagrammer) 闪电定位资料, 首先对 ADTD 资料进行了初步分析, 利用闪电频率与雷达反射率之间的经验关系, 将该资料转化成雷达反射率的形式应用于云分析中, 通过这些资料计算云水、云冰等云微物理变量, 并进行了数值模拟试验, 试图对 ADTD 闪电定位资料对数值预报影响进行初步的研究, 为闪电定位资料在数值预报中的应用研究提供有益的参考。

2 资料及研究方法

2.1 雷达及闪电资料

本文采用的雷达资料为我国多普勒雷达反射率因子三维组网拼图资料。该资料经过了质量控制和组网拼图获得, 共分为 20 层, 水平分辨率为 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 单部多普勒天气雷达经过格点化, 进行组网拼图, 当某一点有多部雷达共同覆盖时, 依各雷达资料贡献, 则按指数权重差值的方法计算。该资料的最初形成算法由中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室开发, 后经中国气象局数值预报中心等发展应用 (朱立娟等, 2017)。

本文所用的闪电资料来自中国 ADTD 雷电系统定位数据。ADTD 闪电定位系统主要用来探测云地闪, 覆盖了我国大部分地区, 能区分正负极性, 并且具有数据实时性好、连续性好、覆盖范围大等特点。

由于闪电数据并不是模式中的变量, 必须将其与模式变量相关联。因此, 本文首先将闪电定位资料与雷达反射率因子相联系, 即根据地理信息系统中的经验关系 (其中用到的程序文件为: `convert_lghtn2ref.f90` 以及子函数 `convert_lghtn2ref`), 将闪电资料转换为模拟雷达反射率因子。此经验关系将给定网格 ($0.12^\circ \times 0.12^\circ$) 中的闪电频率与相应柱内网格最高反射率建立联系, 具体如表 1。

而根据经验关系 (Hu et al., 2009) 又可以由柱最大回波反射率因子求出雷达反射率因子垂直分布。根据最大反射率对所有观测的样本的反射率剖面曲线进行分组, 其中每 5 dBZ 为一组进行统计, 计算每组反射率分布的平均从而产生反射率分布。以此经验关系, 就可以在最大反射率的基础上求出这一点反射率因子的垂直廓线。因此, 闪电频数就可以先转换成柱最大模拟反射率因子而后再转换

为模拟反射率因子的垂直分布, 即三维的模拟雷达反射率因子。在得到三维的模拟雷达反射率因子以后, 与实测的雷达组合反射率因子相比较, 取最大值作为最终的雷达反射率因子并带入到 GRAPES 云分析系统中进行运算。

表 1 闪电频率与柱最大回波反射率因子经验关系

Table 1 Empirical relationship between lightning frequency and column maximum reflectivity factor

闪电频率	柱最大回波反射率因子/dBZ	闪电频率	柱最大回波反射率因子/dBZ	闪电频率	柱最大回波反射率因子/dBZ
1	30.13	11	37.74	21	41.50
2	31.61	12	38.00	22	41.65
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

2.2 个例的选取

本文选取 2016 年 6 月 13 日山西、河北南部和山东西部一次强对流天气过程进行实验分析。此次强对流过程造成局地出现 20 mm 以上大冰雹, 10~12 级雷暴大风, 并伴随强烈的闪电现象 (曹艳察和张涛, 2016)。图 1 为 2016 年 6 月 13 日 00:00~24:00 (协调世界时, 下同) ADTD 闪电定位网探测到的每 30 分钟闪电频数分布柱状图, 探测范围为 ($32^\circ \sim 44^\circ \text{N}$, $108^\circ \sim 123^\circ \text{E}$)。从图 1 中可以看出, 这一天闪电活动比较频繁, 如矩形框所示, 峰值在 12:00 左右 (北京时间 20:00) 可以达到每 30 分钟 1000 次以上。此后, 闪电频数逐渐下降。统计该日闪电频数峰值时刻即 12:00 前后 40 min (向前 30 min, 向后 10 min) 闪电频数的空间分布 (图 2a), 以及 12:00 雷达实测最大反射率分布 (图 2b)。由图 2 可以看出, 闪电的分布与实测雷达反射率高值区域的形状较为一致, 闪电高频区域与雷达反射率高值区域的位置也基本对应。此次强对流活动主要集中在山东中西部, 山西、河北的西北部。

3 数值试验设计

为了研究雷达反射率资料和闪电定位资料在云分析过程中的作用以及其对模式积分结果的影响, 本文共设计 3 组试验, 分别将雷达资料和闪

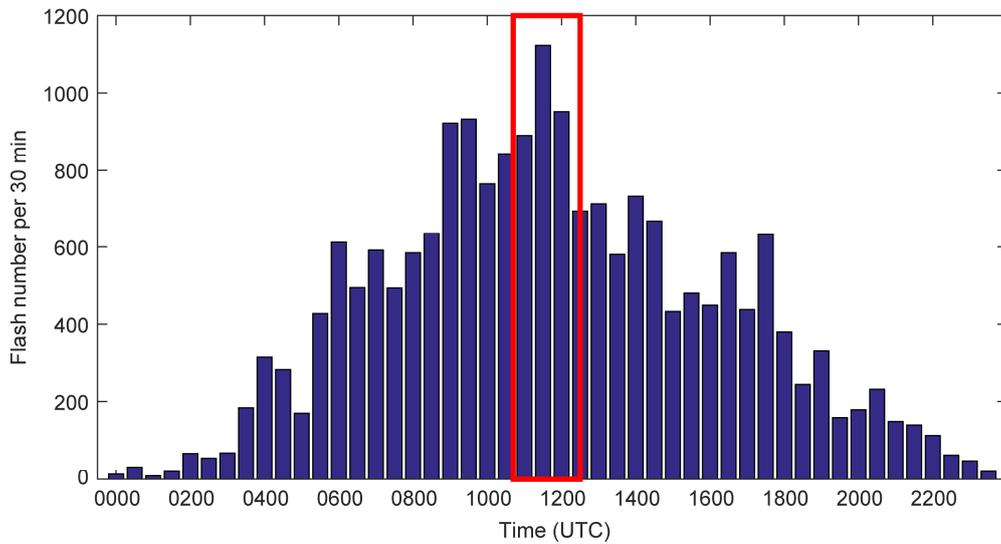


图1 2016年6月13日山西、河北南部和山东西部一次强对流天气过程探测的闪电频率(每30 min)

