FY4A 闪电与 ADTD 闪电资料在四川冕宁暴雨中的对比分析及数值

模拟研究



摘要 FY-4A 卫星闪电与地基 ADTD (Advanced Direction and time of arrival Detecting system)闪电资料对于研究暴雨强对流天气具有一定的指示意义,通过对四川冕宁暴雨个例的研究,对比分析了这两种闪电资料的差别,设计了将两种闪电资料引入数值预报模式的多组数值试验。结果表明,(1)两种闪电资料在不同地区有不同的探测效果,ADTD 闪电资料范围更广且分散,FY-4A 卫星监测到的闪电数量更密集、分布更集中;两种闪电资料在进入模式之后所转化成的代理雷达回波具有很好的一致性;对于低频次的闪电来说,ADTD 闪电定位仪可能比 FY-4A 闪电成像仪探测效率更高;(2)引入任何一种闪电资料都对降水预报具有正效果,其中 ADTD 闪电资料的应用对于短时降水预报准确率的提高更为有效。(3)两种闪电资料对于云微物理量的调整作用,在不同的区域有不同效果,说明这两种闪电资料的分布不完全一致,揭示出这两种闪电资料具有一定的互补性。

关键词 闪电资料;对比;云分析;数值试验 文章编号 2021110A

DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000

Comparative Analysis and Numerical Simulation of Lightning

Detection Data from FY-4A LMI and ADTD in Rainstorm in

MianNing, SiChuan Province

ZHAO Chuo¹, XU Guoqiang², HUANG Shouyou³, CHENG Giajia¹

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Center for Earth System Modeling and Prediction of China Meteorological administration, Beijing 100081

3 Instituete of Software Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

收稿日期 2021-11-15 网络预出版日期

第一作者 赵婥,1998年,女,硕士研究生,主要从事数值模式的物理过程研究。Email:

zhao_chuo@163.com

通讯作者 徐国强,1964年,男,研究员,主要从事数值模式的物理过程研究。Email: xugq@cma.gov.cn 资助项目 国家重点研发计划项目(2018YFC1506603,2018YFC1506902) 、国家自然科学基金项目 (42175167) Abstract The lightning data of FY-4A satellite and ADTD (Advanced Direction and time of arrival Detecting system) are significant for the study of rainstorm and severe convection weather. This paper compares and analyzes the difference between the two lightning data through a case study of rainstorm in MianNing, SiChuan Province, a series of numerical experiments are designed to introduce two kinds of lightning data into the numerical prediction model. The main conclusions show as follows: (1) Two kinds of lightning data have different detection effect in different areas. The ADTD lightning data are more extensive and scattered, and the number and distribution of lightning detected by FY-4A satellite are more intensive. There is a good consistency between the two kinds of surrogate radar echo transformed by two kinds of lightning data . For low frequency lightning, the ADTD lightning localizer may be more efficient than Fy-4A LMI. (2) The introduction of these two types of lightning data has positive effects on precipitation forecast, and the application of ADTD lightning data is more effective for improving the accuracy of short-time precipitation forecast. (3) The two types of lightning data have different effects on the adjustment of cloud microphysical quantities in different regions. This shows that the distribution of the two types of lightning data is not completely consistent, and it shows that the two types of lightning data are complementary to each other.

Keywords Lightning data; Comparative analysis; Cloud analysis; Numerical experimentation

DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2000.19000



1 引言

我国地处东亚地区,地形复杂,每年暖季受夏季风及大尺度环流背景影 响,强对流天气频发(陶诗言等,1979)。强对流天气包含复杂的降水过程,涉 及到各种动力学以及云微物理学及其间的相互作用(丁一汇,1994),因此,强 对流天气系统的预报一直是数值预报的难点和重点。中尺度数值模式被广泛应 用于强对流天气系统的研究和预报中,但其所面临的一个重要问题是,传统模 式初始场中没有云存在,一般将云水、云冰等云微物理量都设置为零,所以模 式在积分一段时间后才会产生云块,导致数值积分的开始几个小时难以做出合 适的降水预报,即 spin-up 问题(Kristjánsson,1992)。为了缩短模式这种降水 滞后的时间,国内外的研究人员开始对云内初始化进行研究,比如非绝热初始 化(Wolcott et al.,1981)、物理初始化(Krishnamurti et al.,1984)等方法,不断 修改模式变量,完善环境场的湿度场信息。初始化云水、雨水等云微物理量取 得了显著的成果,但这种方法不能提供完整的云内三维信息,这就需要三维云 内信息初始化,即在模式内建立云分析模块,比如美国国家海洋和大气管理局 NOAA 的局地分析预报系统 LAPS(The Local Analysis and Prediction System) 中的云分析系统(Albers et al., 1996; Jian et al., 2003)、在 LAPS 基础上开发的 ARPS(Advanced Regional Prediction System)模式 ADAS(ARPS Data Analysis System)云分析模块(Xue et al., 2000)、美国的环境预报中心 NCEP(National Centers Environmental Prediction)的业务系统 RUC(Rapid Update Cycling)中 的云分析(Weygandt et al., 2006)。云分析系统的引入,以及多种卫星和雷达资 料的同化应用,可以实现对云内物理信息的同化应用(朱丽娟等, 2012, 2017),并在一定程度上合理调整模式中的水凝物含量(任绪伟等, 2021),优 化 GRAPES-Meso(Mesoscale of the Global and Regional Assimilation and Prediction System)区域中尺度数值预报模式中的云初始场方案。云分析模块可 以获得更为完整的云三维立体结构,从而改善模式初始场和 短时预报。

