

梁皓, 许冬梅, 束艾青, 等, 2023. 葵花8号辐射率资料同化在一次川渝暴雨预报中的应用研究[J]. 高原气象, 42(6): 1478-1491. LIANG Hao, XU Dongmei, SHU Aiqing, et al, 2023. The Impact of Assimilating Himawari-8 Radiance Data on the Prediction of a Severe Storm over Sichuan-Chongqing Region[J]. Plateau Meteorology, 42(6): 1478-1491. DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2022. 00112.

# 葵花8号辐射率资料同化在一次川渝暴雨 预报中的应用研究

梁皓<sup>1, 2, 3</sup>, 许冬梅<sup>1, 2</sup>, 束艾青<sup>1, 4</sup>, 张雪薇<sup>1, 4</sup>, 宋丽欣<sup>1, 4</sup>

- (1. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;  
2. 中国科学院空天信息创新研究院遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;  
3. 承德市气象局, 河北 承德 067000;  
4. 中国气象局雷达气象重点开放实验室, 江苏 南京 210000)

**摘要:** 新一代静止气象卫星葵花8号(Himawari-8)上搭载的静止轨道成像仪AHI(Advanced Himawari Imager)凭借其高时空分辨率可以对重庆地区暴雨进行连续观测。本文选取2019年4月19日的一次区域性暴雨天气过程为试验个例,采用WRF(Weather Research and Forecasting)中尺度模式进行数值模拟。基于WRFDA(Weather Research and Forecasting model Data Assimilation)同化系统对葵花8号静止气象卫星的AHI辐射率资料进行相应的质量控制和云检测,进而开展循环同化试验,考察卫星资料同化对这次强对流天气过程预报结果的改进。结果表明在同化AHI红外辐射率资料之后,辐射传输模式模拟的亮温和观测亮温更为接近。此外,AHI水汽通道辐射率资料同化有效提高了对各层高度上的风场、水汽场、雷达回波等要素特征的分析效果,并且使模式的初始条件更逼近真实的大气状态。研究发现同化AHI水汽通道辐射率资料后模拟的降水整体分布与实际情况更为接近,主要雨带位置以及强降水中心的精确程度显著高于背景场的预报效果。经过卫星同化的试验可以预报出控制试验漏报的强降水中心,并且有效地削弱了四川东部和甘肃东南部的虚假强降水范围以及强降水中心。本研究可以为川渝地区暴雨天气数值预报系统中的静止红外辐射率资料的预处理和同化应用提供有益的参考。

**关键词:** 川渝暴雨; AHI辐射率资料; 资料同化; 水汽场

**文章编号:** 1000-0534(2023)06-1478-14 **中图分类号:** P458.3 **文献标识码:** A

**DOI:** 10. 7522/j. issn. 1000-0534. 2022. 00112

## 1 引言

中国降雨灾害多发,而被誉为“天府之国”的重庆西南地区,更是暴雨频发、洪涝肆虐。西南地区是我国降水局布区域差异最大、变化最复杂的地方之一(黄嘉丽和秦年秀, 2020),其原因有三:地势参差不齐、地形复杂多样、季风环流影响。暴雨尤

其是特大暴雨的产生往往受多重尺度及多重因素的共同作用。其中,中尺度对流复合体(Mesoscale Convective Complex, MCC)包含许多 $\beta$ 中尺度对流系统,因而常产生“列车效应”,极易造成持续性强降水,累计降水量巨大(张家国等, 2008)。再者,常发源于青藏高原、发展于西南地区的西南低涡也

收稿日期: 2022-07-20; 定稿日期: 2022-12-27

资助项目: 国家自然科学基金重大项目(42192553); 国家自然科学基金项目(U2242212); 遥感科学国家重点实验室开放基金项目(OFSLRSS202321); 中国气象局雷达气象重点开放实验室基金项目(2023LRM-B03); 上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1404500); 上海台风基金项目(TFJJ202107); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目(SZ-KT201904); 南京信息工程大学大学生创新创业训练计划项目(202210300006Z)

作者简介: 梁皓(2001-),男,河北秦皇岛人,助理工程师,研究方向为数值模拟和卫星资料同化. E-mail: 1261510434@qq.com

通信作者: 许冬梅(1984-),女,江苏启东人,副教授,研究方向为数值模拟和卫星资料同化. E-mail: dmXu@nuist.edu.cn

是引发强降水的最重要天气系统之一,对暴雨的形成有决定性的意义。另外,引起西南地区暴雨又一重要机制是高原涡东移并引发西南低涡的移动变化。周玉淑等(2019)通过拉格朗日轨迹模式 HYSPLITv4.9 (Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory Model)以及天气学诊断分析等方法,对两次发生在四川盆地的由高原涡东移并影响西南涡这一机制引起的暴雨进行对比探究,进一步研究分析了高原涡、西南涡对西南地区暴雨过程的影响。

如今业务上常采用数值预报模式对天气系统的发生发展进行模拟,但考虑到尺度较小的系统有更多的不稳定性以及发展的不确定性,其无法被模式进行更精确的模拟,因此对于暴雨的预报仍存在不小的难度系数。此外,当采用雷达对降水进行观测时,往往无法做到时间上的提前或同步预报,原因是较大的降水回波在雷达上显现时,降水已经开始产生(覃丹宇和方宗义,2014)。而静止气象卫星凭借其具备提供大范围、24 h全天候云图信息的能力,成为监测中小尺度对流系统的最重要手段之一。伴随着社会高精尖产业的进步以及大型计算机在各类业务上的普及,高性能数值计算方法逐渐开始应用于探索大气环流发展状态。由于受数值模式自身以及模式初始场质量的影响,通过数值计算模拟大气状况的准确度各有优劣。与此同时,气象学者们注意到,若在数值预报模式中结合来自卫星上搭载的探测器所捕捉到的观测资料,有利于提升对天气过程模拟分析和预报的效果。在我国,卫星资料已被大部分数值预报中心广泛地应用于其同化系统中,可以发现卫星资料对改善数值预报模拟效果的贡献居于全部观测资料的首位。一些相关的专家学者已经对卫星辐射率资料同化在数值预报模拟中的应用开展了大量的研究工作,试验结果表明同化卫星辐射率资料对模式初值条件的改进十分显著(束艾青等,2022;毛璐等,2022;蒋璐西等,2019;张涛等,2019;杨春等,2017)。然而,由于卫星研究工作具有高难度、高精尖、高成本等方面的局限性,目前的卫星资料同化技术依旧处于基础性发展阶段。

在另一方面,全世界范围内的专家学者对于如何提高各类天气过程的预报准确性做了广泛的研究,具体地说,他们发现数值模式在改进强对流天气的预报过程中起到关键作用。张冰等(2021)使用数值模式对发生于2017年夏季苏南地区一次特大暴雨过程进行了研究,其分析得出结论,高分辨

率模式对暴雨过程中大气状态演变的模拟效果极佳,此外,客观上来说各类初值条件在流程中得到的改进也十分显著。为提高数值模式的准确度,我们认为有必要获得更为精确的模式初始场,而精确的模式初始场的获得恰恰依赖资料同化。卫星观测资料是资料同化的主体,其也逐渐成为数值天气预报中常规观测资料最重要的补充,在改善模式初值条件以及提高预报精度中有着巨大的作用。由于地球同步卫星相对于地球表面静止且距离地球表面较远,因此其可以对地球表面进行大面积且连续的监测。国内外气象学专家已经对静止卫星的应用开展了一系列的研究。耿晓雯等(2020)在 WRFDA (Weather Research and Forecasting model Data Assimilation)系统的 3.9.1 版本中搭建了技术先进的静止卫星扫描辐射成像仪 AGRI (Advanced Geosynchronous Radiation Imager) 的同化接口,通过分析风云四号静止气象卫星 (FY-4A) 天顶角对 AGRI 资料偏差订正的影响,发现了卫星天顶角与偏差关系不明显这一结论,因此可以在预报因子中对其进行忽略,这大大提高了 AGRI 红外通道辐射率资料在中尺度模式中的应用效率。Wang et al (2018) 利用日本葵花 8 号 (Himawari-8) 卫星的辐射率资料,对 2016 年 7 月 18–21 日的华北特大暴雨这一个例做了关于 AHI (Advanced Himawari Imager) 水汽通道辐射率资料同化的相关研究,发现引入 AHI 观测资料则能够有效改善模拟的湿度场、风场和预报场,且对强度超过 100 mm 的降水预报改进明显。Wu et al (2020) 针对 2017 年 5 月 6 日广州市出现的一次暴雨事件,使用四维变分同化方法对 AHI 辐射率资料进行同化,使温度、湿度和风场进行了更好的分析和预测,在 20 h 累积降水预报的 FSS 评分比仅采用常规观测同化的预报有所提高。Honda et al (2018) 以 2015 年超强台风“苏迪罗”为研究个例,通过同化 Himawari-8 卫星辐射率资料,发现 10 min 一次的高分辨率的 Himawari-8 卫星辐射率资料同化可以更好地改进核心区 and 外部雨带地区的热带气旋结构分析,进而改善了对台风“苏迪罗”强度预报和路径预报的效果。Minamide and Zhang (2018) 对台风“苏迪罗”进行研究,发现逐时循环同化 Himawari-8 的红外辐射资料不仅能改善台风初始强度的预报,而且与初始热带气旋涡相关的基本对流活动的空间分布也得到改善。事实上,地球同步卫星可以清晰地观测到和热带气旋有关的对流性云,虽然云的信号会影响遥感信息的质量,从而降低数据的利用率(朱文刚,2012),但卫

