

FY-3D 卫星 MWHS II 资料直接同化对北京 7·31 暴雨预报的影响

徐忠燕¹ 杜涵² 徐瑾² 李玉鹏³ 田少龙¹ 平凡²

¹ 南京信息工程大学遥感与测绘工程学院, 南京210044

² 中国科学院大气物理研究所云降水与强风暴重点实验室, 北京100029

³ 吉林省气象科学研究所所长白山气象与气候变化重点实验室, 长春130062

摘要: 本研究以 2023 年北京 7·31 暴雨为例, 深入探讨了 FY-3D 卫星 MWHS II 微波湿度计资料直接同化对极端降水预报的影响。通过设置同化前后的对比实验, 并结合 WRF 数值预报模式, 对同化效果进行了多尺度、多要素的系统分析。研究发现: MWHS II 资料同化明显改善了极端降水的模拟效果, 成功捕捉到了超过 550 毫米的降水极值中心, 并更准确地模拟了降水的空间分布。研究还揭示了同化作用对多尺度系统的影响: 同化显著改善了大尺度环流场, 为极端降水事件创造了有利条件, 使得关键区域的温度梯度增强, 水汽分布得到优化 (尤其是东部海域的水汽通道), 气压场的南北梯度也同时增加, 共同维持了稳定的利于降水的大尺度背景。另一方面, 同化对对流系统的影响更为突出: 北京区域垂直涡度结构被优化, 中高层负涡度和低层正涡度的增强促进了上升运动; 大气不稳定性增加 (表现为低层相对湿度增大、中层减小, 位温垂直梯度加大), 为强对流的触发和维持提供了有利条件。同时, 微物理过程得到改善: 中高层雪和霰粒子形成增多, 低层云水向雨水的转化加速, 提高了整体降水效率。这些影响在模拟的前 36 小时内尤为明显, 凸显了同化在降水初期和发展阶段的关键作用。

关键词: 卫星资料同化; 微波湿度计; FY-3D; 多尺度系统

文章编号

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2501.24107

Influence of direct assimilation of FY-3D satellite MWHS II data on July 31 rainstorm forecast in Beijing

Xu Zhongyan¹, Du Han², Xu Jin², Li Yupeng³, Tian Shaolong¹, Ping Fan²

¹ School of Remote Sensing and Geomatics Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;3

² Key Laboratory of Cloud Precipitation and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology and Climate Change, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract: This study examines the impact of direct assimilation of FY-3D satellite MWHS II microwave humidity sounder data on the prediction of extreme rainfall, using the July 31, 2023, heavy rainstorm in Beijing as a case study. Comparative experiments were conducted before and after data assimilation, and the WRF numerical prediction model was applied to analyze the effects across multiple scales and variables. The results show that the assimilation of MWHS II data significantly improved the simulation of extreme rainfall. It successfully captured the maximum rainfall center, exceeding 550 mm, and

收稿日期 2025-02-19; 网络预出版日期

作者简介 徐忠燕, 女, 1999年出生, 硕士研究生, 主要从事卫星资料同化研究。E-mail: 774019857@qq.com

通讯作者 平凡, 男, 研究员、博导, E-mail: pingf@mail.iap.ac.cn

provided a more accurate simulation of rainfall distribution. The study also highlights the effect of assimilation on large-scale systems. It improved the large-scale environmental field, creating conditions that favored the extreme rainfall event. Key improvements included a strengthened temperature gradient in critical areas, optimized water vapor distribution, especially over the eastern sea, and an increased north-south pressure gradient. Together, these factors maintained a stable large-scale background that supported precipitation. On a smaller scale, the impact on convective systems was even more noticeable. Over the Beijing area, the vertical vorticity structure was optimized, with enhanced negative vorticity in the mid-to-upper atmosphere and increased positive vorticity in the lower levels, which promoted upward motion. The atmosphere became more unstable, with increased relative humidity in the lower levels, decreased humidity in the mid-levels, and a steeper vertical temperature gradient. These factors contributed to the triggering and maintenance of strong convection. Additionally, the microphysical processes were improved. More snow and graupel particles formed in the mid-to-upper layers, and the conversion of cloud water to rainwater accelerated in the lower levels, enhancing the overall precipitation efficiency. These effects were most prominent during the first 36 hours of the simulation, emphasizing the critical role of data assimilation during the early and developing stages of precipitation.

Keywords: satellite data assimilation; microwave hygrometer; FY-3D; multiscale system

1 引言

气候变暖背景下, 全球水循环加快, 极端强降水事件的频率和强度持续增加, 给人民的生命和财产安全带来严重的损失, 极端降水的精准预报是气象科研和业务的重大挑战。

极端降水的精准预报依赖于精细的优质初始场, 而多源资料同化技术则是形成优质初始场的关键手段。多源观测资料包括自动站等常规探测观测、也包括雷达和卫星等, 与常规观测资料相比, 卫星观测具有时空分辨率及观测效率高、覆盖范围广等优点, 目前已有了广泛的应用。我国的风云三号 D 星与风云三号 C 共同组网, 形成我国新一代极轨气象卫星上、下午星组网观测的业务布局, 进一步提高了大气探测精度。其上搭载的微波湿度计二型 (MWHS II) 跟上一代相比有更多的探测通道和更高的探测精度。对 FY-3D 微波湿度计进行资料同化研究, 有望进一步提升卫星观测资料的利用效率, 增强灾害天气的预报能力, 减少由气象灾害引发的重大人员伤亡和经济损失。