强对流天气系统发生时常伴随着闪电的发生(徐燕等,2018),且闪电与天 气系统的动力以及微物理过程的发展关系十分密切(郄秀书等, 2014; 孙凌 等,2019),研究表明,闪电在一定程度上可以用来指示强对流系统的发生与发 展(Petersen et al., 1998; Rudlosky et al., 2013)。郄秀书等(2021)通过研究北 京地区不同种类闪电灾害天气,探索和总结了闪电资料在数值预报模式中的同 化方法,研究结果表明闪电频数可以作为短时强降水、冰雹等强对流性灾害天 气的指示因子。但闪电不是模式内可以直接使用的常规变量,这就需要对闪电 资料进行同化(Wang et al., 2017)。已有学者将闪电频次与模式内变量建立联 系,进而将闪电资料同化,比如将闪电频次与对流降水率建立联系,改善回波 和降水预报(Chang et al., 2001); 与水汽、霰混合比建立经验关系,利用WRF 模式中的三维变分数据同化系统从而调整模式的相对湿度来提高 3h 预报效果 (Zhang et al., 2017) 或调整 WSM6 微物理方案(Hong and Lim, 2006) 中的水 汽混合比,实现在对流允许尺度上同化闪电资料(Fierro et al., 2011);将总闪电 频数与垂直速度最大值建立关系,使用 4DVAR 的方法应用于 VDRAS 模式,可 促进新对流的产生并在一定程度上抑制虚假的降水回波(Xiao et al., 2018) 築。

国内外大量研究发现,闪电与雷达回波是有很强的相关性的,因此也有很 多学者将闪电资料与雷达反射率因子建立联系,实现闪电资料的同化。Hu et al. (2009)将闪电频次与垂直方向最大雷达反射率因子廓线建立经验关系,发现 闪电资料的加入可以弥补实际观测雷达回波的盲区。Liu et al. (2019)将 FY4A 卫星闪电数据与雷达反射率建立关系,调整模式云分析模块的水汽场,试验表 明加入 FY4A 卫星闪电资料以后模式预测的降水中心的位置和范围的准确性明 显提高,尤其是对于 1-2 小时短时预报。Wang et al. (2014)利用 GSI 云分析系 统中的方法,将地闪资料转换为三维代理雷达反射率,并分别运用物理初始化 方法对转换后的代理雷达回波进行同化,结果显示对回波和降水预报效果均有 改进。何静等(2017)对华北地区的闪电观测和雷达反射率进行研究,发现雷 达反射率与闪电密度呈对数关系,随闪电密度增加,雷达反射率呈对数增长。 在对闪电资料同化研究中,对于闪电资料的使用也不尽相同。较为常用的有使 用研究区域地闪定位资料,建立闪电与雷达回波的关系应用于模式的云分析系 统对初始场进行调整(孙婵等,2019;王莹等,2015),并取得了一定的进展。 中国新一代静止轨道气象卫星风云四号 A 星(FY-4A)搭载了闪电成像仪

(LMI: Lightning Mapping Imager),能够实现总闪("云闪"和"地闪")探测,因此相对于地基闪电探测网探测的闪电更多(曹冬杰等,2018)。故研究人员开始尝试将 FY4A 卫星的闪电资料引入到模式的云分析模块中(黄守友等,2020;徐国强等,2020),研究结果表明,卫星闪电资料的加入对于云微物理变量的调整是较为显著的,且对于 spin-up 问题也有减弱作用。

在以前的研究中,还没有出现将 FY-4A 卫星的天基闪电资料和地基 ADTD 闪电资料进行对比及其影响分析的研究论文。本研究试图对这两种闪电资料进行对比分析,并通过研究四川冕宁及其周边地区的一次强对流过程,探究其对模式结果影响的差别。

2 资料和数值模式介绍

2.1 GRAPES 模式简介

GRAPES 模式 (Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)是我国自主研发的全球/区域多尺度一体化的同化与数值预报系统,包括 GRAPES_GFS 全球模式和 GRAPES_Meso 区域中尺度预报模式。GRAPES_Meso 是以多尺度通用动力模式为核心、以统一软件编程标准为平台的新一代数值预报模式系统(张人禾等,2008),于2006年7月投入业务化使用,为国家和各省市地区提供预报。

2.2 闪电资料

(1)中国新一代静止卫星风云四号(FY-4A)闪电成像仪 L2 闪电仪 1 分钟事件产品(LMIE)数据。

(2) 中国 ADTD 雷电系统定位数据资料。

2.3 雷达资料

雷达资料为国家气象中心提供的中国多普勒天气雷达反射率因子三维组网 拼图资料(分辨率为0.01°×0.01°)。该资料由中国气象科学研究院灾害天气 国家重点实验室开发,经过质量控制和组网拼图得到,包含回波的三维信息, 数据精确度高(王红艳等,2009),后经中国气象局数值预报中心等发展应用 (朱丽娟等,2017)。

2.4 卫星资料及模式背景场资料

本文使用的卫星资料除 FY-4A 闪电资料外,还使用了 FY-2G 卫星的 L2 级 总云量(CTA)数据以及 FY-4A 卫星的 L2 级相当黑体温度 TBB 数据。

模式的背景场是由美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction)发布的 GFS (Global Forecast System, https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast)全球数 值预报产品。

3 闪电资料探测原理及研究方法介绍

3.1 闪电资料探测原理

3.1.1 风云四号卫星闪电资料

FY-4A 卫星 LMI 闪电成像仪,是我国第一次研制和星载的卫星闪电成像 仪,可以探测观测区域内包括云闪、云间闪、云-地闪在内的全部闪电(黄富 祥,2007),检测跟踪强对流天气,提供闪电灾害预警。闪电成像仪可以提供覆 盖范围广、时间分辨率高的总闪数据,闪电探测率可达90%。闪电成像仪采用 CCD 面阵和光学成像技术,提出闪电发光"事件",并将数据实时发送至地面 接收站,之后通过地面处理系统地标定位处理以及虚假信号滤除和聚类分析算 法得到闪电"事件"产品(LMIE);同一帧相邻 CCD 面元的"事件"构成 "组"(Group),"组"对应于地闪的一次回击或云闪的一次 K 变化;时间间隔 不大于 330ms,空间距离不大于 16.5km 的"组"构成一次"闪电"(Flash), "闪电"对应于一次真实的闪电过程(曹东杰,2016)。研究时"组"和"闪 电"数据由于虚假信号滤除和聚类算法被滤除了很多信息,在模式中应用的效 果不够明显,故选取的是闪电"事件"(LMIE)产品。