星资料在改进强对流天气的预报过程中起到的作用依然无法忽视。

云检测是卫星辐射率资料质量控制中至关重要的一部分。随着科技的进步,国内外专家学者在云检测方面完成了卓有成效的工作。官莉(2005)的研究采用高空间分辨率成像仪的云检测信息和AIRS探测器序列定位了误差对其观测值、云特性反演和晴空订正辐射强度的影响。Goldberg et al (2003)提出了适用于AIRS (Atmospheric Infrared Sounder)的NESDIS-Goldberg云检测方案——一种将AIRS通道和微波通道两者进行经验组合,从而改善云检测能力的方法。此外,官莉和王振会(2007)使用了与AIRS空间匹配的MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectro-radiometer)产品,对受云污染的数据进行确定。朱文刚(2012)将GRAPES-3DVAR系统同AIRS进行结合,设计了适用于GRAPES-3DVAR模式的晴空通道云检测方案,大大提高了中高层资料的使用率,同时改善了中高层的分析场。Xu et al (2021)利用WRFDA同化系统,采用云相关观测误差模型模拟的全天AHI辐亮度与观测值拟合较好,进一步改善云高。然而,云分辨率模型的计算需要得到大量资源的支持,其中有高度非线性的过程(Bauer et al, 2011),也可能会受到参数化方案选择的影响(Otkin, 2012)。所以,资料同化中去除云污染影响最有效的方法之一是剔除云信息而保留晴空资料。

由于静止气象卫星处于偏高的地球同步轨道上,因此其视野开阔,可观测范围广达 $1.7 \times 10^8 \text{ km}^2$ 左右,可占到地球表面积的1/3。与此同时,它可以对同一地区进行连续观测,一般情况下可提供30 min一次的全盘扫描资料,亦或是3~5 min提供一次特定地区的观测资料,并能做到连续监视某个天气系统的演变。因此,它在对强对流天气过程预报方面具有明显优势。2014年10月7日,葵花8号地球同步卫星成功升空并进入其工作轨道,经过9个月的试用期后开始承担业务观测等任务。2015年7月,这颗卫星被日本气象厅正式启用,它是第三代地球同步气象卫星中的第一颗。许冬梅等(2022)研究发现,同化Himawari-8晴空红外辐射率资料对台风背景场的水汽相关变量分析有显著改进。与控制试验,即没有同化Himawari-8晴空红外辐射率资料的试验相比,同化试验对台风“天鸽”的风场、500 hPa气压场的分析效果有所提高,台风气旋性环流加强,并进一步改进了对台风“天鸽”的路径、台风中心最低气压和近中心最大风速的预报。

平均路径误差和降水预报相对于常规观测变量的均方根误差均有所改善。Ma et al (2017)发现直接同化AHI辐射率资料可以有效改善全球对流层上层水汽的中短期预报。王元兵和陈耀登(2018)以2016年7月中下旬的一次华北特大暴雨为试验个例,采用WRFDA同化系统对Himawari-8捕捉到水汽资料进行高质量、高频率的更新同化,从而达到提高初始场质量及模拟效果的目的,体现了卫星资料同化技术的先进性。

在上文提及的各类背景下,本文以2019年4月中下旬一次西南地区的区域性暴雨过程为个例,利用日本Himawari-8气象卫星辐射率资料,采用WRF (Weather Research and Forecasting)中尺度模式系统进行数值模拟,对本次暴雨天气过程的成因进行分析和总结。进一步分析采用Himawari-8辐射率资料同化方法对高度场、风场、降水等要素特征的数值模拟分析结果的作用,从而考察其对天气过程模拟分析和预报的影响。

## 2 资料来源

“葵花8号”静止气象卫星在2014年10月升入赤道上空地球同步轨道,并在试运行9个月后(即2015年7月)开始承担业务观测等任务,是亚洲地区气象业务上时空分辨率较高的卫星之一,在赤道、140°E上空观测地球,东西跨度80°E—160°W、南北跨度60°N—60°S,其红外波段的空间分辨率高达2 km,时间分辨率的精度高至10 min。此外,当地面业务需要提取其捕捉到的各类资料时,其延迟时间也不会超过15 min。国内方面,我国的FY-4A静止气象卫星在试用期也凭借其强大的配置和功能完成了对2017年夏季汛期进行天气过程预报等任务。在相关研究不断推进的过程中,专家发现先进的气象卫星不仅能够观测到更细致的暴雨云团的演变特征,更能做到提前预判对流云团的初生。此外,结合了高时空分辨率的卫星资料与常规降水数据能更进一步地预报降水强度和对流系统的发展状态。因此,未来趋势所向显而易见,气象卫星时空分辨率定将向着更高精度迈进。

“葵花8号”静止气象卫星搭载了先进的静止轨道成像仪AHI,而AHI资料可以精确地呈现本文选取的暴雨过程。它具备16个观测通道(表1),其中第8、9、10(波长分别为6.2  $\mu\text{m}$ 、6.9  $\mu\text{m}$ 和7.3  $\mu\text{m}$ )3个通道能够对水汽进行探测,3个通道权重函数峰值分别在350 hPa、450 hPa与600 hPa左右(Zhugue et al, 2016),因此AHI光谱波段广、时空分



表1 Himawari-8/AHI 16个通道的相关数据  
Table 1 Introduction to 16 channels of Himawari-8/AHI

光谱	通道	中心波长/ $\mu\text{m}$	空间分辨率/km
可见光	1	0.47	1
	2	0.51	1
	3	0.64	0.5
近红外	4	0.86	1
	5	1.6	2
	6	2.3	2
	7	3.9	2
红外	8	6.2	2
	9	6.9	2
	10	7.3	2
	11	8.6	2
	12	9.6	2
	13	10.4	2
	14	11.2	2
	15	12.4	2
	16	13.3	2

分辨率高等优势极大地提高了对研究对象的探测能力。Masahiro (2018)发现与MTSAT-2卫星的水汽通道相比, Himawari-8三个水汽通道的同化显著改善了对流层湿度场。此外, AHI每过10 min可进行一次高分辨率的全圆盘观测, 每2.5 min可对某一特定区域进行扫描, 这些功能大大提高了资料同化的准确性。本文将利用日本葵花8号静止气象卫星晴空红外辐射率资料, 结合地面小时降水、雷达观测资料, 以2019年4月中下旬一次西南地区的区域性暴雨过程为个例进行详细分析, 揭示日本葵花8号静止气象卫星在监测对流云发展过程中的作用, 分析葵花8号卫星辐射率资料同化方法对高度场、风场、降水、雷达资料等要素特征的数值模拟分析结果的影响, 从而增强卫星资料同化技术对天气过程模拟分析和预报影响的进一步认识, 也为我国FY-4A卫星天气预报业务应用打下基础。本文涉及的地图是基于中华人民共和国自然资源部地图技术审查中心标准地图服务系统下载的审图号为GS2019(1711)的中国地图制作, 底图无修改。

### 3 方法介绍

#### 3.1 WRFDA 同化系统及三维变分同化(3D-Var)方法

WRFDA同化系统是中尺度模式WRF的同化系统。中尺度模式WRF是一种非静力且可压缩的

中尺度天气预报模式。WRFDA同化系统的开发和维护工作是由美国国家大气研究中心所承担。本文中的研究通过分析各类观测资料并采用WRFDA中的三维变分同化方法来对初始场进行改进。目前, WRFDA同化系统可以同化各种常规观测和非常规观测资料, 本研究使用的观测算子是美国卫星数据同化联合中心开发的CRTM (Community radiation Transfer Model), 是一种用其来模拟计算AHI辐射数据的快速辐射传输模式。本文基于三维变分同化(3D-Var)方法进行所有的同化试验。三维变分同化方法通过构造一个代价函数, 进而采用数值迭代的方法来求解出最优的分析场。代价函数为:

$$J=(x-x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x-x_b)+[y_o-H(x)]^T \mathbf{R}^{-1}[y_o-H(x)] \quad (1)$$

式中:  $J$ 为目标函数;  $x$ 表示分析场;  $x_b$ 表示背景场;  $y_o$ 表示观测场;  $\mathbf{B}$ 和 $\mathbf{R}$ 分别表示背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵。 $\mathbf{H}$ 表示构建的观测算子, 其上标 $T$ 和上标 $-1$ 分别表示矩阵的转置和求逆。由于模式的初始场中并没有表示卫星观测数据的变量, 且为方便对观测场和背景场进行对比, 我们选择构建观测算子 $\mathbf{H}$ , 将模式变量投影到观测空间, 从而实现大气状态和观测数据之间的转换, 使三维变分同化能够将卫星辐射率资料同化到模式初始场中。

#### 3.2 质量控制及云检测方法

质量控制环节中错误地剔除资料或者保留错误的资料, 都可能给分析带来坏影响; 质量控制后错误的资料将进一步影响偏差订正方案的设计。由于本文同化试验仅涉及晴空条件下的AHI水汽通道数据, 因此在进行试验前, 将引入云检测方案, 去除受云和降水污染的卫星观测。如何剔除有云像素是晴空同化的关键步骤: 采用Zhuge and Zou (2016)方法进行判别云存在的多个测试。测试1: 通道14空间连续, 测试2: 对流层顶发射率测试, 测试3: 通道14和通道15的正值差异(晴空), 测试4: 通道14和通道15的负值差异(不透明厚云), 测试5: 通道14和通道15的差异和暖中心的相对差异(不透明厚云)。测试6: 通过计算通道14和通道10的关系判别卷云, 测试7: 4微米发射率测试, 测试8: 低层云测试; 测试9: 薄云测试; 测试10: 通道14的时间连续性。除了剔除有云像素外, AHI辐射率资料还采用了一系列质量控制, 包括:

- (1) 剔除卫星高度角大于 $65^\circ$ 的观测;
- (2) 剔除混合地表处的观测;

(3) 剔除通道 13(即波长 10.4  $\mu\text{m}$ )的临近 9 个点的标准差大于 2 K 的观测;

(4) 剔除观测和背景场模拟的亮温 O-B 差异大于 8 K 的观测;

(5) 剔除观测和背景场模拟的亮温 O-B 差异大于 3 倍的观测误差的观测。

### 3.3 偏差订正

在卫星资料同化的过程中会产生来自于各方面的误差,如:同化系统、观测模式本身等。为了保证“葵花 8 号”AHI 辐射率资料以无偏的形式进入同化系统,本研究在卫星资料同化前,在考虑偏差的情况下对观测算子进行修正,从而完成对“葵花 8 号”AHI 辐射率资料的偏差订正。偏差订正的方案则采用 WRFDA 同化系统的变分偏差订正 (Variational Bias Correction, VarBC) 方案。VarBC 方案包含 7 个预报因子,分别为: 200~50 hPa 层结厚度、1000~300 hPa 层结厚度、下垫面温度、大气水汽总含量、扫描位置连同扫描位置的平方立方值。可通过一些预报因子的线性组合来表示偏差,方程如下所示:

$$\tilde{H}(x, \beta) = H(x) + \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_p} \beta_i p_i \quad (2)$$

式中:  $\tilde{H}(x, \beta)$  是偏差订正后的观测算子;  $H(x)$  是偏差订正前的观测算子;  $x$  是背景场状态矢量;  $\beta_0$  是偏差的常数项;  $\beta_i$  和  $p_i$  分别是第  $i$  个偏差订正系数和预报因子;  $N_p$  为预报因子个数。假定通道相互独立,偏差订正系数  $\beta_i$  可以通过变分偏差订正方法极小化离线计算获得(许冬梅等, 2022)。

基于本试验的情况,具体要修改的有 200~50 hPa、1000~300 hPa、下垫面温度、水汽总含量几类预报系数,连同变分总偏差的定常部分。具体方法为:第一步,统计得到第一个同化时次所需的初始偏差订正系数;第二步,将后续的同化时次用到的偏差订正系数改为前一个同化时次更新过的系数;最后,预报因子的偏差订正系数就会在最小化过程中随着变分同化的分析场进行更新,从而完成对“葵花 8 号”AHI 辐射率资料的偏差订正。

## 4 暴雨个例及试验设计

### 4.1 暴雨个例

2019 年 4 月 19—21 日,重庆市出现了一场区域性暴雨天气过程。强降雨主要集中在重庆中西部和东北部偏南部分地区,其中,沙坪坝、綦江、万盛、永川、璧山、渝北等 19 个区县 78 个雨量站超过 100 mm;沙坪坝、綦江、万盛、永川等 35 个区县

402 个雨量站超过 50 mm,最大雨量出现在沙坪坝,为 238.6 mm。截至 22 日 12:00(世界时,下同),此次过程已造成万盛、綦江、石柱、永川、沙坪坝、忠县、北碚等 7 个区县 3.6 万人受灾,綦江 1 人、万盛 4 人共计 5 人死亡,6 人受伤,转移安置 1339 人;房屋倒塌 102 间;农作物受灾面积 1270  $\text{hm}^2$ ,其中绝收面积 381.0  $\text{hm}^2$ ;直接经济损失近 4700 余万元。

本次区域性暴雨天气过程有以下几个特点: 1、短时降水强度大; 2、局地性强; 3、突发性高。本次强降水集中中西部地区,以对流性降水为主,而后以稳定性为主。本次暴雨天气过程可以由 FNL 资料 (Final Reanalysis Data 再分析数据集) 分析得到大致两个阶段: 第一阶段:如图 1(a)、(b)、(c)所示,在 19 日 00:00,整体呈现东高西低的环流形势且形势稳定,在对流层高层 (500 hPa) 重庆地区位于槽前,随着时间推移,槽脊不断向东移动,温度场始终落后于高度场,为降水创造了有利条件。中层 (700 hPa) 有西南气流过境且位于湿区,低层 (850 hPa) 有切变线穿过,附近为一弱暖脊。因此,重庆地区一直处于暖区、湿区,且无明显的冷空气影响,结果由边界层的辐合线触发引起暖区对流,从而形成降水。第二阶段:随着时间推移,整体的环流形势发生变化,在对流层高层 (500 hPa) 有高空槽东移过境,至 20 日 00:00,槽后有大量冷空气输送导致原 500 hPa 西风槽进一步加深且已形成一个低涡。而对流层中层 (700 hPa) 有切变线穿过且有干舌侵入湿区,低层 (850 hPa) 上有西南低涡 (位于 140 dagpm 上) 与切变线相配合,而地面上有热低压,综合形成高度的对流不稳定区域,最终由冷空气带来对流性降水。

如图 2 所示,19 日 00:00 至 20 日 00:00,在暴雨区域及其上游方向均存在一个较强的水汽通量带,为暴雨区输送了大量水汽,主要水汽来源是印度洋与南海地区。19 日 06:00[图 2(a)],暴雨区西南侧 (28°N, 105°E) 附近存在一个较小的水汽通量气旋式环流。随后,该气旋式环流不断扩大且向暴雨区方向移动。至 20 日 00:00[图 2(d)],暴雨区东南侧 (30°N, 105°E) 附近水汽通量气旋式环流逐渐变大。气旋式环流越强,该地区辐合上升运动越强,结合较强的水汽通量,为本次降雨创造了有利条件。

### 4.2 试验设计

本文选用 4.2.1 版本的 WRF-ARW 模式对该区域性暴雨过程进行模拟。模式的模拟区域具体设置见图 3,模式区域采用单层网格嵌套方案形式,



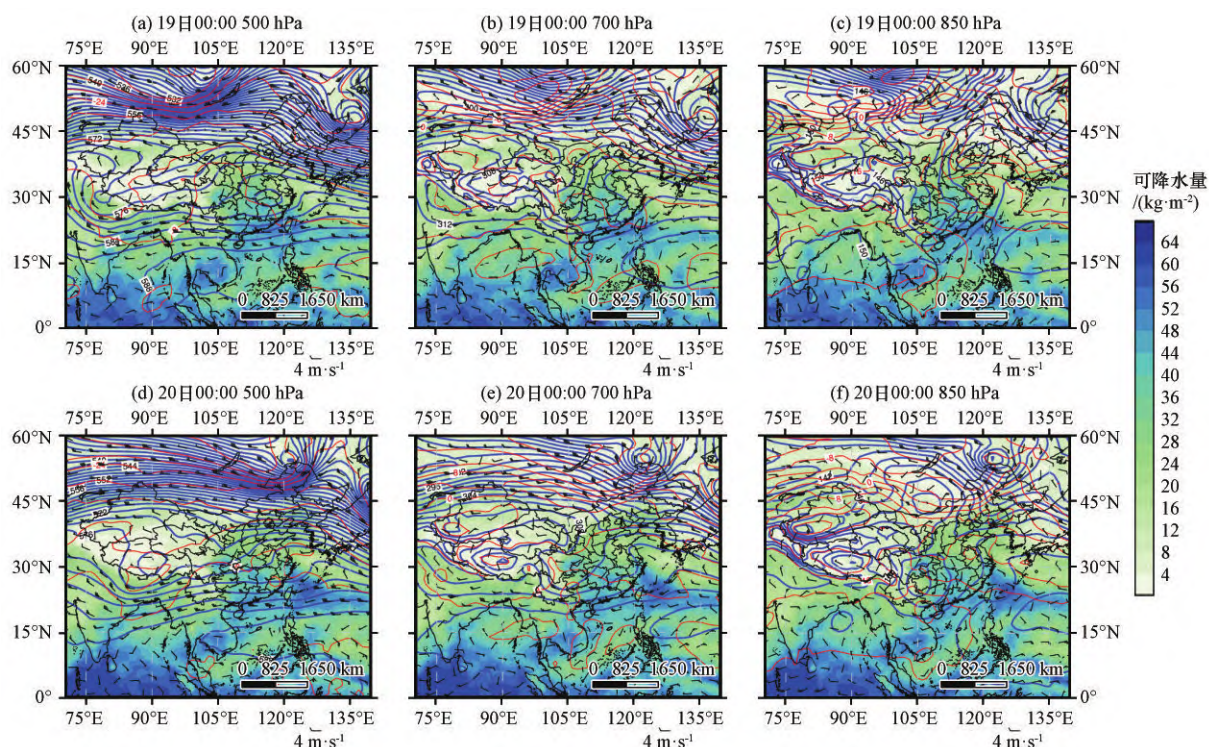


图1 2019年4月19—20日不同时刻、不同位势高度(蓝色等值线,单位: dagpm)的温度场(红色等值线,单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、可降水量(彩色区,单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ )及风速(风向杆,单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 1 The temperature field (contour, red, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), precipitable water (color area, unit:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ), and wind speed (barb, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) at different times and different geopotential heights (blue contour, unit: dagpm) from 19 to 20 April 2019