Fig. 1 Lightning frequency (per 30 min) in a severe convective weather event on 13 June 2016 in the area of Shanxi, southern Hebei, and western Shandong

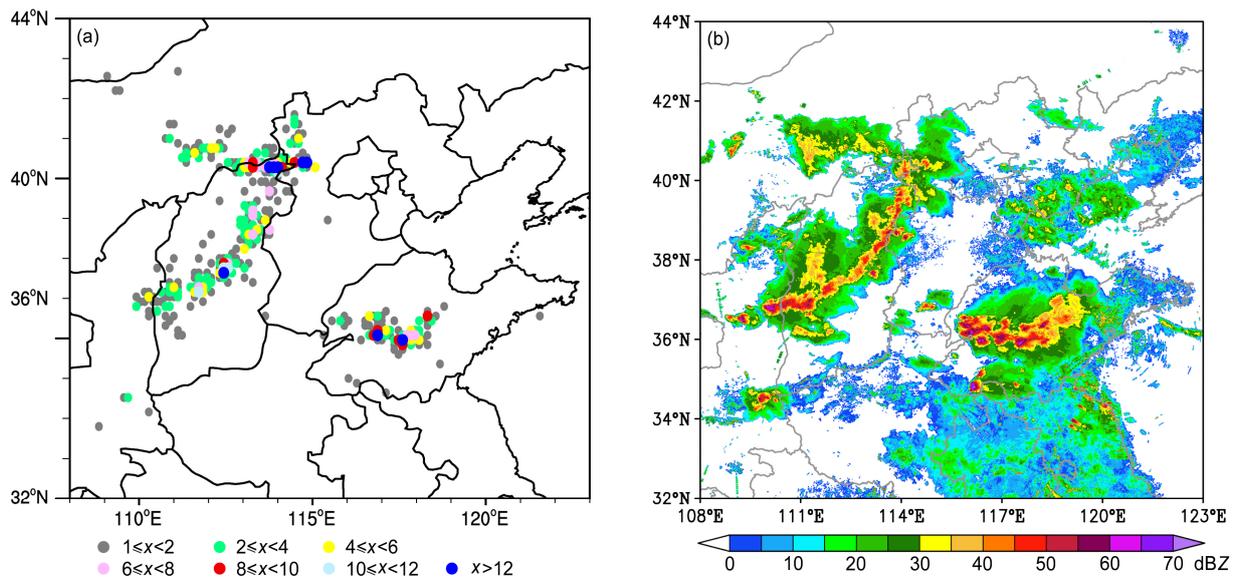


图2 图1强对流天气过程中(a)闪电频率以及(b)实测雷达反射率因子(单位: dBZ)的分布

Fig. 2 Distribution of (a) lightning frequency and (b) observed composite reflectivity (units: dBZ) in the severe convective weather event in Fig. 1

电资料加入云分析过程中, 研究云水、云冰等水物质在初始场的演变。方案1为控制试验, 在进行云分析时只加入卫星资料[采用FY-2G黑体辐射亮温(TBB)数据和总云量(CTA)数据], 简称CTRL; 方案2除加入卫星资料以外, 还使用雷达资料进行云分析试验, 简称TEST1; 方案3, 除方案2的两种资料以外, 还加入了闪电定位资料进行云分析试验, 简称TEST2。具体实验设计如表2。

表2 试验设计方案

Table 2 Design schemes of test

设计方案	卫星资料	雷达反射率资料	闪电定位资料
CTRL	有	无	无
TEST1	有	有	无
TEST2	有	有	有

试验采用GRAPES模式, 使用 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 分辨率的美国NCEP-GFS资料作为模式的背景场, 以2016年6月13日12:00作为模式的初始时间, 积

分时效为 24 h, 模式模拟范围 ($32^{\circ}\sim 44^{\circ}\text{N}$, $108^{\circ}\sim 123^{\circ}\text{E}$), 格点数为 501×401 , 垂直分层 50 层, 时间步长 45 s, 模式水平分辨率 $0.03^{\circ}\times 0.03^{\circ}$ 。物理过程参数化方案采用如下选择: WSM6 微物理过程方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Monin-Obukhov 近地面层方案、Noah 陆面过程方案、MRF 边界层方以及浅对流 Kain-Fritsch (new Eta) 对流参数化方案。

4 数值试验结果分析

GRAPES 模式采用松弛逼近方案将云分析模块产生的云水、云冰和雪等变量, 逐步增加到对应的积分变量上, 同化窗口为模式积分的第 10 步。因此, 本文将积分第 10 步时状态近似地看作模式的初始状态。

图 3 第一行是模式积分 10 步时的组合反射率

因子, 其中图 3a1 是模式初始时刻即 12:00 雷达反射率因子的观测值, 图 3b1、c1、d1 分别是 CTRL、TEST1、TEST2 三个试验模拟值。与 CTRL 相比, TEST1 和 TEST2 大大提高了模式的组合反射率因子, 并且与图 2b 相似, 雷达回波强度较大的地方集中在山西中部、山西与内蒙古交界处以及山东省中部。TEST2 试验中在 40°N 的部分区域(如红色圆圈所示)的反射率因子相较于 TEST1 有明显增加, 这可能是因为雷达数据在这一区域受到地形因素的影响, 而闪电资料反演出的模拟雷达反射率因子对这部分数据进行了补充, 这说明了闪电资料转化的雷达模拟反射率因子对雷达反射率因子有一定的补充效果。图 3 第二和第三行分别是模式 3 h ($15:00$)、6 h ($18:00$) 预报的组合反射率因子与对应时刻观测值的对比, 可以看出 TEST1 和 TEST2 预报结果与实况观测相比, 可以有效地预报出降水