3.1.2 ADTD 闪电资料

ADTD 雷电定位系统专门用于探测云地闪,主要针对雷暴天气的监测和雷电数据的统计(蔡河章等,2008)。它主要通过监测云地闪辐射的甚低频(VLF)信号,经过波形判断给出闪电信号到达传感器的精确时间。ADTD 雷电定位系统传感器能够准确采集云地闪波形峰点到达时间,时间精度可达0.1us。中心定位处理软件采用时差测向混合定位算法,用来保证定位的精度。该系统使用方便、可靠性高、统计也较为准确,平均探测效率为90%。但由于从探测站到中心站采用的是 UDP 方式,所以可能会出现探测站出发数据丢失,中心站收取数据不完整的现象,不能保证百分百信息传输可靠。

3.2 闪电资料处理方法

由于闪电不是模式内变量,因此通过建立闪电频次与雷达反射率之间的关系,将闪电频次转化为代理雷达回波(黄守友,2020),分辨率为0.03°×0.03°。本文中雷达反射率代理回波指的是经处理之后最终进入模式的雷达回

波,包括由闪电资料转化的雷达回波以及闪电转化之后的雷达回波与实际雷达 回波取最大值最终进入模式的雷达回波,都称为代理雷达回波。

首先进行闪电频次的统计,统计 LMIE 闪电资料以及 ADTD 闪电资料在预报时刻的前 25 分钟后 5 分钟,共 30 分钟内的闪电发生频次,计数方法采用与格点相距每半网格距计一次。

然后根据统计学关系,建立闪电频次与雷达反射率之间的冷、暖季的定量 关系,得到闪电频次与对应雷达反射率的查找表(图 1a)以及4组(每 5dBz 一组)雷达反射率关于高度的权重系数(图 1b)。通过该关系将闪电频次转化 为垂直方向上个各高度层的最大雷达反射率,再根据各高度层权重将闪电频次 转化为垂直方向上各高度层的最大反射率,从而得到二维的雷达反射率因子。

最后将得到的三维最大雷达反射率因子与实测的雷达反射率相比较,取最 大值作为最终进入模式的三维代理雷达反射率因子。

具体计算公式为:

 $ref_max = fig_a\{max[1, min(30, n_light)]\}$ (1)

 $ref_h = fig_b \{h, min[4, int((ref_max - 30)/5)]\} \times ref_max$

(1) 式中, ref_max 为垂直方向最大反射率; fig_a 为图 1 (a); n_light 为
 闪电频数。(2) 式中, ref_h 为各个高度层上的反射率; fig_b 为图 1 (b); h 为
 高度。

(2)





Fig.1 The maximum radar reflectivity corresponding to different lightning frequencies in warm season(a), weight coefficients of four groups of reflectivity varying with height in warm season(b)

4 个例选取与数值试验设计

4.1 个例简介

本文选取了 2020 年 6 月 26 日四川省一次强对流天气过程。2020 年 6 月 26 日夜间,四川盆地中南部、攀西地区(四川地区西南部,包括"攀枝花"和

"西昌") 北部部分地区出现暴雨,局地有大暴雨或特大暴雨,其中凉山州冕宁 县北部出现大暴雨量级降水,强降水诱发了山洪地质灾害,并造成重大人员伤 亡和经济财产损失。本文选取此次过程,通过数值模拟来探究 FY-4A 卫星 LMIE 闪电资料和 ADTD 闪电资料的差异,以及这两种闪电资料对模式结果影 响的差别。



(单位: dBZ)

Fig.2 Actual radar reflectivity (Unit: dBZ) in selected areas (23.5-35.5°N,96-111°E) at 12:00 on 12 June 2020 (Unit: dBZ)

图 2 为该个例在 2020 年 6 月 26 日 12 时的实际雷达回波反射率,可以看出,雷达回波大致有三个强中心,分别位于四川的西北部,中南部冕宁地区(图 2 红框所标区域),以及东南部地区。回波强度最大可达 45dBZ 以上,对流活动旺盛因此这三个区域可作为重点研究区域。

4.2 数值试验设计

本文数值试验所用模式为 GRAPES_Meso5.0 版本,研究区域为 23.5°N-35.5°N,96°E-11°E,模式水平分辨率设置为 0.03°×0.03°(接近 3km 尺度)。起报时间为 2020 年 6 月 26 日 12:00。参数化方案有 RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、MRF 边界层方案等,云微物理方案采用的是WSM6 方案。本次数值试验共做了两组试验(见表 1 和表 2),进行了 2020 年 6 月 26 日 12 时向后预报 1 小时、3 小时和 6 小时的降水预报。

第一组试验没有加入雷达资料,仅将闪电资料转化为代理雷达回波加入模式中。第二组试验中同时加入了雷达资料和闪电资料,将闪电资料转化为雷达回波之后与加入的实际雷达反射率取最大值作为代理雷达回波,具体公式为:

 $ref = max(ref_lgn, ref_radar)$ (3)

其中, ref 为最终作用于模式的雷达回波; ref_lgn 为由闪电资料(包括卫星 闪电和 ADTD 闪电资料)转化的代理雷达回波; ref_radar 为实际的雷达回波。

本研究在进行两次试验之前,已做过在 GFS 背景场资料基础上加入 FY-2G 卫星的总云量(CTA)资料以及 FY-4A 卫星的相当黑体温度 TBB 资料的试验, 试验结果表明,这两种卫星资料的加入,可以提高模式初始场和短时预报的准 确。因此,为提高模式模拟的效果,本试验将加入 GFS 背景场以及卫星资料 (TBB、CTA)作为模式的对照试验,分别作两种闪电资料的对比试验。并在 试验二中增加一组同时加入两种闪电资料的试验,用于探究闪电资料的融合同 化在模式中的应用效果。