早在 20 世纪 90 年代, 卫星辐射资料已经被引入数值模拟中, 用于改善气象预报 (Pailleux and Kelly, 1985)。且 Eyer, Anderson 等人将 TOVS 资料应用到同化系统中, 改善了数值预报结果, 并发现用变分方法直接同化辐射率资料的结果要优于间接同化方法。在卫星微波湿度资料的评估方面, Chen et al. (2015) 和 Lawrence et al. (2017) 利用 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 的资料同化系统先后对风云三号 A、B 星微波湿度计观测资料 (MWHS)、C 星 (MWHS II) 的数据质量可靠性及预报影响进行了研究。结果表明这些数据质量可靠, 同化后可改善模式的分析场。对于资料的同化影响, 研究发现 MHS 与 MWHS II 资料可以通过改善模式水汽的初始场条件, 从而改善降水的模拟和预报 (Xu et al., 2013; 张旭煜等, 2013; 米洁等, 2013; 范娇, 2019; 毛璐等, 2022; 陈旭等, 2023)。此外, Newman et al. (2015) 研究了在有限区域的集合卡曼滤波 Ensemble Kalman filter (EnKF) 数据同化系统中同化 MHS 的影响, 他们认为对中层水分有较大的改善。蒋璐西等 (2019) 直接同化了风云三号 B 星和 C 星的微波湿度计观测资料, 对 2018 年 7 月一次四川盆地区域性暴雨过程进行了模拟对比试验, 试验结果验证了同化风云三号系列卫星的微

波湿度计观测资料对四川盆地暴雨数值预报有改进。束艾青等（2022）直接同化了 FY-3D 卫星晴空
MWHS II 辐射率资料，探究其对台风“米娜”预报的影响，结果表明直接同化实验能够改进
500hPa 环流形势的模拟，最终减小了台风路径预报的误差。

目前基于 FY-3D 微波湿度计的直接同化技术，对于极端降水个例的研究较少，特别是缺乏对同
化效果的深入分析，以期揭示直接同化的效果及原因，因和实现推广的业务应用。本文选取 2023
年北京极端降水的暴雨个例，基于三维变分同化系统 WRFDA，直接同化了 MWHS II 微波湿度资
料，进行了对流可分辨尺度的数值模拟，分析和探讨了 FY-3D 微波湿度计的同化效果和成因。

2 个例介绍及天气形势分析

2.1 个例介绍

2023 年 7 月 29 日起，受台风“杜苏芮”残余环流与副热带高压、台风“卡努”水汽输送、地
形综合作用等影响，中国北京市及周边地区出现灾害性特大暴雨天气。遭遇极端暴雨期间，全市平
均降雨量达 331 毫米，门头沟区 538.1 毫米，房山区 598.7 毫米。昌平王家园水库记录了最大降雨
量 744.8 毫米，创北京有仪器测量以来最高的降雨纪录。由于此次暴雨时间极长、累积量极大、强
降水区域重叠度极高，引发了严重自然灾害，在北京房山等地出现了山洪泥石流，造成了 33 人死
亡，18 人失踪，以及严重的经济损失。