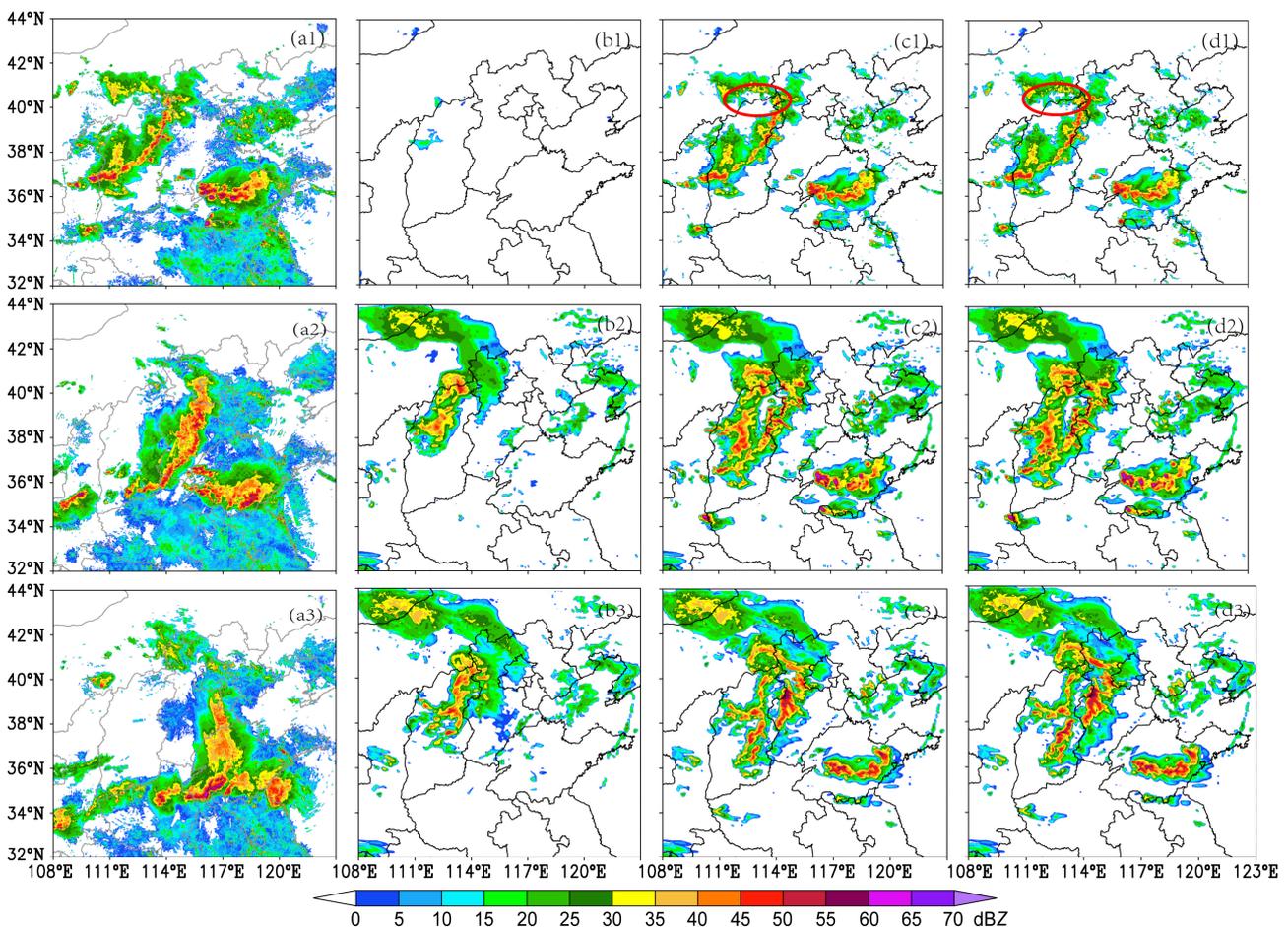


图 3 2016 年 6 月 13 日 12:00 (初始时刻; 第一行)、15:00 (3 h 预报; 第二行) 和 18:00 (6 h 预报; 第三行) 雷达组合反射率因子 (单位: dBZ) 观测和模式模拟结果分布: (a1-a3) 观测; (b1-b3) CTRL 试验; (c1-c3) TEST1 试验; (d1-d3) TEST2 试验

Fig. 3 Distributions of observed and simulated composite reflectivity (units: dBZ) at 1200 UTC (initial time; the first line), 1500 UTC (3-h forecast; the second line), and 1800 UTC (6-h forecast; the third line) on 13 June 2016: (a1-a3) Observation; (b1-b3) CTRL experiment; (c1-c3) TEST1 experiment; (d1-d3) TEST2 experiment

回波,但是在山西中部以及山西北部与内蒙南部回波稍强,而 CTRL 没有做出有效预报。TEST2 与 TEST1 相比,闪电定位资料对雷达组合反射率的影响不明显。

4.1 云微物理量分析

为了更好地认识云分析过程对模式云微物理量的影响,本文分别给出在模式积分第 10 步时,不同高度云水、云冰和雪的水平分布及其垂直分布情况。由于卫星资料在云分析的过程中只调整云量、云高等,对云水、云冰和雪等变量不产生影响,故初始时刻 CTRL 中的云水、云冰和雪几乎为零,因此图略。

图 4 分别是 TEST1 和 TEST2 在 700 hPa 高度上局部(山东省中、西部)的云水分布,和沿红线(纬度约为 36°N)云水的垂直分布。由于 CTRL 试验的云水含量几乎为零,也就是说,雷达资料的加入,很大程度上提高了模式初始时刻的云水含量;而在加入了闪电定位信息以后,这一区域的云水含量也略有提高,其中红线所标注的地方最为明

显。且从云水含量沿 36°N 的垂直分布可以看出,增幅最大出现在 700~800 hPa 之间,如图 4e 表示 TEST2 相对于 TEST1 在云水的增量,可达到 0.2 g kg^{-1} 以上。云水含量较大的区域、加入闪电资料后云水增加的区域均与这段时间强降水的中心区域(图 7a)相吻合,因此可以认为,闪电定位资料的加入有效提高了云水的模拟,与真实的大气状况更为接近。

图 5 是模式积分 10 步时三组试验 300 hPa 高度上云冰的水平分布和沿 40.3°N 的垂直分布。由于模式积分第 10 步并不真正的初始时刻,因此 CTRL 试验在此时产生了少量云冰(图 5a)。但与图 5a 相比,图 5b、c 的云冰含量在山西、河北南部以及山东中西部大幅提高,但差别不大。由垂直分布也可以看出,与 TEST1 相比,TEST2 的云冰含量在 300~400 hPa 的高度上均有提高。