试验设计	如下:		CXX .	
	表:	1 试验一(无雷)	达资料)	
Table 1 Experimental shemes 1 (No radar data)				
GFS 背景场以及卫星		卫星	ADTD 闪电资料	LMIE 闪电资料
(TBB、CTA) 资料		AD 资料		
ctrl1.0	V		×	x
test1.1	V		\checkmark	×
test1.2	\checkmark		×	\checkmark
表 2 试验二(有雷达资料)				
Table 2 Experimental shemes 2 (Radar data available)				
GFS 背景场以及卫				冬 IMIE 问由次
星	(TBB, CTA)	雷达反射率	ADID 内电力	瓦 LIMIE 内电页 判
	资料		一个	个计
ctrl2.0	\checkmark		×	×
test2.1	\checkmark	\checkmark	\checkmark	×
test2.2	V	\checkmark	×	\checkmark
test2.3				V
5				

5 结果分析

- 5.1 闪电资料对比分析
- 5.1.1 闪电散点 (空间)分布对比





图 3 2020年6月26日12时ADTD闪电(a)和FY-4A卫星LMIE闪电资料(b)散点图 Fig.3 Scatter plot of ADTD Lightning (a) and FY-4A satellite LMIE lightning data (B) at 12:00 on 12 June 2020

如图 3 所示,闪电密集区域大致分布在四川的西北部(区域①),中南部冕 宁地区(区域②),以及东南部地区(区域③),这说明这三个区域强对流发展 旺盛。可以看出,ADTD 地基闪电资料和 FY-4A 卫星闪电资料的极值中心与强 对流中心的位置(dBZ>35)是保持一致的。在中南部冕宁地区和西北部地区, ADTD 地闪电定位系统所探测到的闪电数量更多,而 FY-4A 卫星闪电成像仪所 检测到的闪电数量要少一些,在四川的东南部地区 ADTD 所探测到的闪电数量 相比较来说比较分散且数量较少,该地区 FY-4A 卫星监测到的闪电数量更多且 分布更为集中。但二者所检测到的闪电的主要密集区域是趋于一致的,因此两 种闪电资料的数据是具有互补作用的。 5.1.2 闪电代理雷达回波对比

In



图(单位:dBZ)

Fig.4 Radar Echo (a) from ADTD lightning data and (b) from FY-4A satellite lightning data (Unit: dBZ)

如图 4 所示是将两种闪电资料转化为雷达反射率之后的代理雷达回波分布 图,可以看出,雷达回波的三个集中分布区域与闪电散点分布图相对应,在区 域①和区域②中,ADTD 闪电资料的代理雷达回波明显高于 LMIE 闪电资料的 代理雷达回波,区域③LMIE 闪电资料的代理雷达回波范围更大且数值更高, 闪电数量多且密集的区域,其反演出的雷达回波数值和范围也更大。但与实际 雷达回波相对比,其最大值仅在 35-40dBZ 之间,说明仅将闪电资料转化为雷 达代理回波时的模拟效果是很有限的,仅能模拟出大致区域,在数值的准确度 上仍需提高。

11~





Unit: dBZ

如图 5 所示,在有雷达资料的影响下,两种闪电资料转化的代理雷达回波 从图上看已无明显差别,且其分布以及大小都与实际雷达回波比较接近。将两 种代理回波做差(ADTD 代理回波减去 LMIE 代理回波)得到图(c)。可以看 出在主要分析的三个区域,既有负值又有正值,说明二者虽然空间分布大致相 同但大小存在差异。大部分区域的回波值很小,这说明差异很小。在重点研究 的三个区域中,负值普遍很小,且均有正极大值中心,这说明在三个区域内, 在有雷达资料的影响下,由 ADTD 闪电资料转化成的代理回波值更大。 5.1.3 代理回波相关性分析

In



(a) test1-ADTD 闪电资料与 FY-4A 闪电资料转换的代理雷达回波(b) test2-加入雷达资料的基础上, ADTD 闪电资料与 FY-4A 闪电资料分别转化为雷达代理回波之后的相关性

Fig.6 Radar Echo correlation(Unit: dBZ)

(a) test1- Proxy radar echo converted from ADTD and FY-4A lightning data (b) test2 - Proxy radar echo converted from radar data and ADTD lightning data and Proxy radar echo converted from radar data and FY4A lightning data

为了确定两种闪电资料的一致性,在试验一中将仅加入闪电资料所转化成的代理雷达回波做了相关性分析(见图 6)。由图 6(a)可以看出,大多数点都落在了对角线上,二者的相关系数(R)高达 0.9598,均方根误差(RMSE)为 3.2147 dBZ,这说明两种闪电资料在进入模式之后所转化成的代理雷达回波具有很好的一致性。另外在对角线的两端均分布着散点,这说明两种仪器对于闪电资料的探测区域有一定的差异,因此两种资料的融合应用可能可以在模式中达到互补的效果。但整体来看位于对角线下方的散点更多一些,这说明 ADTD 闪电定位仪比 FY-4A 卫星 LMI 闪电成像仪的探测效率更高一些。尤其是在代理雷达回波较低(大致在 15-20 dBZ),即闪电频次较低的位置,存在着更多数量的 ADTD 闪电资料,ADTD 闪电定位仪对于低频次的闪电探测效率更高。

从图 6(b)可以看出在有雷达资料作为调整时,两种资料的代理回波相关 系数(R)高达 0.9912,均方根误差为 2.1456 dBZ,对比于没有加入雷达资料 的 test1 试验,相关系数增大,均方根误差减小。散点的分布也更为均匀,但整 体来说仍然是 ADTD 闪电资料所转换的代理回波散点数量更多。