2.2 天气形势分析

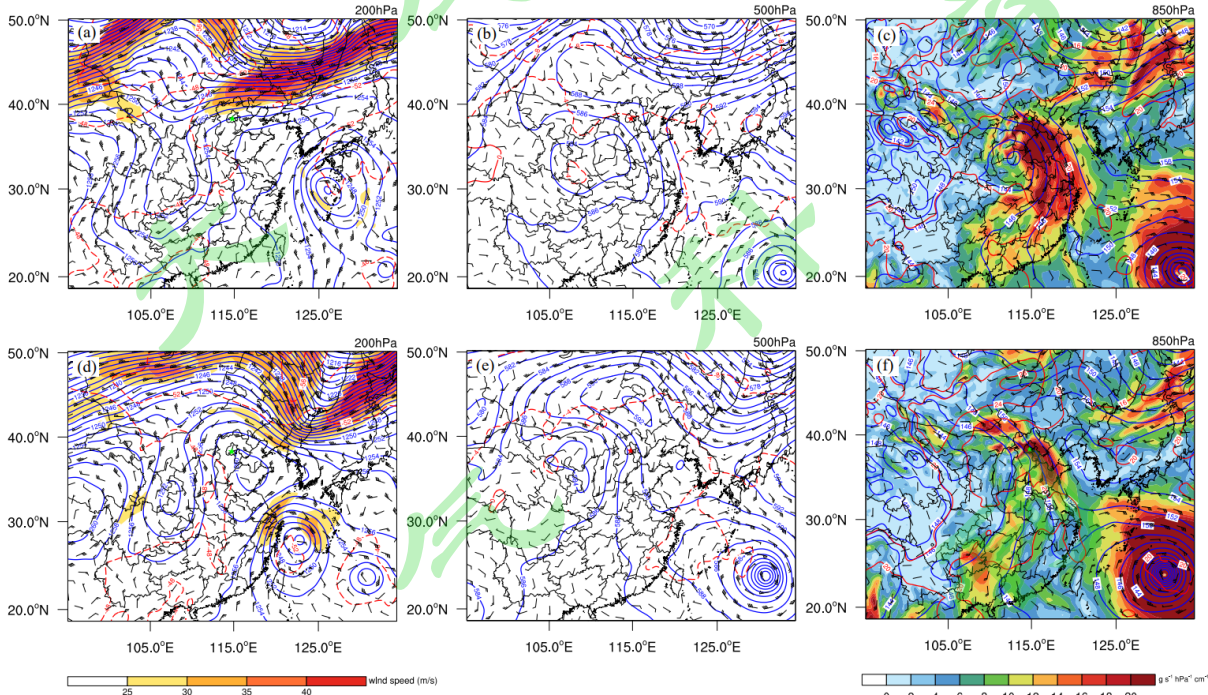


图 1 2023 年 7 月 30 日（第一行）和 31 日（第二行）00 时的天气形势图。（a、d）200hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：dagpm）、温度（红色等值线，单位：℃）以及高空急流（填色，单位： m s^{-1} ）；（b、e）500hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：dagpm）和温度（红色等值线，单位：℃）；（c、f）850hPa 位势高度（蓝色等值线，单位：dagpm）、温度（红色等值线，单位：℃）和水汽通量（填色，单位： $\text{g s}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{cm}^{-1}$ ）。五角星代表北京的位置。

Fig. 1 Weather charts at 00:00 on July 30 (first row) and July 31 (second row), 2023. (a, d) 200 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm), temperature (red contours, unit: $^{\circ}\text{C}$), and upper-level jet stream (shaded, unit: m s^{-1}); (b, e) 500 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm) and temperature (red contours, unit: $^{\circ}\text{C}$); (c, f) 850 hPa geopotential height (blue contours, unit: dagpm), temperature (red contours, unit: $^{\circ}\text{C}$), and water vapor flux (shaded, unit: $\text{g s}^{-1} \text{hPa}^{-1} \text{cm}^{-1}$). The star represents the location of Beijing.

93 由 30 日 00 时（世界时，下同）500Pa 的天气形势图可以看出，台风“杜苏芮”登陆后，残涡
94 已经移动至河南、山西一带，台风“卡努”位于 130°E 的洋面上。北方的蒙古高压与副高打通，形
95 成高压坝，阻挡台风继续北进。由 850hPa 的天气形势可以看出，华北一带水汽主要有两个来源，
96 一方面是来自南海水汽沿副高向北输送，另一方面是来自台风“卡努”的水汽，向西北方向输送。
97 由于华北一带的天气形势较为稳定，所以两个水汽通道能够源源不断的为华北平原输送水汽。稳定
98 少动的台风倒槽以及山脉的抬升作用，为此次暴雨提供良好的上升运动条件，另一方面，在
99 200hPa 上，高空急流位于华北平原的北部，华北平原上空有较好的辐散条件，利于上升运动的维
100 持。31 日 00 时，台风“杜苏芮”的残涡向西北移动至陕西一带，但是北京地区仍在台风倒槽的控
101 制之下。此时，台风“卡努”也向西北方向移动，逐渐靠近我国，由于“卡努”的环流较大，推进
102 其北部的高压系统向西侵入我国。此时华北平原一带北高南低，西低东高的天气形势更为明显，产
103 生了更强的气压梯度。由于台风“卡努”西北移动，其向华北平原的水汽输送也更为明显，来自南
104 海向北输送的水汽量有所减少。水汽通量矢量与太行山脉几乎正交，有利于降水量的增加。在
105 200hPa 上。华北平原上空维持一反气旋，其北部仍存在高空急流，此时边界层东南风急流核向北
106 京地区推进（图略），高低空急流耦合的天气形势更利于暴雨的维持。总体来说，此次暴雨过程是
107 由于北方高压坝，台风“杜苏芮”残涡，台风“卡努”等系统形成了稳定的天气形势，以及持续稳
108 定的水汽输送和地形的共同作用导致的极端降水。

109 3 试验设计

110 3.1 资料介绍

111 FY-3D 微波湿度计二型（MWHS II）是一种具有多频段和多通道的微波探测仪器。它包含四个
112 探测频段和十五个探测通道，详见表 1。MWHS II 通过测量大气中不同频段微波辐射的强度，来反
113 演大气温度和水汽含量等物理量。它可以提供高垂直分辨率的大气温度和湿度剖面，覆盖从地表到
114 平流层顶的多个高度层次。这些观测数据对于理解大气运动和研究天气系统的演变具有重要意义。
115 MWHS II 的探测资料在数值天气预报中扮演着关键的角色，它能够及时准确地提供大气湿度和温
116 度的初始场信息。这些信息对于预报台风、暴雨等灾害性天气具有重要意义（洗智鹏, 2019; 符梓霖
117 等, 2024）。FY-3D 微波湿度计是中国气象卫星系统中的重要观测仪器，为全球气象、气候和环境研
118 究提供了重要的数据支持，对于提高气象服务水平和应对气候变化具有重要意义。表 1 是 FY-3D
119 MWHS II 通道特征参数（Xian et al., 2019）。