同样对比了 300 hPa 高度上的雪,其结果与云冰类似(图 6),即 CTRL 试验中只有极少的雪,而加入雷达和闪电定位资料的云分析试验 TEST1

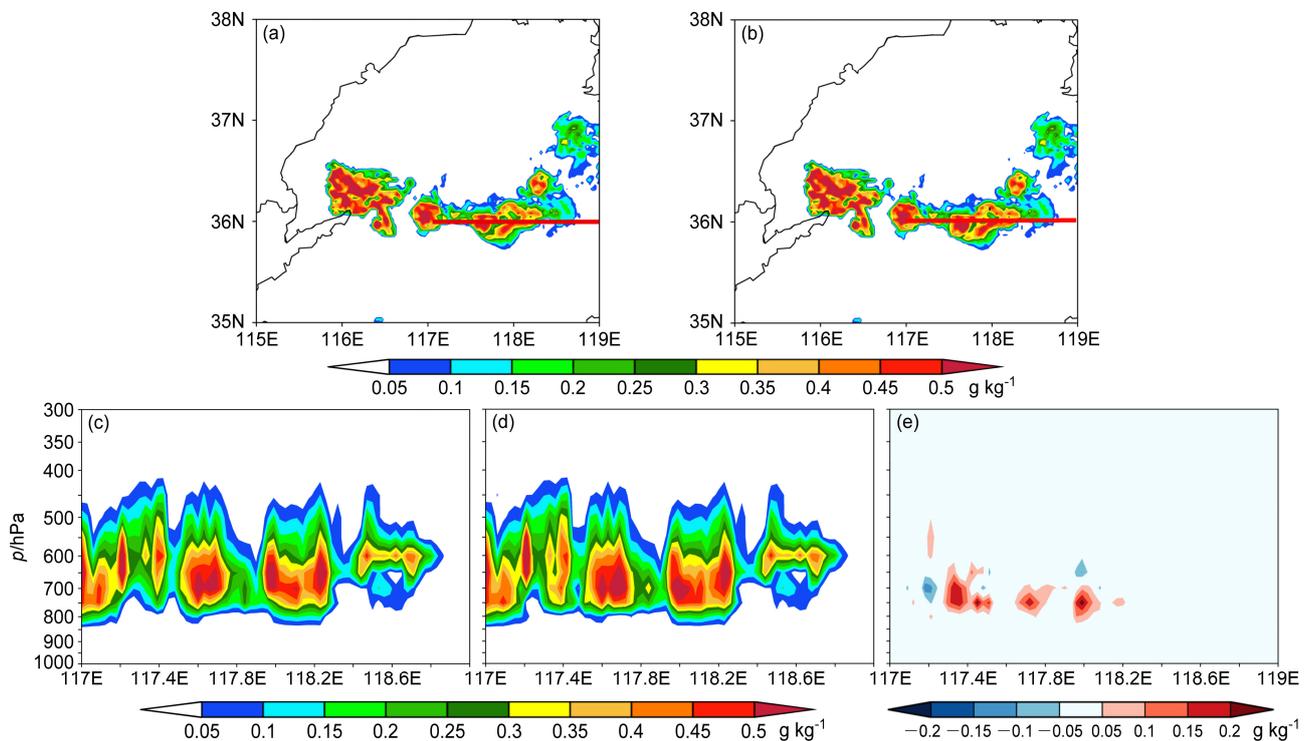


图 4 (a) TEST1 和 (b) TEST2 试验初始场中 700 hPa 的云水含量分布(单位: g kg^{-1}); (c) TEST1 和 (d) TEST2 试验初始场中沿 36°N 剖面(红色实线所示位置)的云水含量垂直分布(单位: g kg^{-1}), 以及 (e) TEST2 试验相对于 TEST1 试验初始场中云水含量的增量(单位: g kg^{-1})

Fig. 4 Horizontal distributions of cloud water contents (units: g kg^{-1}) at 700 hPa in initial fields of (a) TEST1 and (b) TEST2; vertical distributions of cloud water contents (units: g kg^{-1}) along 36°N (the red solid line in Figs. 4a, b) in initial fields of (c) TEST1 experiment and (d) TEST2 experiment, and (e) the increment in TEST2 relative to TEST1