5.2 累计降水结果分析

为进一步研究两种闪电资料对模式结果影响的差别,分别模拟了 1h、3h、 6h 累计降水分布。从一小时累计降水结果(图 7)可以看出,在 test1 中,仅加 入了两种闪电资料来进行降水的模拟,可以看出 test1.1 和 test1.2 都只模拟出了 降水的大致区域,降水量的模拟偏差很大。从图(b)可以看到,在冕宁地区的 累计降水极大值区域,test1.1模拟出了一小块区域,而test1.2没有模拟出这一 极大值中心。在试验二中,有了雷达资料的加入,模拟出了降水中心,test2.1 和 test2.3的模拟效果类似,冕宁地区以及东南部地区的降水中心模拟效果都有 所增强。

从三小时累计降水结果(图 8)可知,试验一中,三小时累计降水 test1.1 更好的模拟出了冕宁地区的降水中心,而 test1.2 的模拟效果要差一些。从试验 二来看,有了雷达资料,四川东南部的降水中心都模拟出了较好的效果,但范 围和数值都偏大,位于冕宁地区的降水中心 test2.1 比 test2.2 有更好的模拟效 果,即 ADTD 闪电资料对于 3 小时累计降水的模拟效果要更好。

从六小时累计降水图(图9)来看,试验一和试验二都将降水的主要区域 模拟出来了,但有雷达资料影响时,降水强度和降水范围明显偏大。但在试验 二中,test2.2 没有模拟出冕宁地区的降水极值,而 test1.2 中有,可能是受到雷 达资料的影响。



(a) The actual precipitation (b) test1.1 (c) test1.2 (d) test2.1 (e) test2.2 (f) test2.3





Fig.9 6-hour accumulated rainfall distribution from 12:00 on 26 June 2020 to 13:00 on 26 June 2020. (Unit: mm)

(a) The actual precipitation (b) test1.1 (c) test1.2 (d) test2.1 (e) test2.2 (f) test2.3

为了更为直观的看出模式结果的准确性,计算了两个试验的 TS 评分 (TS)和偏差(BS)(图 10)。本文所使用的 TS 评分为格点评分,范围为整个 研究区域,插值方法为双线性插值。TS 评分可用来反映模式有效预报的准确程 度,数值越大,说明模式预报降水越准确,最佳为1;偏差用来反映模式预报 范围的准确性,大于1表示模式预报降水范围大于观测范围,等于1表示正好 吻合,小于1表示模式预报范围小于观测范围。

如图 10(a) 所示, 在加入雷达资料之后, 试验二的 TS 评分明显比试验一 有了大幅提升, 因此在有雷达资料加入的情况下模式的模拟效果是更为准确 的, 应用价值也更高。但从两种闪电资料的对比来看, 试验一中 ADTD 闪电资 料的加入 TS 评分是高于 LMIE 闪电资料的, 因此若单独应用闪电资料, ADTD 闪电资料的使用效果更好。试验二中, test2.1 的 TS 评分在四个等级均大于 test2.2 的 TS 评分, 即 ADTD 闪电资料的 TS 评分更高。BS 评分(图 10d)除 去暴雨等级偏差较大, 大雨偏差较小, 小雨和中雨的偏差都比较接近于 1, 对 比来说, 小雨 ADTD 闪电资料预报效果更好, 中雨 LMIE 闪电资料预报效果更 好。大雨 ADTD 闪电资料对于降水的范围更准确, 暴雨 LMIE 闪电资料对于降 水范围的预报更为准确。

从 3h-TS 评分(图 10b)来看,试验一和试验二,都为 ADTD 闪电资料优于 LMIE 闪电资料,两种闪电资料融合(test2.3)以后的 TS 评分也有了一定的提升,尤其是暴雨等级,TS 评分明显高于单个闪电资料的应用。从 3h-BS 评分(图 10e)来看,小雨和中雨两种闪电资料的应用结果比较接近,预报的范围都比较准确,但大雨和暴雨 BS 都偏大,即在提高 TS 评分的同时,BS 偏差也随之增大了。

6小时累计降水的 TS 评分(图 10c)和 BS(图 10f)与1小时和3小时的 结论一致,ADTD 闪电资料的应用有更好的效果。两种闪电资料的融合应用效 果比单个闪电资料的同化应用效果好一些,且6小时累计降水中两种闪电资料 融合以后,其偏差在暴雨量级比单独使用 LMIE 闪电资料要小,预报范围更为 准确。这说明,融合使用两种闪电资料来提高降水预报的准确性是可行的。



图 10 1h、3h、6h 累计降水 TS 评分、BIAS 评分

Fig.10 TS and BS scores of 1-hour, 3-hour, 6-hour accumulated precipitation

5.3 云微物理量分析

5.3.1 垂直分布分析

为分析闪电资料对于模式云分析中具体微物理量的调整作用,沿((28.6°N,101.5°E),(27.6°N,106.4°E))斜线作剖面图(图 11、图 12),该斜线穿过冕宁地区和四川东南部降水中心区域。云微物理变量主要采用 nudging 方法,本试验选取的 nudging 同化过程中模式积分前十步(积分时间步长为 30





图 11 2020 年 6 月 26 日 12 时云水(qc)、云雨以(qr)及云冰(qi)沿斜线剖面图(试验一)

单位: g・kg-l

(a0, b0, c0: ctrl1.0; a1, b1, c1: test1.1; a2, b2, c2: test1.2)

Fig.11 The vertical distribution of cloud water, cloud rain and cloud ice at 12:00 on 26

June 2020 (test1). Unit: g • kg-1

(a0, b0, c0: ctrl1.0; a1, b1, c1: test1.1; a2, b2, c2: test1.2)