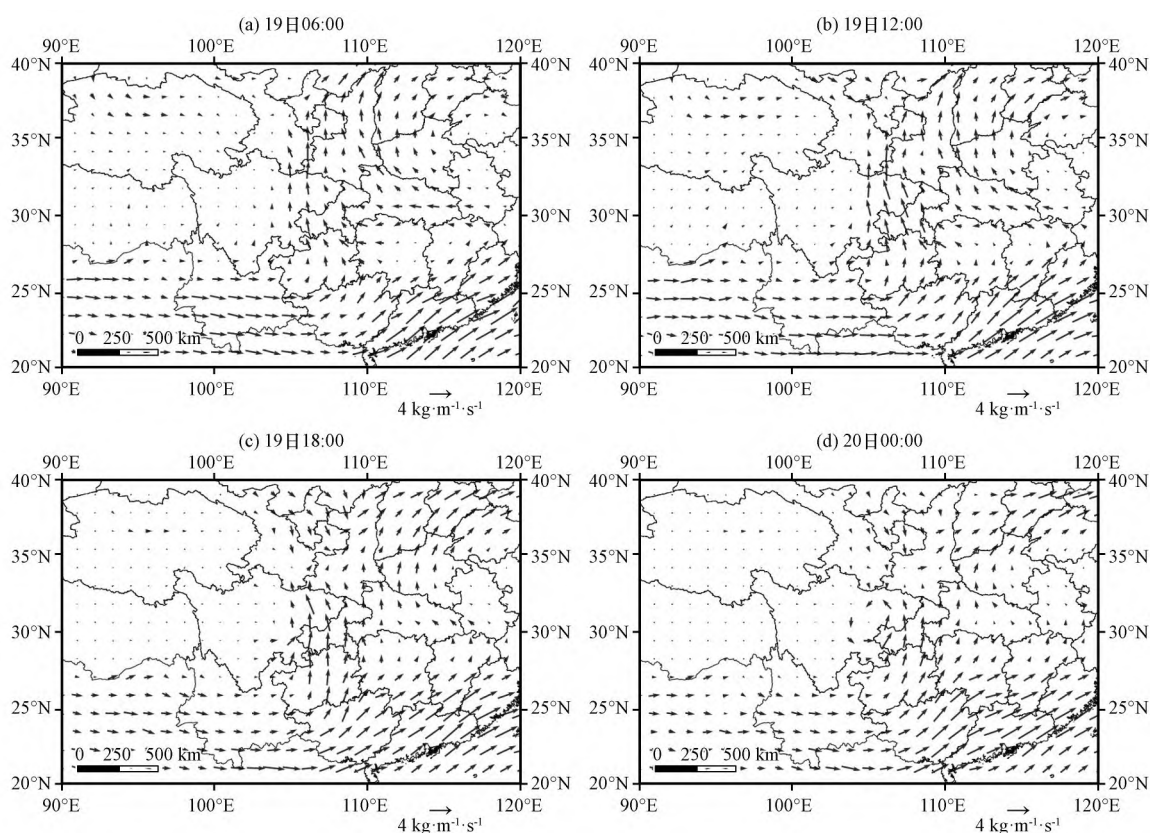


图2 2019年4月19—20日不同时刻的整层水汽通量(矢量,单位:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 2 Water vapor flux (vector, unit:  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of the whole layer at different times on 19 to 20 April 2019



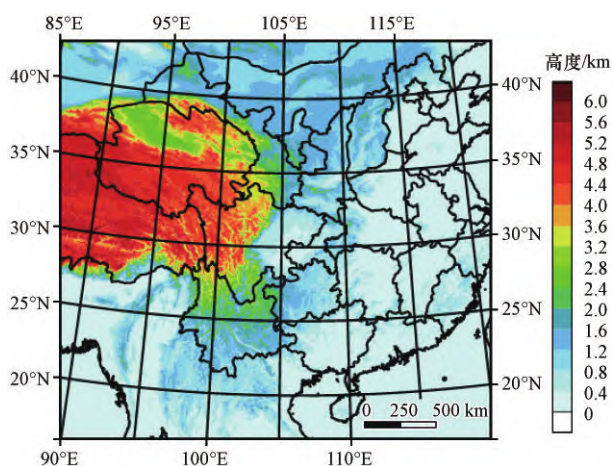


图3 模式区域及高度场(彩色区, 单位: km)

Fig. 3 Mode domain and height field (color area, unit: km)

投影方式选用兰勃托投影, 水平网格数为  $651 \times 601$ , 网格间距为 5 km, 模拟的中心区域为  $30.0^\circ\text{N}$ 、 $105.5^\circ\text{E}$ 。此外, 模式区域的垂直分层共有 50 层, 时间积分步长 30 s。本试验采取了 WDM6S (WRF-Double-Moment and 6-class Schemes) 的 WRF 双参数云微物理方案、RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) 长波辐射方案、YSU (Yonsei University) 大气边界层方案、Dudhia 短波辐射方案、Noah Land Surface Model 陆面过程方案、MM5 similarity 近地面层方案、未使用积云对流参数化方案。

本文通过设置三组同化对比试验, 来考察卫星资料(AHI 辐射率资料)同化对该次强对流天气过程模拟分析和预报的影响。第一组试验为控制试验 (Control), 第二组为常规资料同化试验 (Conventional-DA), 另一组是 AHI 资料同化试验 (AHI-DA)。AHI-DA 试验在模式加入了 AHI 的辐射率资

料同化, 以考察卫星同化技术对于改进模式的影响。三组试验的模拟时段均选择为 2019 年 4 月 19 日 00:00 至 20 日 00:00。其中对于两组同化试验, 首先选取 4 月 18 日 12:00 作为起始时间, 进行 6 h 的确定性预报 (Spin-up) 到 4 月 18 日 18:00, 得到第一次同化所需的背景场, 逐小时循环同化 6 h 至 2019 年 4 月 19 日 00:00。在 4 月 19 日 00:00 资料同化后进行 24 h 确定性预报。2019 年 4 月 18 日 12:00 的初始场和边界条件来源于美国国家环境预测中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 的 GFS (Global Forecasting System, 分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) 再分析资料插值得到。

## 5 试验结果及分析

### 5.1 “葵花 8 号” AHI 辐射率模拟效果

图 4 为葵花 8 号 AHI 2019 年 4 月 19 日 00:00 第 9 通道的实际观测亮度温度分布与模式模拟亮度温度分布图。图 4(a) 是模式模拟背景场 (BAK) 的亮度温度分布, 图 4(b) 是整个模拟区域实际观测 (OBS) 的亮度温度分布。可以发现, 模式模拟的卫星辐射率和观测整体较为接近。在川渝地区 (约  $105^\circ\text{E}$ — $110^\circ\text{E}$ 、 $25^\circ\text{N}$ — $30^\circ\text{N}$ ) 背景场模拟的亮温略低于观测的亮温。背景场中较低的亮温值可能是由背景场中的温湿场偏差带来的。

图 5 展示了葵花 8 号 AHI 第 9 通道偏差订正后观测场减去背景场 (Observation Minus Background, OMB)、偏差订正后观测场减去分析场 (Observation Minus Analysis, OMA) 亮温。具体来说, 图 5(a) 是经过偏差订正后的观测亮温减去背景

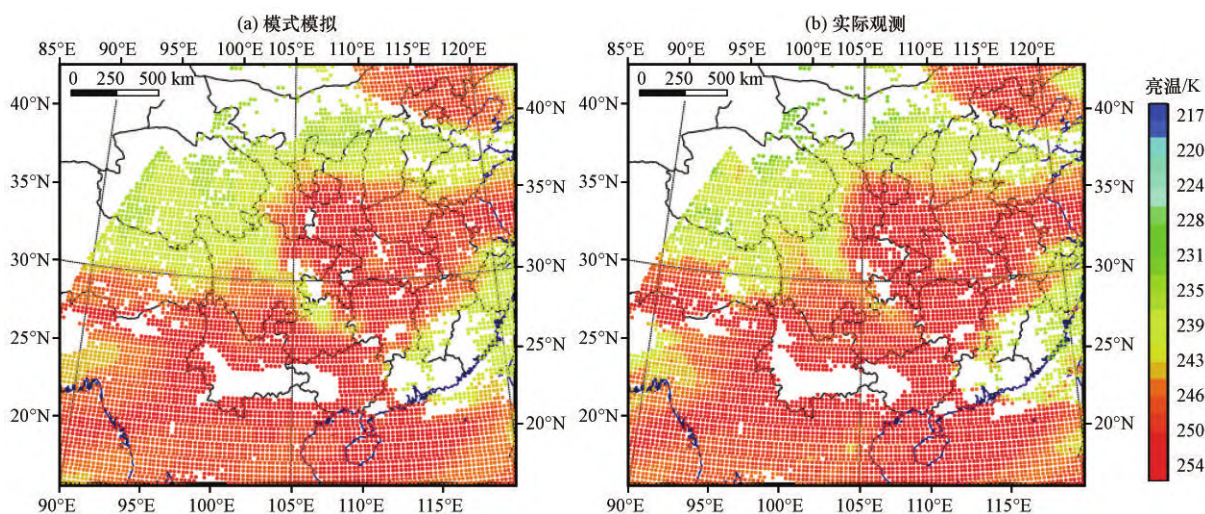


图4 基于葵花 8 号 AHI 第 9 通道的 2019 年 4 月 19 日 00:00 模式模拟(a)与实际观测(b)亮温分布(单位: K)