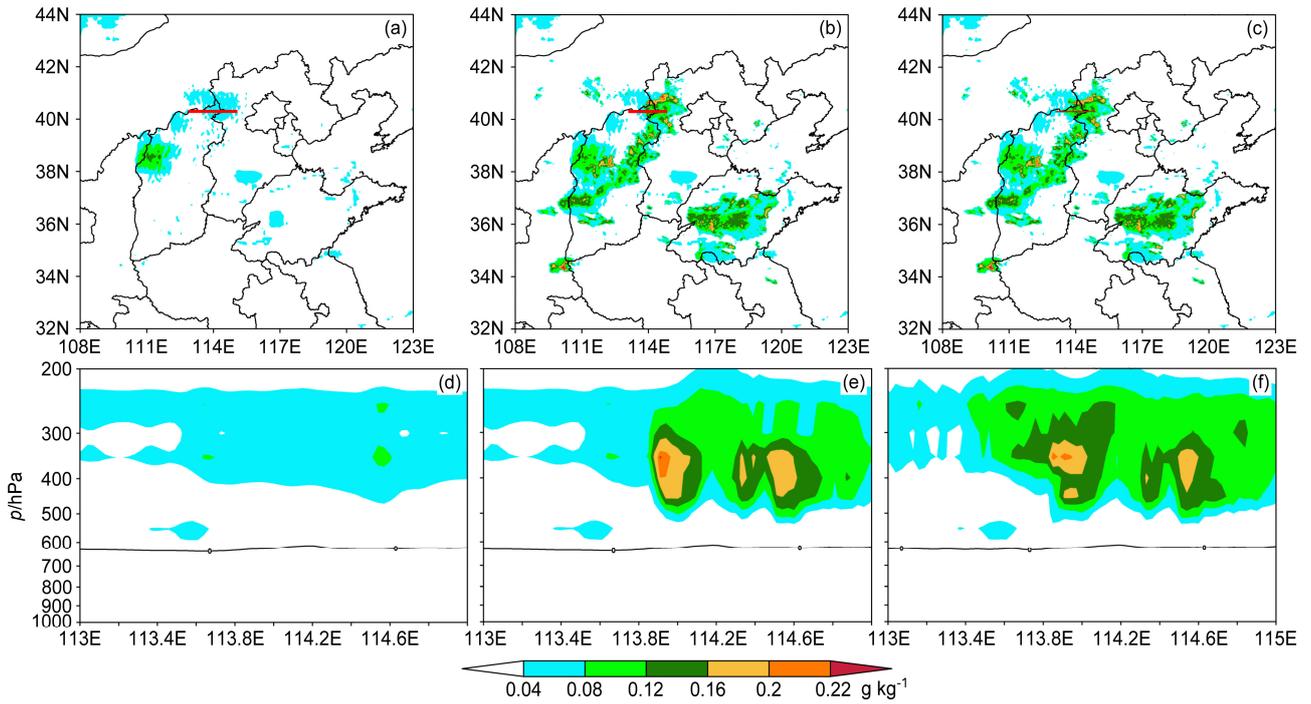


图 5 模式模拟的初始场中 (a、b、c) 300 hPa 的云冰含量分布和 (d、e、f) 沿 40.3°N 剖面 (红色实线所示位置) 的云冰含量垂直分布: (a、b) CTRL 试验; (b、e) TEST1 试验; (c、f) TEST2 试验。单位: g kg^{-1} ; (d、e、f) 中实线为温度零线

Fig. 5 Horizontal distributions (the first line) of cloud ice contents at 300 hPa, vertical distributions of cloud ice contents along 40.3°N (the red solid line; the second line) in initial fields of (a, d) CTRL, (b, e) TEST1, (c, f) TEST2. Units: g kg^{-1} ; the solid lines in (d, e, f) denote zero lines of temperature