从试验一所画剖面图(图 11)来看,云水的垂直分布图在加入闪电资料与 为加入闪电资料的分布大致相同,但从(a2)图中可以看到,在大致(28.0° N,104.3°E)、600-500hPa的位置,qc明显多模拟了一块区域,大致对应冕宁 地区,与闪电分布密集区域一致。对于qr来说,ADTD闪电资料与LMIE闪电 资料对于qr变量的调整差异很大,在垂直分布以及数值上都有很大差异。主要 在(28.4°N-28.2°N)之间的区域,为冕宁地区,这里的ADTD闪电密集且集 中,所以 ADTD 闪电资料模拟出了 LMIE 闪电资料没有模拟出的云雨。从图 (b2)可以看出,在大致(28.0°N,104.5°E)的位置,LMIE 闪电模拟出了 ADTD 闪电资料没有模拟出的云雨,对应了 LMIE 闪电资料密集的四川东南部 的降水区域。云冰的分布三组实验大致分布是一致的,两种闪电资料对于极值 中心的值的模拟差异比较大,在冕宁地区 ADTD 闪电资料模拟的极值更大,在 四川东南部地区 LMIE 闪电资料模拟出了 ADTD 闪电资料没有模拟出的极值中 心。极值中心的差异可能是因为在所选区域的斜线上,两种闪电资料的分布不 完全一致,这也揭示出两种闪电资料具有一定的互补性。



(a0, b0, c0: ctrl2.0; a1, b1, c1: test2.1; a2, b2, c2: test2.2)
Fig.12 The vertical distribution of cloud water, cloud rain and cloud ice at 12:00 on 26 June 2020 (test2). Unit: g • kg-1

(a0, b0, c0: ctrl1.0; a1, b1, c1: test1.1; a2, b2, c2: test1.2)

从试验二来看(图 12),对于云水的调整两种闪电资料的差异不大,从(b1)和(b2)可以看出,仍然是在(28.4°N-28.2°N)区域,对应冕宁地区,ADTD闪电资料模拟出了LMIE闪电资料没有模拟出的云雨,可能是在此区域,只存在ADTD闪电资料,而没有LMIE闪电资料。而在28.0°N区域,LMIE闪电资料模拟出了ADTD闪电资料没有模拟出的1000-700 hPa 垂直方向上的云雨。对于云冰的模拟(图(c1)、(c2)),两种闪电资料的加入所模拟出的结构和极值中心位置都大致相同,但在大致28.3°N的位置,LMIE闪电资料所模拟出的云冰数值很明显比ADTD闪电资料所模拟出来的小,这可能也是造成在累计降水中,LMIE闪电资料的试验中没有模拟出冕宁地区降水极值中心的原因。而在东南部降水区域,LMIE闪电资料模拟出的云冰范围更大,且在28°N的位置,比ADTD闪电多模拟出一个小的极值中心。另外在分析试验结果时也进行了云雪和云霰的剖面图分析,整体来说,雪和霰粒子的分布与所给出的云水、云雨以及云冰的分布和结果类似,图略。

综合来看,在冕宁地区由 ADTD 闪电资料模拟出的云微物理量极值更大, 且存在 LMIE 闪电资料未模拟出的云水和云冰的极值;在四川东南部的降水区 域,LMIE 闪电资料模拟出的云微物理量的范围和极值更大,且模拟出了 ADTD 闪电资料没有模拟出的云雨和云冰的极值。再次证明了两种资料在不同 区域的模拟效果不同,存在互补性。从剖面图来看,两种闪电资料进入模式后 的模式结果有明显的差别,这是由于两种闪电资料的水平空间分布的差别,导 致了其反演的水物质含量以及其垂直分布的差别,这也是影响模式模拟降水结 果的原因。

5.3.2 水平分布分析

为进一步分析云微物理量的空间分布,分别做 700hPa 云水分布、850hPa 云雨分布以及 250hPa 云冰分布。

从水平分布来看,试验一中(图 13),两种闪电资料加入以后的云微物理量的分布趋势与闪电资料散点图分布、雷达回波分布以及降水分布是一致的,有明显差别的是云雨的分布,LMIE 闪电资料在冕宁区域所模拟出的云雨数值更大,但范围不如 ADTD 闪电资料所模拟的范围广,在东南地区也是 LMIE 闪电资料模拟出云雨范围更广。云冰的分布大致一致,在冕宁地区 ADTD 闪电资料模拟出了一个云冰的极值中心。

如图 14,在有雷达资料影响的情况下,云水云雨和云冰的空间分布和数值 都比较一致,且各极值区域分布也与强对流中心位置相对应。两种闪电资料的 影响差别变得不太明显。



图 13 试验— 700hPa 云水、850hPa 云雨、250hPa 云冰水平分布图(单位: g·kg-1) Fig.13 700hPa cloud water、850hPa cloud cloud rain and 250hPa cloud ice at 12:00 on 26 June

2020 (test1). Unit: g·kg-1





图 14 试验二 700hPa 云水、850hPa 云雨、250hPa 云冰水平分布图(单位: g·kg-1) Fig.14 700hPa cloud water、850hPa cloud cloud rain and 250hPa cloud ice at 12:00 on 26 June 2020 (test2). Unit: g·kg-1

6 总结

本文在 GRAPES 模式云分析中引入了 ADTD 闪电资料和 LMIE 闪电资料, 通过一次个例试验重点对比分析了两种闪电资料差异及对模式结果影响的差 别,并尝试将两种资料同时融合同化加入模式,探索研究两种闪电资料的融合 应用效果。得到结论如下:

(1) ADTD 地基闪电资料和 FY-4A 卫星闪电资料,其分布的极值中心是 保持一致的。两种闪电资料在不同地区有不同的探测效果,整体来说 ADTD 闪 电资料范围更广且分散, FY-4A 卫星监测到的闪电数量更密集、分布更集中。

(2)两种闪电资料在进入模式之后所转化成的代理雷达回波具有很好的一致性, ADTD 闪电定位仪可能对于低频次的闪电来说,比 FY-4A 闪电成像仪探

测效率更高。有雷达资料引入后,两种资料的代理回波相关系数更高,均方根 误差更小,散点的分布也更为均匀。

(3)引入任何一种闪电资料都对降水预报具有正效果,其中 ADTD 闪电 资料的应用对于短时降水预报准确率的提高更为有效。预示着闪电资料的应用 具有很好的应用前景。