Fig. 4 Model simulated (a) and observed (b) brightness temperature (unit: K) distribution based on the channel 9 of Himawari-8 AHI at 00:00 on 19 April 2019



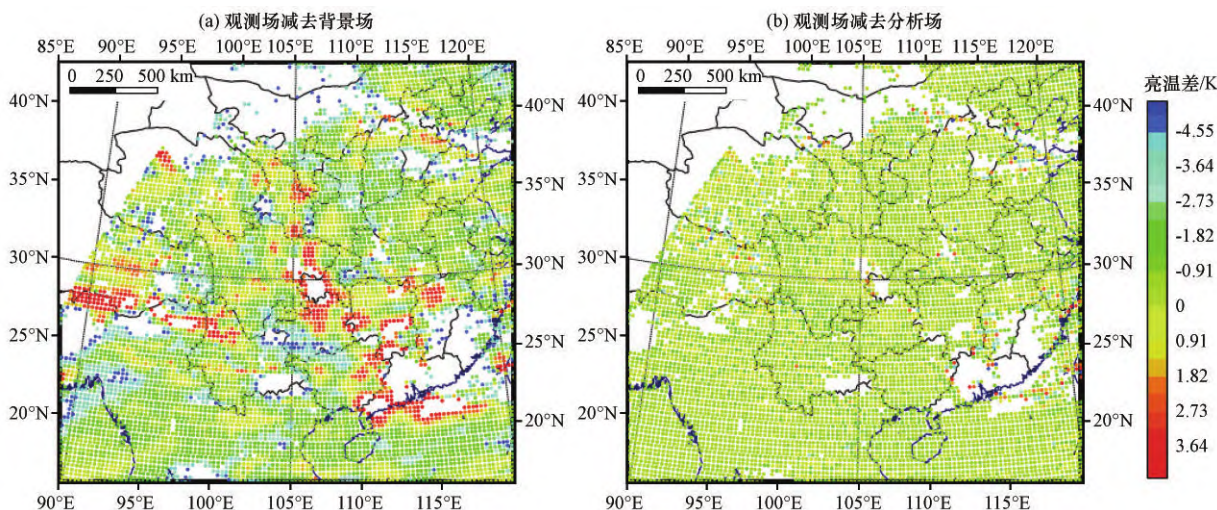


图5 基于葵花8号AH1第9通道经过偏差订正后的亮温观测场减去背景场(OMB)(a)与观测场减去分析场(OMA)(b)的差值分布情况(单位:K)

Fig. 5 The difference distribution of brightness temperature observation field minus background field (OMB) (a) and the distribution of observation field minus analysis field (OMA) (b) after bias-correction based on the channel 9 of Himawari-8 AHI. Unit: K

亮温(OMB)的分布情况,图5(b)是经过偏差订正后的观测场减去分析场(OMA)的分布情况,两张图中的亮温分布情况大体上趋于一致,但图5(b)相较于图5(a)亮温正、负值区域均有所减少,大部分区域的数值接近0,这充分表明在经偏差订正之后,观测与背景模拟亮温的差值(即观测残差)是减小的。可见,分析场亮温相对于背景场亮温更加接近于观测场亮温,证明本次同化的效果较好。

图6显示了葵花8号AH1第9通道的亮度温度分布的散点分布。图6(a)表示在偏差订正之前亮度温度的散点分布,可以看到大多数点分布在对角线两侧,这意味着基于背景场模拟的亮度温度

和观测值略有差异。图6(b)表示偏差订正后亮度温度的散点分布,对背景场中相对较高的亮度温度进行偏差订正,使这些点收敛到均值绝对值较小的对角线。图6(c)表示在同化辐射率数据并经过偏差订正后的亮度温度散点分布,散点以更小的离散度更多地收敛到对角线,并且均值、标准差以及均方根值都显著减小,其绝对值也更接近0。尽管也存在一些异常点,但分析场模拟的亮度温度的一般特征更接近观测场,即分析场亮温(ANA)相较于背景场亮温(BAK)更加接近观测场亮温(OBS)。因此,这也证明了同化AH1辐射率资料的有效性。

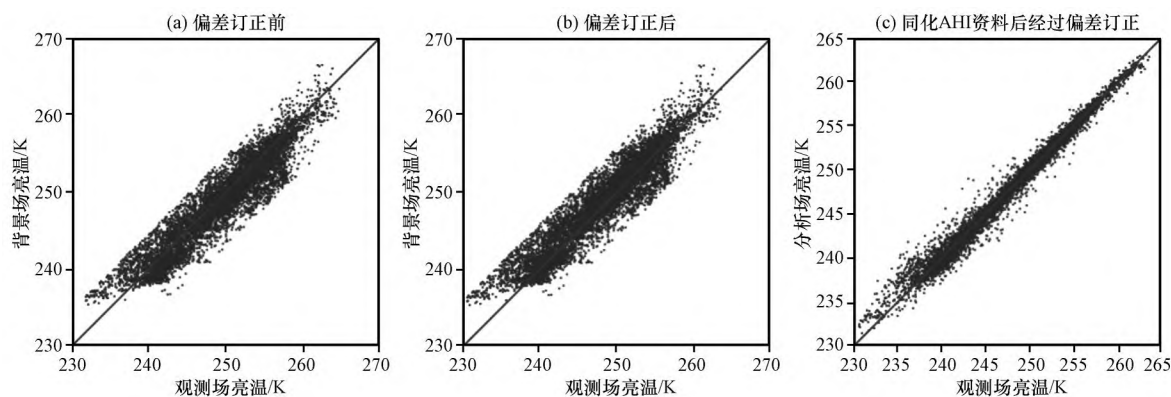


图6 基于葵花8号AH1第9通道的偏差订正前(a)、订正后(b)亮温散点分布以及同化辐射数据后的偏差订正后亮温散点分布(c)

Fig. 6 The scatter of brightness temperature distribution before bias-correction (a), after bias-correction (b), and the scatter plot of brightness temperature distribution after assimilation of radiation data after bias-correction (c) based on the channel 9 of Himawari-8 AHI



图7为2019年4月19日00:00 AHI第9通道的OMB和OMA统计特征的频数直方图。图7(a)表示在偏差订正之前OMB频数直方的统计特征,图7(b)表示在偏差订正之后OMB频数直方的统计特征,通过对比图7(a)、(b)两图可以看出,同化中偏差订正方案对系统误差进行了一定程度上的纠正,并为第9通道资料找到了更合理的频数分布。从经过偏差订正后OMA统计特征的频数直方图[图7(c)]可以看出,OMA频数比OMB频数小且呈正态分布,这满足了3D-Var方法所用数据的规则。因此,这也证明了本次同化方案十分有效。

## 5.2 代价函数

图8表示代价函数和梯度随迭代时间的变化。在本次试验中,当代价函数的梯度降低1%,满足代价函数的梯度标准,或内部迭代达到200次时,

内部的最小化过程将会停止,这是3D-Var方法中常用的手段。该次试验结果表明,这种情况符合代价函数梯度降低的准则。在图8(a)中有一条明显的指数递减曲线,表示代价函数随迭代时间呈现指数式递减。图8(b)则表示梯度随迭代时间的增加而减小,是一条不规则的递减曲线。从图8(a)可以看出,在前10次迭代中,代价函数显著降低。而经过30次迭代后,代价函数曲线逐渐变得平滑,此时背景场和观测场之间的差异最大。随着不断的迭代,背景场会经历持续的调整。最后,代价函数倾向于达到稳定的最小值,该最小值表示代价函数具有其最优解的点。与此同时,图8(b)中展示的梯度也通常随着迭代次数的增加而降低。代价函数的指数式下降及其梯度的变化趋势表明了试验中对AHI辐射率资料同化的有效性,最终的迭代分析场也更接近于观测值。

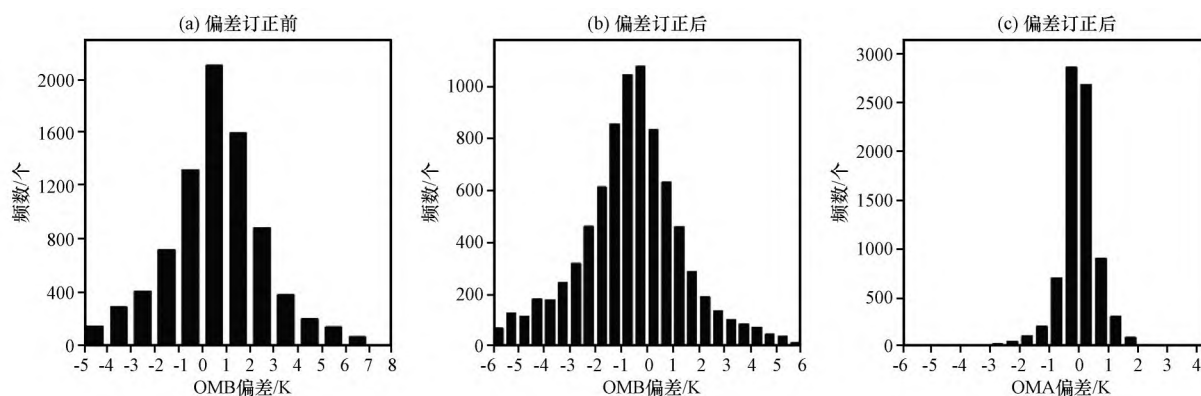


图7 AHI第9通道的OMB和OMA统计特征的频数直方图

Fig. 7 Frequency histogram of OMB and OMA statistical features of AHI radiance from channel 9