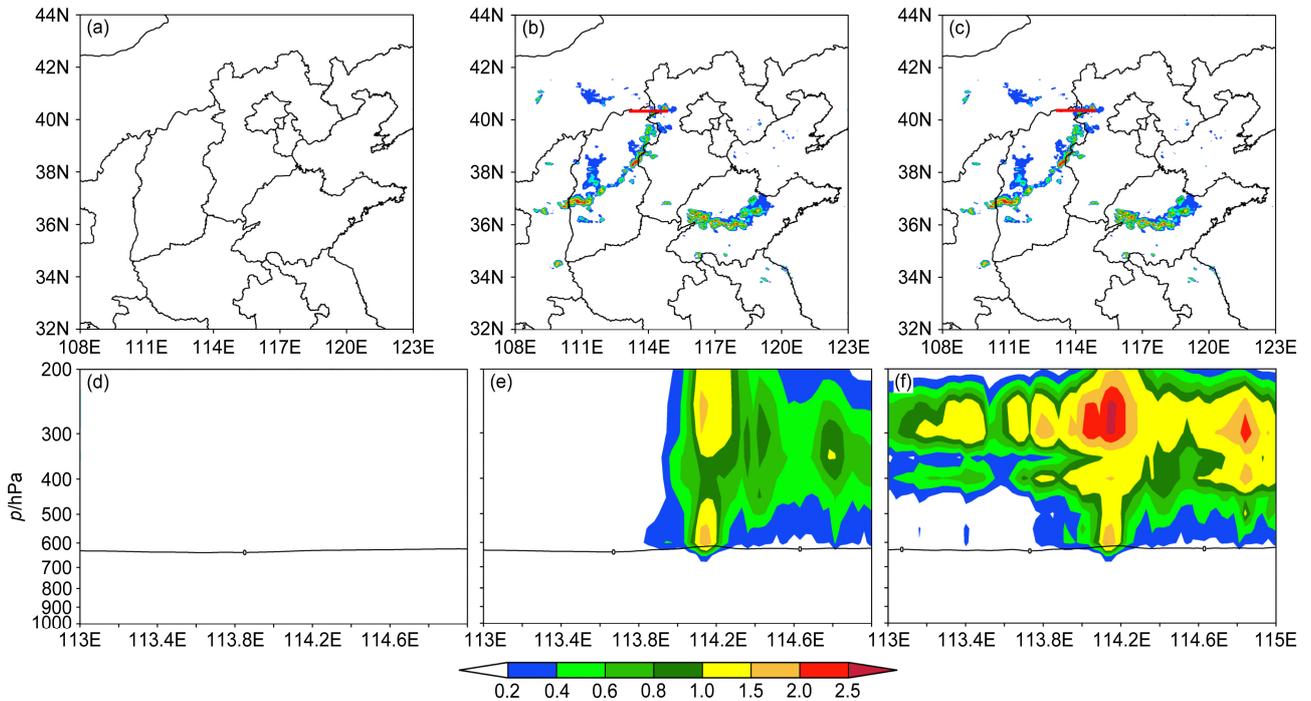


图 6 同图 5, 但为云雪含量分布

Fig. 6 Same as Fig. 5, but for horizontal distributions of cloud snow contents

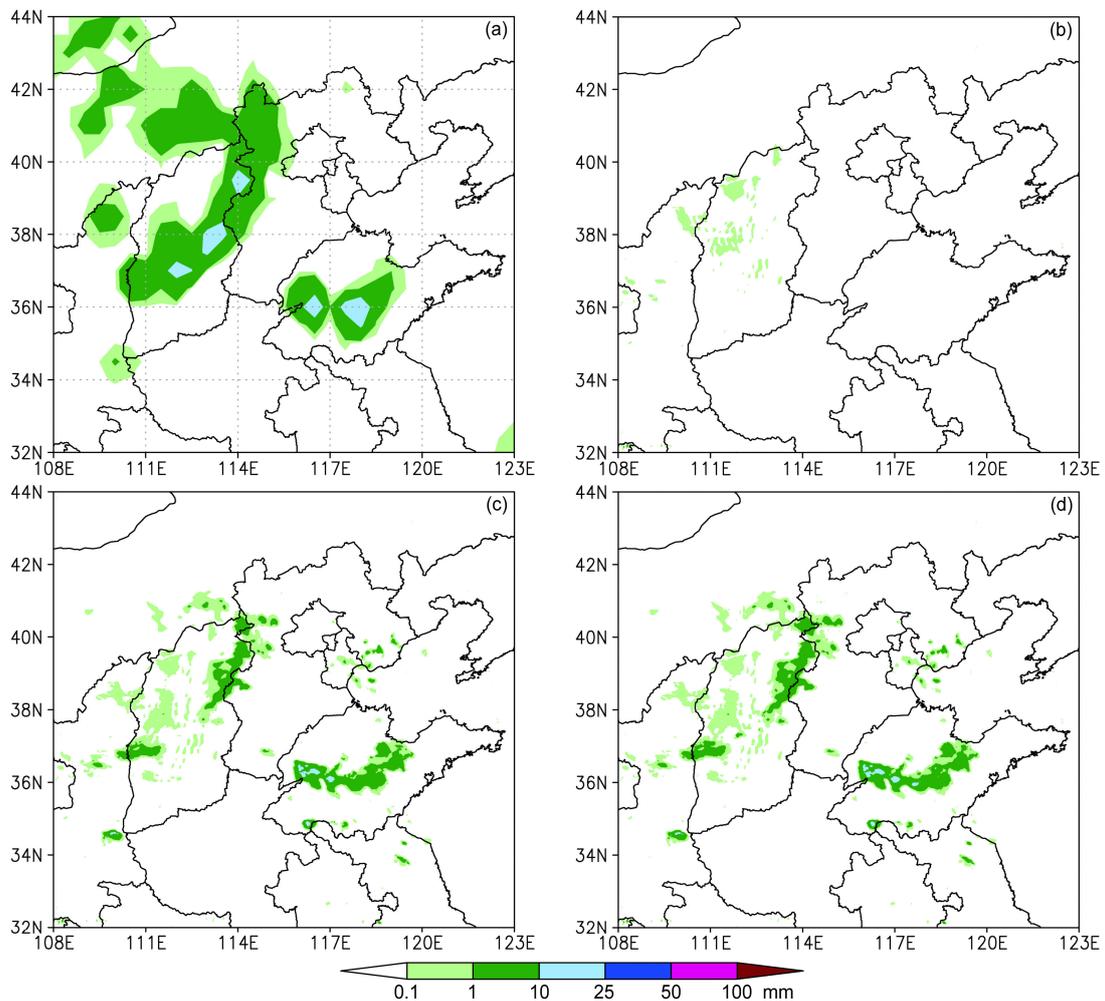


图7 (a) 实况观测与 (b) CTRL、(c) TEST1、(d) TEST2 三组试验模拟的初始时刻起 1h 累计降水分布

Fig. 7 Distributions of 1-h accumulative precipitation since initial time from (a) observations and simulations of (b) CTRL experiment, (c) TEST1 experiment, and (d) TEST2 experiment

和 TEST2 的雪主要分布在降水集中的山西东北部和山东中部;且其中 TEST2 的雪(qs)含量与 TEST1 相比略有增加。

综上所述,在模式初始时刻,TEST1、TEST2 试验中的云水、云冰和雪都较 CTRL 试验有明显增加,且与降水中心的位置更接近;而加入闪电定位资料的 TEST2 试验中,这些云微物理量的含量又较 TEST1 略有增加。因此,用雷达资料和闪电资料的云分析可以使模式初始场与大气的真实状况更为接近,减小或减弱模式的 spin-up 过程。

4.2 模拟降水结果分析

以上对比分析了三组试验经过 GRAPES 云分析后的初始场中云微物理量的水平及垂直分布特点及其差异,下面分析各组试验的模拟降水结果,

进一步说明雷达和闪电定位资料的作用。

从三组试验 1 小时累计降水(图 7)来看,模拟结果都较实况偏弱,但是,与 CTRL 试验相比,TEST1 和 TEST2 的降水强度和降水范围都有大幅提高,可以较为准确地模拟出山西东北和山东中部的降水中心,对天津、北京附近等雨量较小的区域也能有所反应,只是强度偏弱范围偏小。从累计降水分布来看,TEST2 相比于 TEST1 的提高不大,降水中心和强度都基本一致,只有细微的差别。

同样,进一步对比三组模拟试验的 6 小时累计降水(图 8)。从降水范围来看,控制试验(CTRL)在山东中部有明显的漏报,而 TEST1 和 TEST2 则可以弥补这一点,模拟出的降水中心位置较为一致。其中,TEST2 在山东中部模拟的降水强度稍强,