120 表 1 MWHS II 通道特征参数

121 Table 1 MWHS II channel characteristic parameters

通道	中心频率（GHz）	权重函数峰值高度（hPa）	带宽（MHz）	定标精度（K）	应用
1	89.0	地面	1500	1.3	背景微波辐射探测、降水探测
2	118.75±0.08	20	20	2.0	
3	118.75±0.2	60	100	2.0	
4	118.75±0.3	100	165	2.0	大气温度和降水参数垂直结构探测
5	118.75±0.8	250	200	2.0	
6	118.75±1.1	300	200	2.0	
7	118.75±2.5	700	200	2.0	
8	118.75±3.0	地面	1000	2.0	背景微波辐射探测、降水检测
9	118.75±5.0	地面	2000	2.0	
10	150.0	地面	1500	1.3	

11	183.31 ± 1	350	500	1.3	大气湿度垂直结构探测
12	183.31 ± 1.8	400	700	1.3	
13	183.31 ± 3	500	1000	1.3	
14	183.31 ± 4.5	550	2000	1.3	
15	183.31 ± 7	650	2000	1.3	

3.2 卫星数据质量控制

在卫星探测中存在各种误差，包括仪器精度、大气遮挡、观测干扰等因素，这些误差可能会对模式的初值产生影响，从而影响预报的精准度。因此在利用卫星资料进行同化实验时，需要对其进行质量控制，以最大程度减少误差的影响。本实验对 FY-3D MWHS II 资料的质量控制主要包括云检测、极值检测、地表类型检测、临边检测、海拔检测、残差检测等步骤（Bormann et al., 2013; Juan et al., 2016）。从目标函数的极小化过程可以看出质控效果，同化系统中目标函数的最小化迭代次数设置为 200 次，最小化收敛准则 $\text{eps}=0.001$ ，目标函数 J 及梯度迭代下降过程的质控前后情况如图 2 所示。

第一列是质控前的，第二列是质控后的。由结果图可以看出，质控前后的卫星数据在试验中均有较好的收敛效果，都对同化起到了积极作用；在质控前，目标函数的值明显较大，而在经过质控后，目标函数值显著降低。这是因为质控前存在一些低质量的观测数据，它们可能受到误差或异常值的影响，导致目标函数值的增大。经过质控后，这些异常值被排除，使得目标函数的值更接近于真实情况。

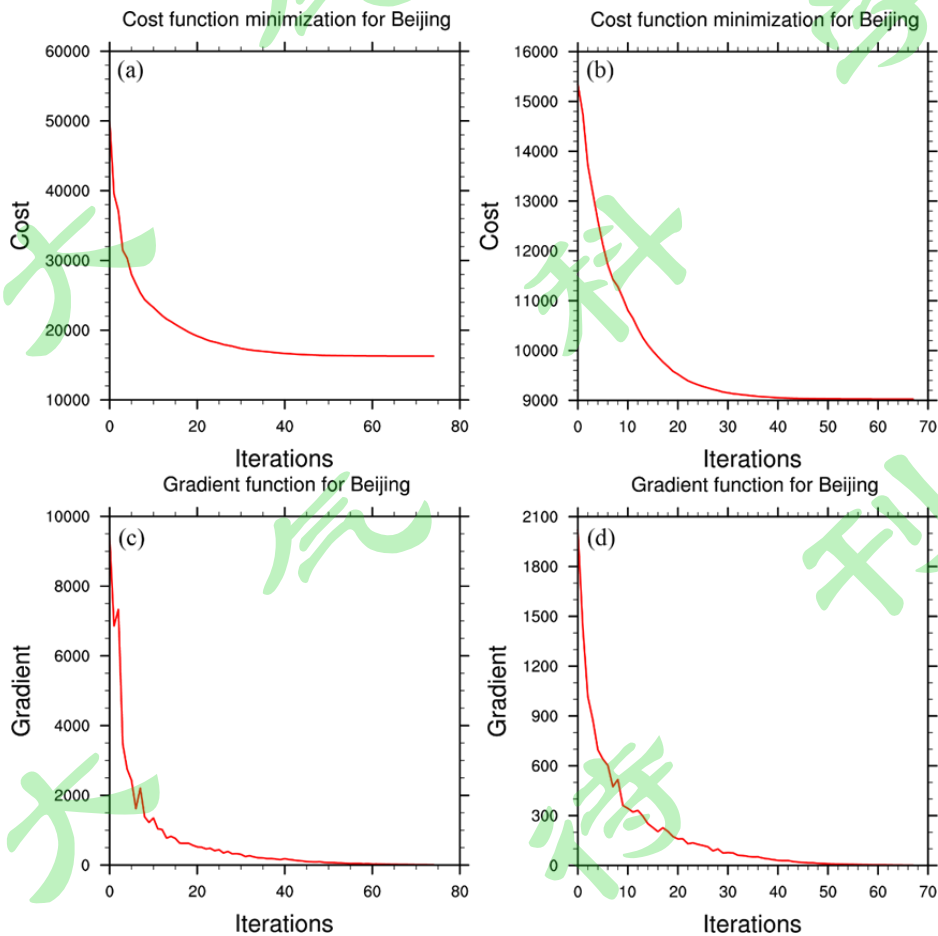


图 2 质控前 (a、c) 及质控后 (b、d) 的目标函数 J 及其梯度迭代下降过程图

Fig. 2 The objective function J and its gradient iterative descent process diagram before (a, c) and after (b, d) quality control.