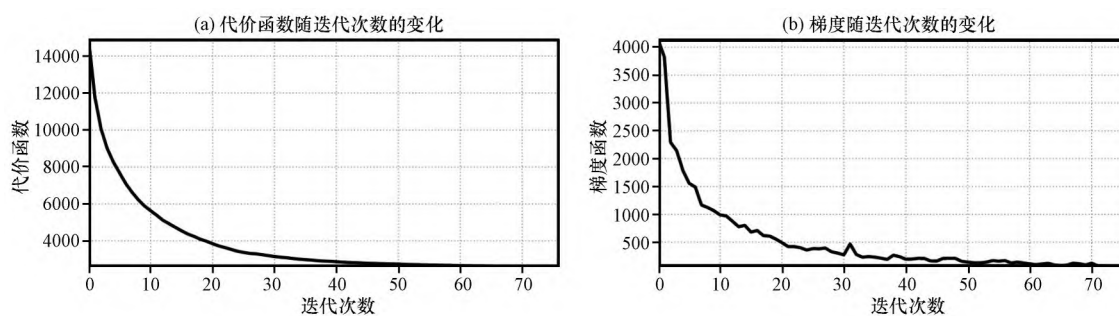


图8 代价函数(a)与梯度函数(b)分别随迭代次数的变化

Fig. 8 The variation of the cost function (a) and the gradient function (b) with increasing of iteration times

## 5.3 850 hPa水汽通量分析

图9呈现的是2019年4月19日00:00 850 hPa风场与水汽通量。对于700 hPa和500 hPa的水汽通量(图略),也有一致的效果,但是没有850 hPa显著,因此主要讨论850 hPa。其中图9(a)为GFS再分析资料得到的参考图。从图9(a)中可见,850 hPa处重庆地区水汽条件较为充沛,达到 $8 \times 10^{-3} \sim$

$12 \times 10^{-3} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,且面积覆盖了重庆西部与四川东部地区。图9(b)与9(a)相比,在四川东部地区的模拟的水汽通量大值区较实况明显偏小,且未能表现出两广地区的850 hPa水汽通量大值区。卫星同化试验模拟出的水汽通量如图9(c)所示,四川东部的模拟水汽通量大值区模拟面积调整效果明显,并成功模拟出了两广地区的850 hPa水汽通量大

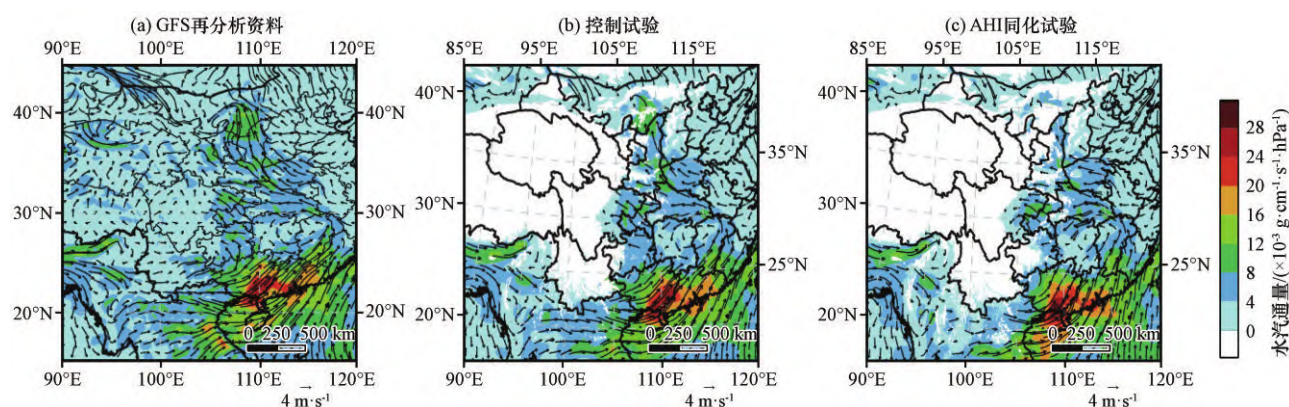


图9 2019年4月19日00:00的GFS再分析资料(a),控制试验(b),AHI-DA同化试验(c)的850 hPa风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )与水汽通量(彩色区,单位: $\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ )的空间分布

Fig. 9 The distribution of 850 hPa wind field (vector, unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) and water vapor flux (color area, unit:  $\times 10^{-3}\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}$ ) in GFS reanalysis data (a), control experiment (b), AHI-DA assimilation experiment (c) at 00:00 on 19 April, 2019

值中心。因此,可以认为经过同化后的AHI水汽通道辐射率资料的850 hPa水汽通量较未同化的模拟结果有很大改善,与实际情况更为接近。

#### 5.4 雷达回波

通过雷达最大反射率因子可以基本判断出本次暴雨过程的降水落区、降水强度、强中心位置及演变趋势。图10呈现的是2019年4月19日06:00至20日00:00的雷达回波图,其中(a)、(c)、(e)、(g)代表控制试验的不同时次,(b)、(d)、(f)、(h)代表卫星同化试验的不同时次。如图10所示,从19日06:00开始,系统在我国西北地区开始发展并逐渐向东南方向移动。至19日18:00,生成明显的带状回波,整体呈现东北-西南倾向。通过对比19日18:00至20日00:00的控制试验与同化试验雷达回波(e)、(g)、(f)、(h)四图,结合下文图11的24 h累计降水量,可以发现控制试验相比于卫星同化试验,存在着模拟甘肃东南部虚假降水与四川东北部降水面积过大的问题。而在卫星同化试验的回波图中,有效消除了上述两地的虚假回波,使回波与降水实况相适应。因此可以认为同化AHI水汽通道辐射率资料能有效改善雷达回波的模拟水平,进而提高了对此次暴雨天气过程的预报准确率。

#### 5.5 降水预报

图11中展示了2019年4月19日00:00至20日00:00的24 h累计降水量。图11(a)是由中国自动站与CMORPH(Climate Prediction Center morphing)降水产品融合的逐时降水量网格数据集绘制的24 h累计降水实况图。如图11(a)所示,模式区域中的降水主要分布在陕西西部向南延伸至四川东部以及重庆中西部地区,强降雨主要集中在重庆中西部及其偏南部分地区。图11(b)控制试验模拟的24 h累计降水,其有能力模拟出四川东部的强降雨中心,而这

些雨强中心的规模相较实况明显偏大,且缺少了重庆中西部地区的雨带。另一方面,控制试验在甘肃东部有显著的虚假降水中心。在图11(c)常规资料同化试验和图11(d)卫星同化试验模拟出的24 h累计降水中,在河南西部与陕西东南部模拟出的降水较实况略偏多,同时主体雨区偏西。其中常规资料同化试验的降水预报在甘肃西部的虚假降水量级较大。与图11(b)相比,两组同化试验能显示出四川中部偏东地区的雨带以及重庆中西部的雨带。此外卫星同化试验对四川东部和甘肃东南部的虚假强降水均进行了有效抑制。因此,AHI水汽通道辐射率资料经过同化后模拟的降水区域以及强度上与观测实况更为接近,进而改进了对此次重庆地区区域性暴雨天气过程的降水预报效果。

#### 5.6 ETS评分

图12是2019年4月19日00:00起报的24 h预报时效、不同雨量等级的控制试验与同化试验ETS评分。从ETS评分图可知,除0.1 mm微雨量级外,其他雨量量级卫星同化试验的ETS评分均高于控制试验的ETS评分。随着降水量级的增长,控制试验ETS评分减小,在50 mm暴雨量级评分接近于0;卫星同化试验ETS评分先增大,在10 mm小雨量级达到最大,之后开始减小。常规资料同化试验除了50 mm量级得分略高于其他两组试验,其他均未显示出同化常规资料的优势。由此表明,经过卫星同化试验的降水预报的ETS评分总体而言明显高于控制试验模拟出的降水预报的ETS评分,且在小雨量级降水预报中,经过卫星同化试验的优势最为明显。