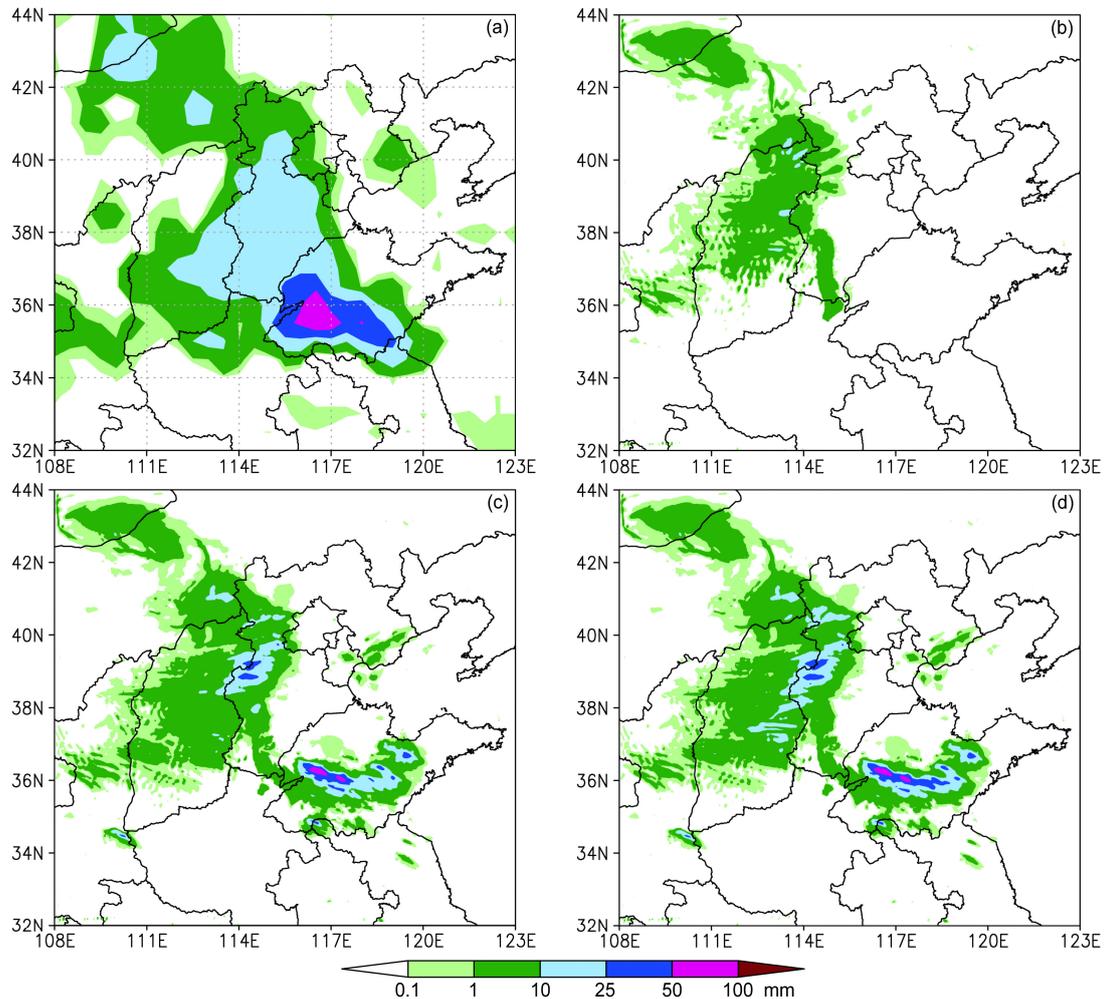


图8 同图7, 但为6 h 累计降水
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 6-h accumulative precipitation

与实况更为接近。这说明了在中到暴雨的模拟中，闪电定位资料能起到一定的补充作用，使模拟结果更加准确。

按照表3给定的累计降水雨量分级表给不同累计时效的雨量进行分级，进而直接对比三组试验的TS评分（Threat Score；图9），可以看出，在临近的1 h 累计降水中，TEST1和TEST2相比于CTRL试验，改进效果显著；其中，量级为大雨的模拟效果，TEST2评分略高于TEST1，但小雨的评分略低，这说明加入闪电定位资料的TEST2模拟出的降水在强度上总体上强于TEST1。从6 h和24 h 累计降水的TS评分中可以看出，对中雨到暴雨的预报，TEST2的准确率最高，TEST1其次；其中6 h 累计降水中，小雨的预报TEST1评分略高于TEST2，而在24 h 累计降水中三者基本持平。图10给出不

同方案累计降水的偏差分布，其区别比较明显。在1小时累计降水（图10a）中，CTRL试验预报偏差小于0.5，且说明降水预报偏弱明显，而TEST1和TSET2在这一时段改进效果明显，但小雨的偏差略大，中雨以上量级仍偏弱一点，其中TEST2的偏差比TEST1更接近于1，即TEST2在1 h 累计降水的准确度更高。在6 h 累计降水中（图10b），TEST1与TEST2小雨的降水偏差几乎为1，中雨以上量级略小，TEST2在暴雨量级的评分优于TEST1；TEST1与TEST2都明显优于CTRL。在24 h 累计降水中（图10c），三组试验各有优劣，效果相差不明显，综合来看TEST2效果最好，TEST1预报降水偏强一些。

通过以上分析可以说明，在加入雷达资料以后GRPAPS云分析可以显著提高6 h 以内降水的模拟

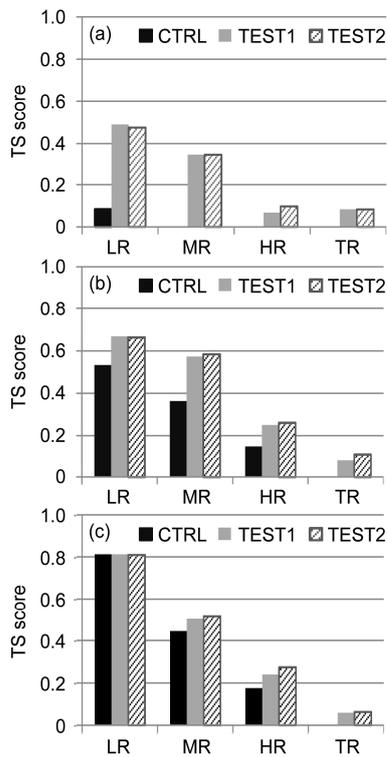


图9 (a) 1 h、(b) 6 h 和 (c) 24 h 累计降水 TS (Threat Score) 评分。LR、MR、HR 和 TR 分别为小雨、中雨、大雨和暴雨的简称
Fig. 9 TS (Threat Score) scores for (a)1-h, (b) 6-h, and (c) 24-h accumulative precipitation. LR, MR, HR, and TR denote light rain, moderate rain, heavy rain, torrential rain, respectively

效果，而闪电定位资料的加入，对中雨以上量级的降水模拟具有进一步的改进作用。

表3 累计降水雨量分级表

Table 3 Classification of precipitation

雨量分级	累积降水量/mm		
	1 h	6 h	24 h
小雨 (LR)	≥0.1	≥0.1	≥0.1
中雨 (MR)	≥1.5	≥4.0	≥10.0
大雨 (HR)	≥7.0	≥13.0	≥25.0
暴雨 (TR)	≥15.0	≥25.0	≥50.0

5 总结与讨论

本文选取 2016 年 6 月 13 日发生在山西河北南部和山东中西部的一次强对流过程，设计了加入雷达反射率因子和闪电定位资料的三组不同的数值试验。首先对比分析了云分析过程中加入闪电定位信息对雷达反射率因子的直接影响；其次对比分析了在模式初始时刻加入反射率因子信息和闪电定位信息以后云微物理变量（云水、云冰、雪）的变