在质控前，目标函数梯度下降呈现出较大的震荡，而在质控后，梯度下降过程更为平稳。这表明在质控前存在着一些不一致或异常的数据，导致目标函数的梯度方向发生不稳定变化。经过质控后，这些异常数据被剔除，使得目标函数的梯度下降过程更为稳定和可靠。因此质控处理可以减少目标函数的震荡，从而降低了目标函数极小化过程的不稳定性，进而提高了收敛速度。

3.3 数值试验设计

在北京 7·31 暴雨模拟中，我们采用了欧洲中期天气预报中心（ECMWF）再分析资料作为预报的初始和边界场，模拟时间为 2023 年 7 月 29 日 06 时；同化采用 WRFDA 系统，同化时间窗为 2023 年 7 月 29 日 03 时至 09 时。通过同化和不同化的对比实验分析，探讨了星载微波辐射计对暴雨模拟的影响。

基于 WRF 模式的参数配置如表 2 所示，模拟区域覆盖了以北京、河北为中心的北方、华中地区（25°N~50°N、105°E~130°E）。为了充分吸收卫星微波辐射计的信息，我们采用了模式采用双层嵌套方案，水平格距分别为 9km，3km，时间积分步均为 60s。

表 2 WRF 模式中的物理过程参数化方案

Table 2 Parameterization scheme for physical processes in WRF mode.

物理过程	选择方案
微物理过程	WDM 6-class 方案
短波辐射过程	Dudhia 方案
长波辐射过程	RRTM 方案
地表过程	修正的 MM5 Monin-Obukhov 方案
陆面过程	Noah 路面过程模式
行星边界层方案	YSU 方案

本次同化实验采用了直接同化方法，时间窗口设置为 6 小时，即将 2023 年 7 月 29 日 06 时前后各 3 小时的观测数据纳入同化窗口进行同化实验。实验旨在分析直接同化对结果的具体影响，为了进行对比分析，设置了两组实验，分别为同化和未同化。实验的名称和设置详见表 3。

表 3 实验名称和设置

Table 3 Experiment name and settings.