(4)对于云微物理量的调整作用,在不同的区域两种闪电资料对于极值中 心的模拟会有不同的效果,尤其是在对云雨的模拟上。可能是因为所选区的斜 线上,两种闪电资料的分布不完全一致,揭示出两种闪电资料具有一定的互补 性。在有雷达资料影响的情况下,两种闪电资料对于云微物理量的调整更为一 致,但在所研究的两个区域中,仍然表现出相互补充的特点。

本文的结论只是 ADTD 和 FY-4A 闪电资料在对四川冕宁暴雨过程进行数值 分析和模拟得到的,而在应用到其它暴雨过程时,具体结论可能存在着一定差 异。以往的研究表明,闪电资料的加入对暴雨的数值模拟都是有正效果的,因 此该研究有广泛的应用前景。单从本研究来说,闪电资料在单独使用时效果不 够突出,需要融合雷达资料一起使用,另外 ADTD 闪电资料的应用效果优于 FY4A 闪电资料,两种闪电资料融合应用的效果优于单个闪电资料。虽然本研 究仅进行了四川冕宁地区的个例试验,但两种闪电资料的使用都存在正效果, 因此在理论上闪电资料在不同地区都应有较好的应用效果,在之后的研究中我 们会开展不同地区的批量试验,进一步验证这一结论,并分析在长时间预报过 程中两种闪电资料所表现出的优缺点。未来还需要在融合地基和天基闪电资料 方面进行更深入的研究,以更好的使用闪电这种新型的探测资料,提高数值模 式的预报准确率。

参考文献(References):

- 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]. Weather and Forcasting, 11(3): 273-287. doi: 10.1175/1520-0434(1996)0112.0.CO;2
- 曹东杰. 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 Dongjie. 2016. The Development of Product Algorithm of the Fengyun-4 Geostationary Lightning Mapping Imager [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 6(1): 94-98. doi: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.01.014
- 曹东杰, 陆风, 张晓虎, 等. 2018. 风云四号卫星闪电探测产品在强对流天气监测中的应用
 [J]. 卫星应用, 83(11): 20-25. Cao Dongjie, Lu Feng, Zhang Xiaohu, et al. 2018.
 Application of FY-4 lightning detection products in severe convective weather monitoring [J].
 Satellite Application (in Chinese), 83(11): 20-25. doi: 10.3969/j.issn.1674-9030.2018.11.007
- 蔡河章, 洪加肯, 彭涛. 2008. ADTD 雷电监测定位系统简介 [J]. 科技资讯, 000(31): 122-122. Cai Hezhang, Hong Jiaken, Peng Tao. 2008. Brief introduction of ADTD Lightning Monitoring and positioning system [J]. Science & Technology Information (in Chinese), 000(31): 122-122. doi: 10.3969/j.issn.1672-3791.2008.31.094
- 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]. Monthly Weather Review, 129(8): 1809-1833. doi: 10.1175/1520-0493(2001)129<1809:TEOSMA>2.0.CO;2
- 丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 52(3): 274-284. Ding Yihui. 1994. Heavy rain and mesoscale meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52(3): 274-284. doi: 10.11676/qxxb1994.036
- Fierro A O, Mansell E R, Ziegler C L, et al. 2011. 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]. Monthly Weather Review, 140(8): 2609-2627. doi: 10.1175/MWR-D-11-00299.1.
- 黄富祥. 2007. FY-4 卫星闪电成像仪的使命和挑战 [J]. 气象科技, 35(0z1): 35-42. Huang Fuxiang. 2007. Geostationary Lightning Mapper of FY-4 Satellite : the Mission and Challenge [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 35(0z1): 35-42. doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2007.z1.008
- 何静, 刘舜, 陈敏, 等. 2017. 闪电观测资料与雷达反射率的比较研究及其同化应用 [C]// 第 34 届中国气象学会年会 S8 观测推动城市气象发展——第六届城市气象论坛论文集. 中国气象学会: 中国气象学会, 112-112. He Jing, Liu Shun, Chen Min, et al. 2017.

Comparative Study of lightning observation data and radar reflectivity and its assimilation application [C]// S8 observations promote the development of urban meteorology at the 34th annual meeting of the Chinese Meteorological Society-proceedings of the 6th Urban Meteorological Forum. Chinese Meteorological Society: Chinese Meteorological Society, 112-112.

- 黄守友. 2020. FY4A 资料在模式热启动中的初步研究与应用 [D]. 中国气象科学研究院硕士 学位论文. Huang Shouyou. 2020. Preliminary study and application of FY4A data in model hot start [D]. M. S. thesis (in Chinese), Chinese Academy of Meteorological Sciences.
- 黄守友, 徐国强. 2020. FY4A 的 LMIE 闪电数据对云信息初始化的影响及数值试验 [J]. 高 原 气 象, 39(2): 378-392. Huang Shouyou, Xu Guoqiang. 2020. Influence of LMIE Lightning Data of FY4A on Cloud Information Initialization and Numerical Experiment [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39(2): 378-392. doi: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2019. 00110
- Hui W, Guo Q. 2021. Preliminary characteristics of measurements from Fengyun-4A Lightning Mapping Imager [J]. International Journal of Remote Sensing, 42(13): 4922-4941. doi: 10.1080/01431161.2021.1906983
- Hong S Y, Lim J. 2006. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6) [J]. Journal of the Korean Meteorological Society, 42(2): 129-151.
- 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.
- Jian G J, Shieh S L, McGinley J A. 2003. Precipitation Simulation Associated with Typhoon Sinlaku (2002) in Taiwan Area Using the LAPS Diabatic Initialization for MM5 [J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 14(3): 261–288. doi: 10.3319/TAO.2003.14.3.261(A)
- Kristjánsson J E. 1992. Initialization of cloud water in a numerical weather prediction model [J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 50(1): 21-30. doi: 10.1007/BF01025502
- Krishnamurti T N, Ingles K, Cocke S, et al. 1984. Details of Low Latitude Medium Range Numerical Weather Prediction Using a Global Spectral Model Part II. Effects of Orography and Physical Initialization [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 62(4): 613-649. doi: <u>https://doi.org/10.2151/jmsj1965.62.4_613</u>
- Liu R X, Liu J, Pessi A, et al. 2019. Preliminary Study on the Influence of FY-4 Lightning Data Assimilation on Precipitation Predictions [J]. Journal of Tropical Meteorology, 25(4): 528-541.
- Petersen W A, Rutledge S A. 1998. On the relationship between cloud-to-ground lightning and

convective rainfall [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 103(D12): 14025-14040. doi: 10.1029/97JD02064