## 6 结论

本文基于WRF模式和WRFDA同化系统,采



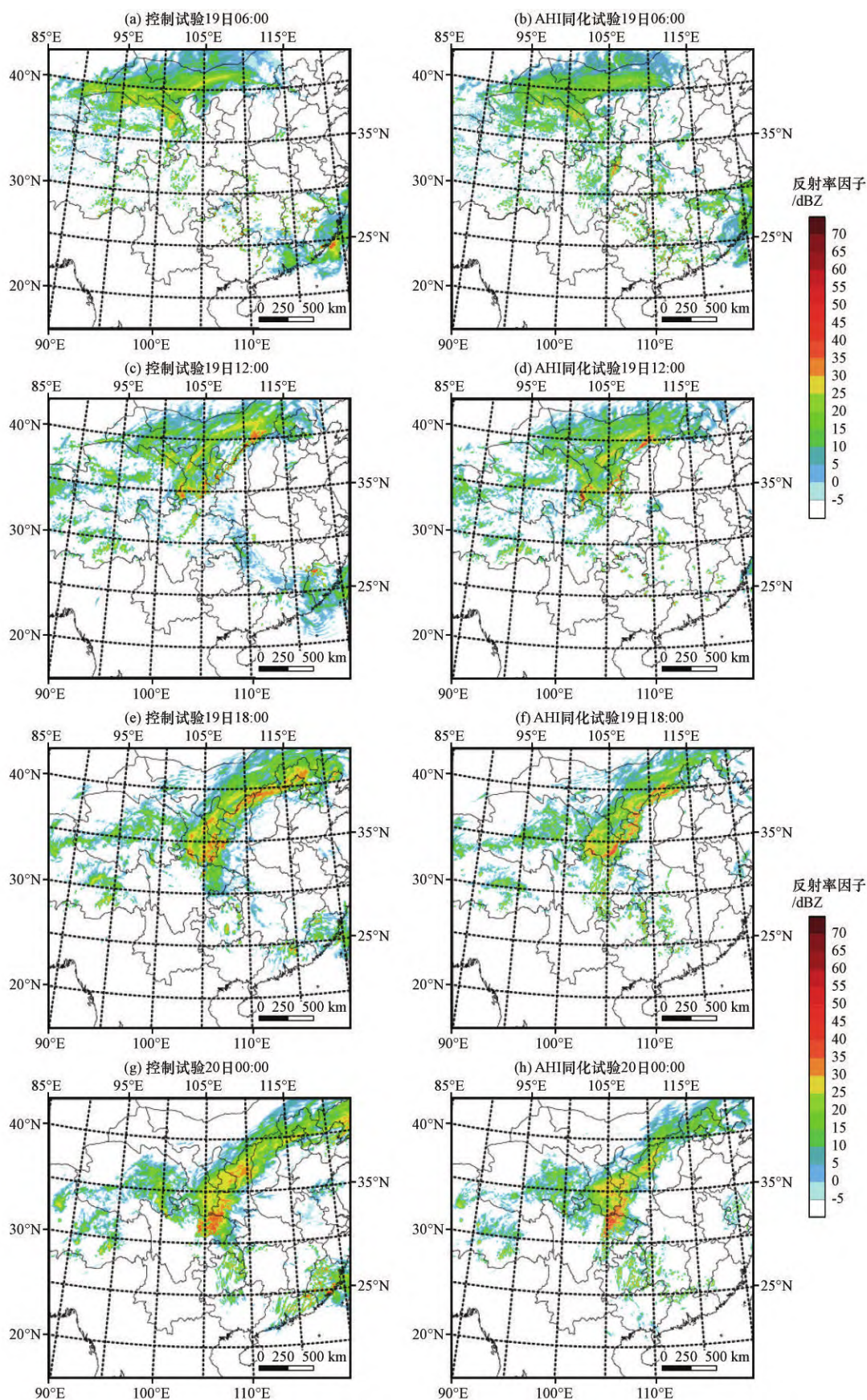


图 10 2019 年 4 月 19—20 日不同时刻控制试验(左)与 AHI 同化试验(右)的雷达最大反射率因子(单位: dBZ)

Fig. 10 The radar maximum reflectivity factor (unit: dBZ) of the control test (left) and the AHI assimilation test (right) at different times from April 19 to 20, 2019



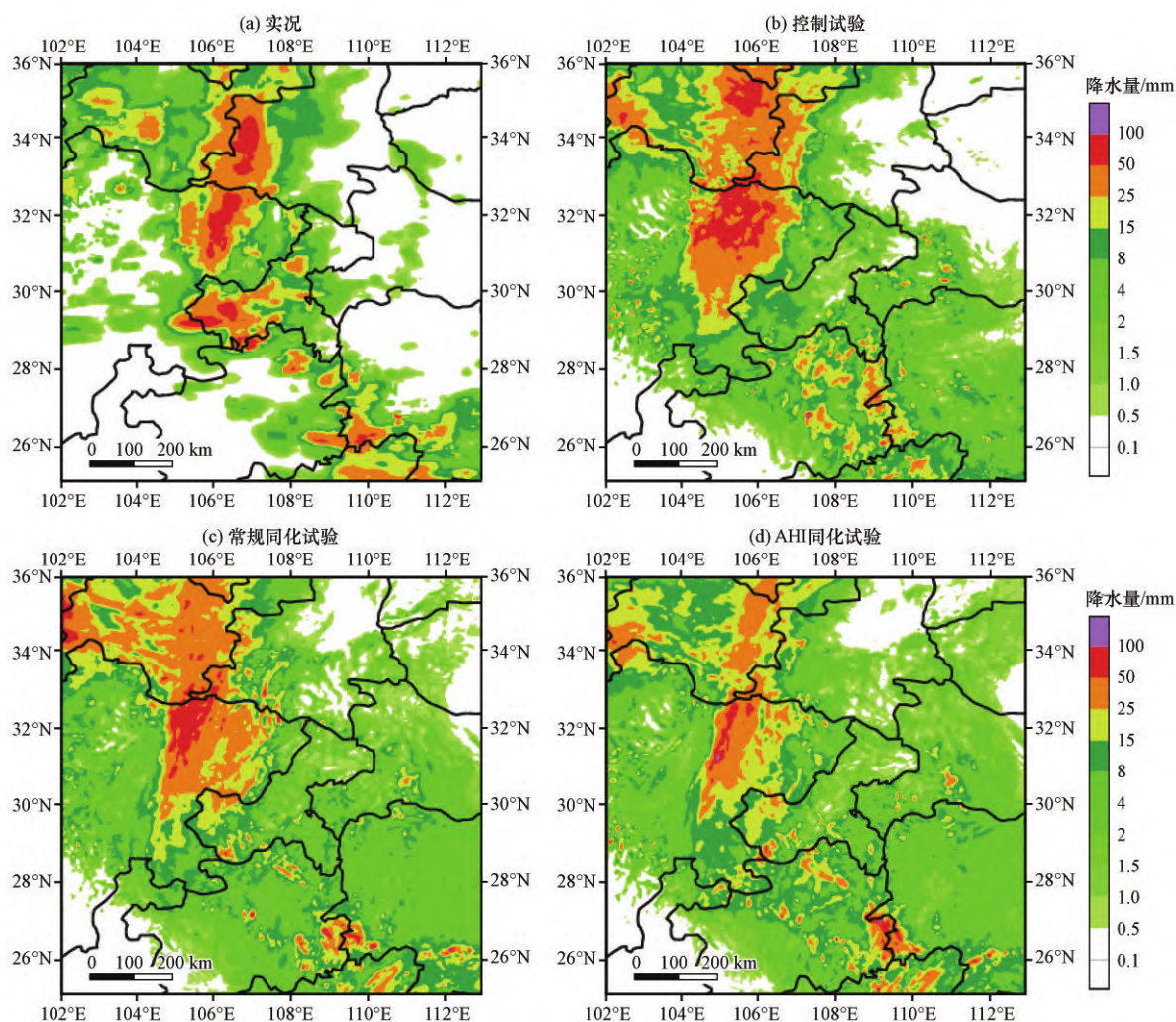


图 11 2019年4月19日00:00至20日00:00实况图(a)、控制试验(b)、常规同化试验(c)、AHI同化试验(d)的24 h累计降水量(彩色区,单位:mm)

Fig. 11 The 24-hour cumulative precipitation from observed (a), control experiment (b), conventional assimilation experiment (c), AHI assimilation experiment (d) from 00:00 on April 19, 2019 to 00:00 on April 20 (color area, unit: mm)

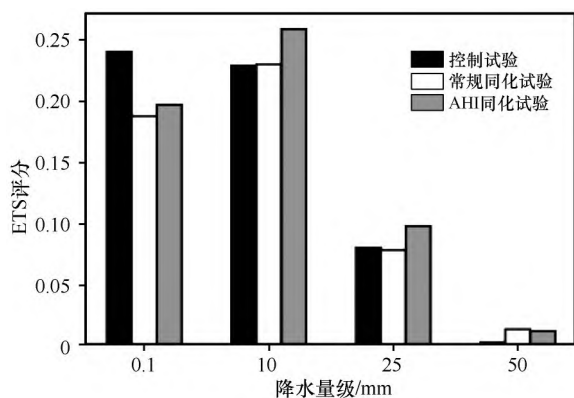


图 12 24 h累计降水量量的ETS评分

Fig. 12 The ETS score of the 24 h cumulative precipitation magnitude

用3D-Var同化方法对晴空条件下AHI辐射率资料进行同化,来检验其对我国重庆地区出现的一次区域性暴雨天气预报效果是否有改进作用。本文得

出如下结论:

(1) 在同化AHI红外辐射率资料之后,本研究使用的观测算子CRTM可以剔除背景场中亮度温度的无效值,使模拟亮温的各类误差减小,使分析场相比背景场和观测更为接近。而经过偏差订正后,OMB分布基本接近均值为0的正态(高斯)分布,同时相较于OMB,OMA的均值、标准差以及均方根值都显著减小,其绝对值也更接近0,说明分布也更加收敛,从而证明本次同化收到了很好的效果。

(2) 静止气象卫星葵花8号AHI水汽通道辐射率资料同化方法有效提高了对各层高度上的风场、水汽场、雷达资料等要素特征的数值模拟分析效果,其中在850 hPa水汽通量散度场上,同化后的结果较其他层次更为显著,同化后的雷达反射率因子也更与降水实况相一致,并且对AHI水汽通道辐射率资料进行同化后得到的风场和流场也更加匹



配,因此我们可以认为同化AHI水汽通道辐射率资料能有效改善此次降水预报效果。

(3) 经过AHI水汽通道辐射率资料同化后模拟的降水区域以及强度上与观测实况更为接近,从而成功改善了对此次重庆地区区域性暴雨天气过程的降水预报效果。尤为突出的是,此次暴雨主要的雨带位置以及强降水中心位置的精确程度显著高于控制试验中的预报效果。具体来说,经过卫星同化的试验可以预报出控制试验漏报的强降水中心,并且有效地削弱了四川东部和甘肃东南部的虚假强降水范围以及强降水中心。