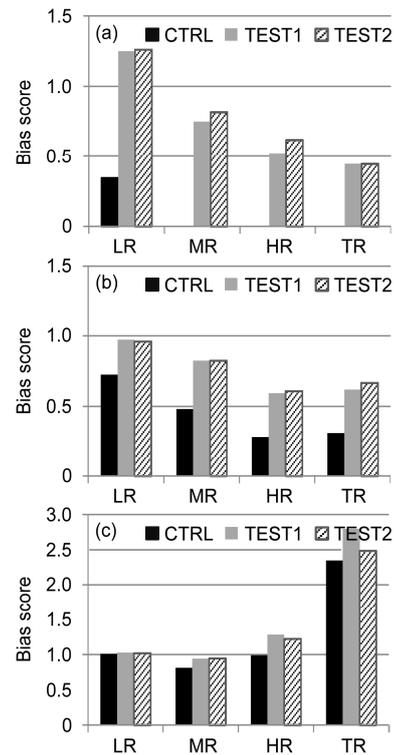


图10 (a) 1 h、(b) 6 h 和 (c) 24 h 累计降水偏差评分
Fig. 10 Bias scores for (a)1-h, (b) 6-h, and (c) 24-h accumulative precipitation

化；最后，进一步比较了三组试验模拟的模式降水的预报效果。可以得到如下初步结论：

(1) 云分析系统在加入雷达反资料以后，能在模式初始场中较准确的描述模式的初始水物质；而闪电定位资料转换成的模拟雷达反射率因子对原有的雷达反射率因子有一定的补充作用。

(2) TEST1、TEST2 试验中的云水、云冰和雪都较 CTRL 试验有明显增加，且与实际的降水中心的位置更接近；而加入闪电定位资料的 TEST2 试验中，这些水物质的含量在山东中西部、山西河北南部又较 TEST1 略有增加，即用雷达资料和闪电资料的云分析可以使模式初始场与大气的真实状况更为接近，减小或减弱模式的 spin-up 过程。

(3) 分析比较各组实验的模拟降水结果，1 h、6 h 和 24 h 的累计降水中，TEST1 和 TEST2 的效果明显优于 CTRL，对比 TS 评分和降水偏差，TEST2 在中雨以上量级的模拟效果要好于 TEST1。以上说明在加入雷达资料以后，GRPAPS 云分析可以显著提高 6 h 以内降水的模拟效果，而闪电定位资料的加入，对中雨以上量级的降水模拟有进一步的改进作用。

参考文献 (References)

- Cao D J, Huang F X, Qie X S. 2014. Development and evaluation of detection algorithm for FY-4 Geostationary Lightning Imager (GLI) measurement [C]//Proceedings of XV International Conference on Atmospheric Electricity. Norman, Oklahoma.
- 曹艳察, 张涛. 2016. 2016年6月大气环流和天气分析 [J]. 气象, 42 (9): 1154–1160. Cao Yancha, Zhang Tao. 2016. Analysis of the June 2016 atmospheric circulation and weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42 (9): 1154–1160, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.09.013.
- 陈志雄, 鄒秀书, 田野, 等. 2017. 云分辨尺度下一种综合调整水质含量的闪电资料同化方法 [J]. 气象学报, 75 (3): 442–459. Chen Zhixiong, Qie Xiushu, Tian Ye, et al. 2017. Assimilation of lightning data through comprehensively nudging water contents at the cloud-resolving scale [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 75 (3): 442–459, doi:10.11676/qxxb2017.035.
- 董瑶海. 2016. 风云四号气象卫星及其应用展望 [J]. 上海航天, 33 (2): 1–8. Dong Yaohai. 2016. FY-4 meteorological satellite and its application prospect [J]. Aerospace Shanghai (in Chinese), 33 (2): 1–8, doi:10.19328/j.cnki.1006-1630.2016.02.001.
- Fierro A O, Mansell E R, Ziegler C L, et al. 2012. Application of a lightning data assimilation technique in the WRF-ARW model at cloud-resolving scales for the tornado outbreak of 24 May 2011 [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (8): 2609–2627, doi:10.1175/MWR-D-11-00299.1.
- 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 Jinlei, Guo Xueliang. 2013. Application of cloud analysis with radar data in hail cloud nowcasting [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 41 (4): 682–689, doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2013.04.016.
- Hu M, Weygandt S S, Benjamin S G, et al. 2009. Assimilation of lightning data using cloud analysis within the rapid refresh [C]//Proceedings of the 89th American Meteorological Society Annual Meeting.
- Qie X S, Zhu R P, Yuan T, et al. 2014. Application of total-lightning data assimilation in a mesoscale convective system based on the WRF model [J]. Atmospheric Research, 145–146: 255–266, doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.012.
- 盛春岩, 浦一芬, 高守亨. 2006a. 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 Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. 2006a. effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 93–107, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.08.
- 盛春岩, 薛德强, 雷霆, 等. 2006b. 雷达资料同化与提高模式水平分辨率对短时预报影响的数值对比试验 [J]. 气象学报, 64 (3): 293–307. Sheng Chunyan, Xue Deqiang, Lei Ting, et al. 2006b. Comparative experiments between effects of Doppler radar data assimilation and increasing horizontal resolution on short-range prediction [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 64 (3): 293–307, doi:10.11676/qxxb2006.028.
- 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 Ying, Yang Yi, Qiu Xiaobin. 2015. Assimilating cloud-to-ground lightning data using ensemble square root filter [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 33 (5): 761–768, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0761.
- 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, doi:10.1007/s00703-001-0595-6.
- Zhang R, Zhang Y J, Xu L T, et al. 2017. Assimilation of total lightning data using the three-dimensional variational method at convection-allowing resolution [J]. Journal of Meteorological Research, 31 (4): 731–746, doi:10.1007/s13351-017-6133-3.
- Zhang J. 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations [D]. Ph. D. dissertation, School of Meteorology, University of Oklahoma, 212p.
- 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 Lijuan, Gong Jiandong, Huang Liping, et al. 2017. Three-dimensional cloud initial field created and applied to grapes numerical weather prediction nowcasting [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28 (1): 38–51, doi:10.11898/1001-7313.20170104.