实验序号	实验名称	同化资料	模式预报时长
1	部分同化	常规观测	66h
2	同化	常规观测+ MWHS II	66h

4 模拟及同化效果分析

4.1 降水对比分析

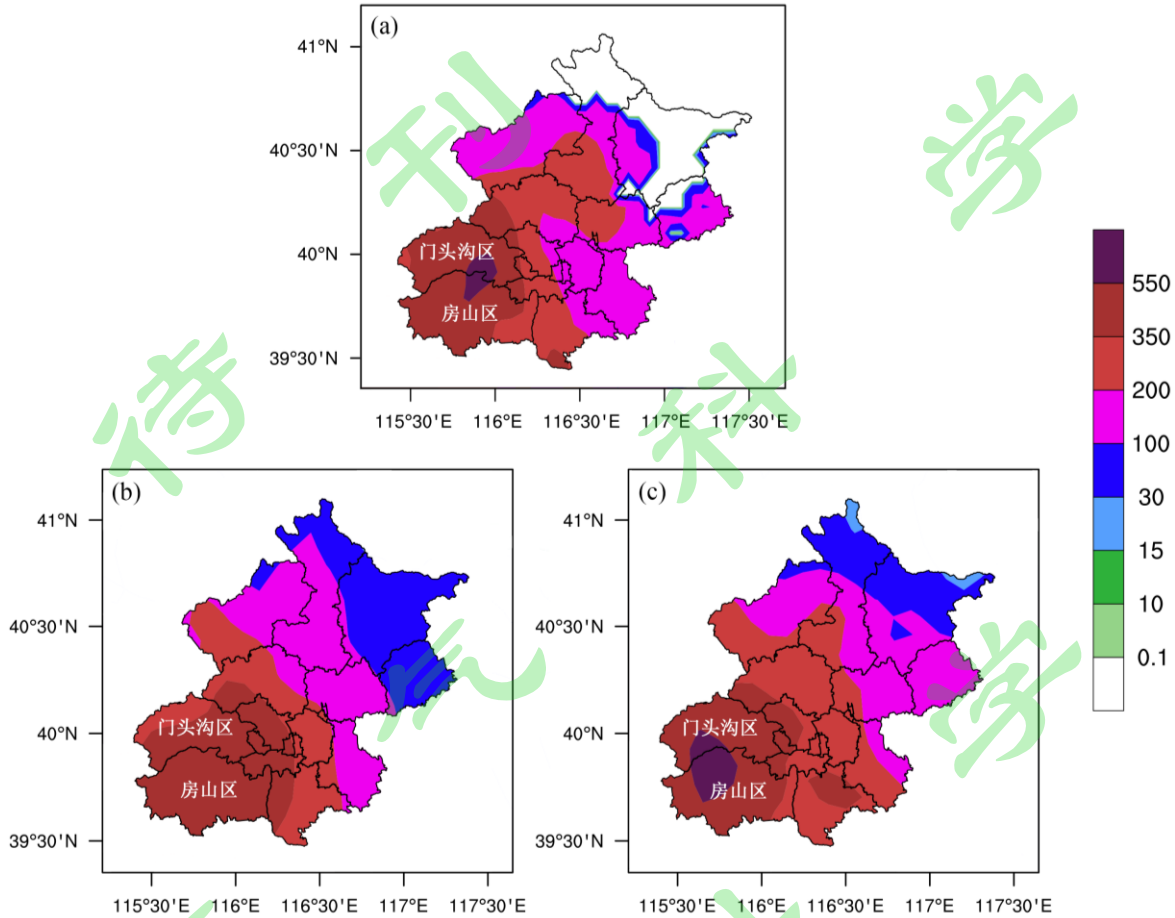


图 3 2023 年 7 月 31 日 12 时的 48h 累计降水图（单位：mm）。分别为（a）实测降水量、（b）未同化模拟结果和（c）同化后模拟结果。

Fig. 3 48 hour cumulative precipitation map at 12:00 on July 31, 2023 (unit: mm). They are (a) measured precipitation, (b) simulated results without assimilation, and (c) simulated results after assimilation.

图 3 中展示了 2023 年 7 月 29 日 12 时至 7 月 31 日 12 时，北京地区 48 小时累计降水量的观测数据及数值模拟对比结果（单位：mm）。从实测数据（图 a）中可以看到，北京门头沟区与房山区交界处的累计降水量超过了 550 毫米，显示出极端降水事件的影响。而同化前的模拟结果（图 b）虽然大体上能够反映出降水的空间分布，但并没有模拟出实测中超过 550 毫米的降水中心。经过数据同化后的模拟结果（图 c）则明显更为接近实测情况。模拟不仅成功捕捉到了超过 550 毫米的降水中心，且对北京其他地区的降水分布也有了更好的表现。不过，降水中心的位置在模拟中稍微偏西，且范围比实际情况略大。这表明虽然同化后的结果在整体上显著改善了降水模拟的准确性，但在局部细节上仍有一定的误差。

通过对比，可以看出资料同化对模拟精度的提升作用非常明显，在模拟极端降水事件时，FY-3D 卫星资料同化能够有效增强数值预报模型的表现，不仅成功捕捉到了极端降水事件，还更好地反映了整体降水分布。这种改进对于精确预报和及时应对极端天气事件具有重要意义。

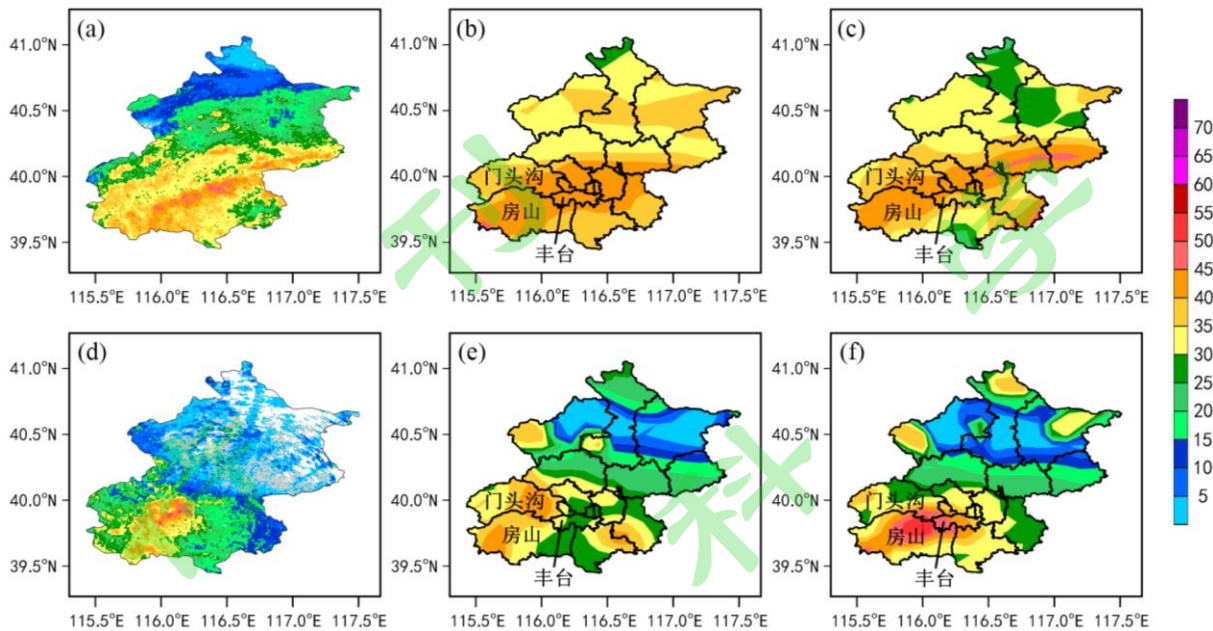


图 4 (a、d) 观测、(b、e) 未同化和 (c、f) 同化后北京地区的雷达组合反射率 (单位: dBZ), 观测时间为 2023 年 7 月 29 日 12 时 (第一行) 和 2023 年 7 月 30 日 07 时 (第二行)。

Fig. 4 The radar combination reflectance (unit: dBZ) of (a, d) observation, (b, e) non assimilation, and (c, f) assimilation in the Beijing area was observed at 12:00 on July 29, 2023 (first row) and 7:00 on July 30, 2023 (second row).