- 郄秀书, 刘冬霞, 孙竹玲. 2014. 闪电气象学研究进展 [J]. 气象学报, 72(05): 1054-1068. Qie Xiushu, Liu Dongxia, Sun Zhuling. Recent advances in research of lightning meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica, 72(5): 1054-1068. doi: 10.11676/qxxb2014.048
- 郄秀书, 袁善锋, 陈志雄, 等. 2021. 北京地区雷电灾害天气系统的动力-微物理-电过程观测 研究 [J]. 中国科学: 地球科学, 51(1): 46-62. Qie Xiushu, Yuan Shanfeng, Chen Zhixiong, et al. 2021. Understanding the dynamical-microphysical-electrical processes associated with severe thunderstorms over the Beijing metropolitan region [J]. Science China Earth Sciences, 51(1): 46-62. doi: https://doi.org/10.1007/s11430-020-9656-8
- Rudlosky S D, Fuelberg H E. 2013. Documenting Storm Severity in the Mid-Atlantic Region Using Lightning and Radar Information [J]. Monthly Weather Review, 141(9): 3186–3202. doi: 10.1175/MWR-D-12-00287.1
- 任绪伟, 陈晓燕, 蔡迪花, 等. 2021. GRAPES_Meso 模式及其云分析系统在中国西北地区降 水预报中的应用评估 [J]. 千旱气象, 39(2): 333-344. Ren Xuwei, Chen Xiaoyan, Cai Dihua, et al. 2021. Evaluation of Precipitation Forecast Based on GRAPES_Meso Model and Its Cloud Analysis System in Northwest China [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 39(2): 333-344. doi: CNKI:SUN:GSQX.0.2021-02-019
- 孙凌,陈志雄,徐燕,等. 2019. 北京一次强飑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 Ling, Chen Zhixiong, Xu Yan, 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]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(4): 759-772. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1805.18128
- 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.
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究 [J]. 大气科学, 3(3): 227-238. Tao Shiyan, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1979. Study on heavy rain and severe convective weather [J]. Scientia Atmospherica Sinica, 3(3): 227-238. doi: CNKI:SUN:DQXK.0.1979-03-004
- 王红艳, 刘黎平, 王改利, 等. 2009. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用 [J]. 应用气象学报, 20(2): 214-224. Wang Hongyan, Liu Liping, Wang Gaili, et al. 2009.

Development and Application of the Doppler Weather Radar 3-D Digital Mosaic System [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20(2): 214-224. doi: 10.11898/1001-7313.20090211

- 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, 33(5):
 761-768. doi: 10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0761
- Wolcott S W, Warner T T. 1981. A Moisture Analysis Procedure Utilizing Surface and Satellite Data [J], Monthly Weather Review, 109(9): 1989-1998.
- Weygandt S S, Benjamin S G, Devenyi D, et al. 2006. Cloud and hydrometeor analysis using metar, radar, and satellite data within the RUC/Rapid-Refresh model [C]. 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA.
- Wang Y, Yang Y, Wang C H. 2014. Improving forecasting of strong convection by assimilating cloud-to-ground lightning data using the physical initialization method [J]. Atmospheric Research, 150: 31-41. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.06.017
- Wang Y, Yang Y, Liu D, et al. 2017. A Case Study of Assimilating Lightning-Proxy Relative Humidity with WRF-3DVAR [J]. Atmosphere, 8(3): 55-55. doi: 10.3390/atmos8030055
- 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 Guoqiang, Huang Shouyou, Zhao Chenyang. 2020. Influence of FY-4A lightning data on numerical forecast of convective weather [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 46(9): 1165-1177.
- 徐燕, 孙竹玲, 周筠珺, 等. 2018. 一次具有对流合并现象的强飑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 Yan, Sun Zhuling, Zhou Yunjun, et al. 2018. Lightning activity of a severe squall line with cell merging process and its relationships with dynamic fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (6): 1393–1406, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1801.17220.
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V. 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 75(3):161-193. doi: 10.1007/s007030070003
- Xiao X, Sun J Z, Qie X S, et al. 2018. A new lightning assimilation technique based on 4DVAR [C]. In: AGU Fall Meeting. San Francisco, USA.
- Ying W, Yi Y, Wang C. 2014. Improving forecasting of strong convection by assimilating cloudto-ground lightning data using the physical initialization method [J]. Atmospheric Research, 150(dec.): 31-41. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.06.017

- 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. Formation of three-dimensional cloud initial field of GRAPES and its application in short-term and imminent forecast [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 28(1): 38-51. doi: 10.11898/1001-7313.20170104
- 张人禾, 沈学顺. 2008. 中国国家级新一代业务数值预报系统 GRAPES 的发展 [J]. 科学通报, 53(20): 2393-2395. Zhang Renhe, Shen Xueshun. 2008. Development of China National New Generation Service numerical forecast system GRAPES [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53(20): 2393-2395.
- Zhang R, Zhang Y, Xu L, et al. 2017. Assimilation of total lightning data using the threedimensional variational method at convection-allowing resolution [J]. Journal of Meteorological Research, 31(4): 321-746. doi: 10.1007/s13351-017-6133-3