值得注意的是,虽然加入葵花8号卫星辐射率资料的同化试验对于本次暴雨过程模拟效果的改进十分显著,但仍然存在不可避免的问题。为充分检验同化AHI辐射率资料的效果,后续研究应对多个暴雨个例进行试验。此外,本文仅对晴空条件下AHI资料进行同化,去除了云和降水区域的观测资料,因此实现静止卫星红外辐射率资料的全天空同化也是下一步工作。另外,后期将开展FY-4A AGRI辐射率资料同化的相关工作,通过对比两种资料同化对暴雨系统分析及预报影响的异同,以进一步提高静止红外辐射率资料在暴雨系统的分析与预报中的应用能力。

**致谢:** 本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助。

#### 参考文献:

- Bauer P, Ohring G, Kummerow C, et al, 2011. Assimilating satellite observations of clouds and precipitation into NWP models [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(6): ES25-ES28. DOI: 10.1175/2011BAMS3182.1.
- Goldberg M D, Qu Y, Mcmillin L M, et al, 2003. AIRS near-real-time products and algorithms in support of operational numerical weather prediction [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2): 379-389. DOI: 10.1109/TGRS.2002.808307.
- Honda T, Miyoshi T, Lien G Y, et al, 2018. Assimilating all-sky Himawari-8 satellite infrared radiances: a case of typhoon soudelor (2015) [J]. *Monthly Weather Review*, 146(1): 213-229. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0357.1.
- Ma Z Z, Eric S M, Zhang B L, et al, 2017. Impact assessment of Himawari-8 AHI data assimilation in NCEP GDAS/GFS with GSI [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(4): 797-815. DOI: 10.1175/JTECH-D-16-0136.1.
- Masahiro K, 2018. Assimilation of Himawari-8 Clear Sky Radiance Data in JMA's global and mesoscale NWP systems [J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 96B: 173-192. DOI: 10.2151/jmsj.2018-037.
- Minamide M, Zhang F Q, 2018. Assimilation of All-Sky infrared radiances from Himawari-8 and impacts of moisture and hydrometer initialization on convection-permitting tropical cyclone prediction [J]. *Monthly Weather Review*, 146(10): 3241-3258. DOI: 10.1175/MWR-D-17-0367.1.
- Otkin J A, 2012. Assimilation of water vapor sensitive infrared brightness temperature observations during a high impact weather event [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 140(D19): D19203. DOI: 10.1029/2012JD017568.
- Wang Y B, Liu Z Q, Yang S, et al, 2018. Added value of assimilating Himawari-8 AHI water vapor radiances on analyses and forecasts for "7·19" severe storm over north China [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 123(624): 3374-3394. DOI: 10.1002/2017JD027697.
- Wu Y L, Liu Z Q, Li D Q, 2020. Improving forecasts of a record-breaking rainstorm in Guangzhou by assimilating every 10-min AHI radiances with WRF 4DVAR [J]. *Atmospheric Research*, 239(623): 104912. DOI: 10.1016/j.atmosres.2020.104912.
- Xu D M, Liu Z Q, Fan S Y, et al, 2021. Assimilating All-sky infrared radiances from Himawari-8 using the 3DVar method for the prediction of a severe storm over North China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(4): 661-676. DOI: 10.1007/s00376-020-0219-z.
- Zhuge X, Zou X, 2016. Test of a modified infrared-only ABI cloud mask algorithm for AHI radiance observations [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(11): 2529-2546. DOI: 10.1175/JAMC-D-16-0254.1.
- 耿晓雯, 闵锦忠, 杨春, 等, 2020. FY-4A AGRI辐射率资料偏差特征分析及订正试验 [J]. *大气科学*, 44(4): 679-694. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1907.18254.
- 官莉, 王振会, 2007. 用空间匹配的MODIS云产品客观确定AIRS云检测 [J]. *气象科学*, 27(5): 516-521. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2007.05.007.
- 官莉, 2005. 卫星红外超光谱资料及其在云检测、晴空订正和大气廓线反演方面的应用 [D]. 南京: 南京信息工程大学.
- 黄嘉丽, 秦新秀, 2020. 近50年来我国西南地区暴雨变化特征分析 [J]. *低碳世界*, 10(12): 229-230. DOI: 10.16844/j.cnki.cn10-1007/tk.2020.12.111.
- 蒋璐西, 陈科艺, 陈林琳, 2019. MWHS/FY-3资料同化在四川盆地暴雨预报中的应用研究 [J]. *高原山地气象研究*, 39(4): 9-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-2184.2019.04.002.
- 毛璐, 谢彦辉, 刘瑞霞, 等, 2022. FY-3C微波湿度计辐射率资料同化对RMAPS-ST系统的降水预报影响 [J]. *高原气象*, 41(4): 896-908. DOI: 10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00025.
- 束艾青, 许冬梅, 李泓, 等, 2022. FY-3D卫星MWHS-2辐射率资料直接同化对台风“米娜”预报的影响 [J]. *热带海洋学报*, 41(5): 17-28. DOI: 10.11978/2021160.
- 覃丹宇, 方宗义, 2014. 利用静止气象卫星监测初生对流的研究进展 [J]. *气象*, 40(1): 7-17. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.01.002.
- 王元兵, 陈耀登, 2018. 葵花8号辐射率资料在对流尺度数值预报中的同化研究 [C]// 第35届中国气象学会年会S9卫星资料同化. 64.

- 许冬梅, 沈菲菲, 李泓, 等, 2022. 新一代静止气象卫星葵花8号的晴空红外辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 海洋学报, 44(3): 40–52. DOI: 10.12284/hyxb2022087.
- 杨春, 闵锦忠, 刘志权, 2017. AMSR2 辐射率资料同化对台风“山神”分析和预报的影响研究[J]. 大气科学, 41(2): 372–384. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1608.16127.
- 张冰, 郑媛媛, 沈菲菲, 等, 2021. 2017年苏南一次特大暴雨高分辨率模拟及特征分析[J]. 气象科学, 41(3): 386–397. DOI: 10.12306/2020jms.0051.
- 张家国, 王珏, 周金莲, 等, 2008. 暴雨多普勒天气雷达回波特征分析
- 析及临近预警[J]. 暴雨灾害, 27(4): 326–329. DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2008.04.007.
- 张涛, 姜立鹏, 师春香, 等, 2019. AMSU-A 全空辐射率资料同化对台风“天鸽”的预报影响研究[J]. 大气科学学报, 42(5): 705–714. DOI: 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20180731001.
- 周玉淑, 颜玲, 吴天贻, 等, 2019. 高原涡和西南涡影响的两次四川暴雨过程的对比分析[J]. 大气科学, 43(4): 813–830. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1807.18147.
- 朱文刚, 2012. 高光谱大气红外探测器 AIRS 资料云检测及晴空通道应用技术初步研究[D]. 南京: 南京信息工程大学.

## The Impact of Assimilating Himawari-8 Radiance Data on the Prediction of a Severe Storm over Sichuan-Chongqing Region

LIANG Hao<sup>1,2,3</sup>, XU Dongmei<sup>1,2</sup>, SHU Aiqing<sup>1,4</sup>, ZHANG Xuewei<sup>1,4</sup>, SONG Lixin<sup>1,4</sup>

- (1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education /Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, Jiangsu, China;
2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
3. Chengde Meteorological Bureau, Chengde 067000, Hebei, China;
4. China Meteorological Administration Radar Meteorology Key Laboratory, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

**Abstract:** Himawari-8 is a new generation of stationary orbit imager, AHI (Advanced Himawari Imager) on-board is able to provide observations with high spatial and temporal resolution to detect weather systems continuously over Sichuan - Chongqing Region. In this study, a numerical simulation is conducted for a severe regional storm event over Sichuan-Chongqing region on April 19, 2019 based on the weather Research and Forecasting (WRF) model. Furtherly, several radiance data assimilation experiments were performed for the storm with the WRF data assimilation (WRFDA) system from Himawari-8 AHI water vapor channels. Infrared radiance quality control and cloud detection procedures are conducted firstly. Cycling data assimilation schemes are further designed to investigate the impact of assimilating AHI radiance on the analyses and prediction of the weather system. The results show that the simulated brightness temperature of AHI water channels based on the radiative transfer model of CRTM in the analysis is more consistent with the observed brightness temperature than the those simulated from the background. It is also found that that assimilation of Himawari-8 AHI water vapor channels contributes to better describing the model initial conditions including the wind field, the water vapor field, and the radar reflectivity on multiple levels. Compared to the control experiment without any data assimilation, the forecast skill is enhanced in terms of predicting the main patterns of the precipitation after assimilating the AHI water vapor radiance data. To be specific, the assimilation experiment could capture the position of the main rainband and the center of heavy precipitation better. Through the AHI water vapor data assimilation, the heavy precipitation centers that are missed in the control experiment are successfully predicted. In addition, AHI radiance data assimilation experiment effectively improves the overestimated heavy precipitation from the control experiment in eastern Sichuan and southeastern Gansu for both the range and intensity. This study aims to provide the useful reference for the pretreatment and assimilation of geostationary infrared radiance data in the rainstorm system in numerical models over Sichuan-Chongqing Region.

**Key words:** rainstorm over Sichuan and Chongqing Region; the radiance data of the AHI; data assimilation; the moisture field