雷达回波强度与降水的强弱密切相关, 为了进一步验证卫星资料同化对极端降水过程的正向作用, 本文选取了 2023 年 7 月 29 日 12 时 (图 a、b、c) 以及 2023 年 7 月 30 日 07 时 06 (图 d、e、f) 两个时刻的雷达回波进行对比, 这两个时刻分别对应强降水的第一阶段和第二阶段。在 2023 年 7 月 29 日 12 时, 回波带主要分布于北京的中部和南部, 还未受到地形的抬升作用影响, 测数据呈现出一条东北-西南走向的条形回波。在模拟结果中, 未同化和同化后的实验都模拟出了这一条形回波, 但同化后最大回波区域的位置和强度均得到了更好地还原, 尤其是在北京中部和东北部区域。此外, 北京北部的回波模拟同样在同化后得到了显著改善。类似地, 在 2023 年 7 月 30 日 07 时的结果也体现了同化的积极作用, 观测数据显示强回波区域集中在房山、门头沟和丰台区的交界处, 最大组合反射率达到 55dBz。而同化前的模拟结果未能准确捕捉这一特征, 回波强度普遍偏弱且分布不够准确。然而, 经过数据同化后, 模拟结果明显改善, 不仅在西南部出现了更强的回波区域, 整体分布也更接近观测。

雷达回波的对比充分说明了模拟过程中, FY-3D 卫星微波湿度计同化对提高模式捕捉强对流强度及位置准确率的重要作用, 这种正向作用能够反映在降水量上, 表现为提高了降水量以及落区模拟的准确性。

5 同化改进机制

5.1 背景物理量场分析

与雷达等高精度但覆盖范围有限的观测手段相比, 卫星数据在气象观测中的优势主要表现在广域覆盖和高时空可获得性, 这使其能够有效捕捉并影响到模式场的天气尺度系统, 为极端暴雨事件的形成提供关键的大尺度背景信息。天气尺度系统虽然不是直接造成极端暴雨的天气系统, 制约着

造成暴雨的中尺度天气系统的活动，为产生暴雨的中尺度系统提供条件和环境场，并决定着暴雨的水汽条件，以及不稳定条件等。本文旨在验证 FY-3D 微波湿度计数据同化对极端暴雨预报的改进效果。通过对相对湿度、温度和气压这些关键背景场物理量的变化的分析，可以系统评估 FY-3D 数据同化对模式初始场的改进，从而揭示其在提高极端暴雨预报能力中的具体贡献机制。

5.1.1 相对湿度增量场

图 5（a、b）展示了 2023 年 7 月 29 日 06 时 500hPa 和 700hPa 高度层同化前后的相对湿度增量场。在经过风云卫星资料的同化后北京地区、河北东部区域以及东南方向的渤海黄海区域呈现出明显的湿度正增量，尤其是在海洋区域。这是因为海上的数据质量较好，质控后被剔除的较少，而陆地上被剔除的数据更多，导致陆地上的有效数据大大减少。而许多与海洋有关的系统如台风、副热带高压、季风等正是造成陆地极端天气事件的主要原因。这体现了卫星数据同化的优势，即可以弥补海上资料缺失的不足。根据这次北京极端暴雨的形成条件分析，7 月 29 日 06 时台风“杜苏芮”残余环流位于京津冀地区的北侧和东北侧，并且正在向北方移动，与湿度增量图中北京南侧湿度正增量的情况相符。所以，同化后我国湿度正增量的区域，正好对应了此次降水的重要水汽通道，体现了卫星数据同化在极端暴雨水汽供应方面的贡献。

图 5（c、d）是同化实验前后 WRF 数值模式预报在 7 月 29 日 18 时 500hPa 和 700hPa 的相对湿度增量图，从 700hPa 高度层的图中可以明显看出山脉对的水汽的阻隔，且北京东侧和东南侧水汽含量也在增加，证明了同化后的天气条件更加有利于极端降水的形成。虽然在初始时刻 06 时的 500hPa 相对湿度增量效果明显，但是在数值预报中该高度层几乎没有变化，说明在此次台风引起的极端降水案例中高层水汽不是主要影响因素，大气中低层的水汽的大量聚集才是降水形成的主要因素。另一方面，即使在卫星数据同化进入模式系统 12 小时后，其对此暴雨过程中水汽输送的正面影响仍然显著。这一现象突出了卫星数据同化效果的持续性，反映了同化过程对模式初始场的深层调整。值得注意的是，水汽增量主要集中在大气低层，而对中层的影响相对有限。这种垂直分布特征与经典暴雨水汽输送理论相符，即低层水汽输送对暴雨形成起着关键作用。这种水汽分布的变化不仅验证了模式对卫星数据的有效吸收，还表明随着模式积分的进行，同化信息能够与模式动力过程良好地融合，使得模式能够在保持自身动力平衡的同时，有效利用卫星观测信息改善水汽场的模拟。

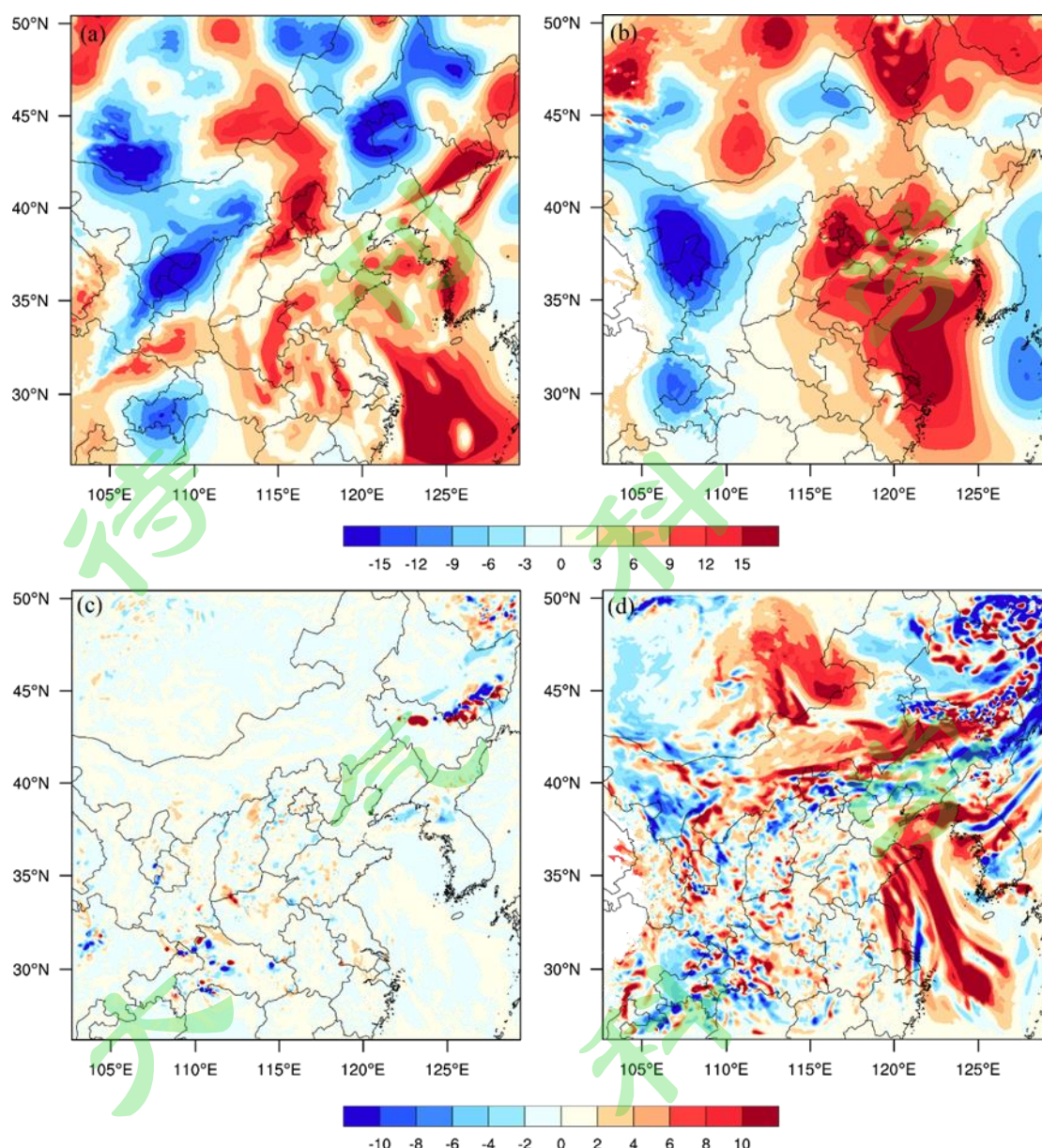


图 5 500hPa (a、c) 700hPa (b、d) 的相对湿度增量场 (单位: %), 预报时间为 2023 年 7 月 29 日 06 时 (第一行) 及 2023 年 7 月 29 日 18 时 (第二行)。

Fig. 5 The relative humidity increment field at 500hPa (a, c) and 700hPa (b, d) (unit: %), with forecast times of 06:00 on July 29, 2023 (first row) and 18:00 on July 29, 2023 (second row).

5.1.2 温度增量场

图 6 呈现了 2023 年 7 月 29 日 06 时 500hPa 和 700hPa 高度层同化前后的温度增量场分布。分析结果显示, 温度增量场在大尺度上呈现明显的东西差异。具体而言, 沿内蒙古、山西、陕西至重庆的西北地区出现显著的正温度增量, 而负温度增量主要集中在东北区域, 同时我国东部沿海地区也观察到一定程度的负增量。值得注意的是, 相比 700hPa 层, 500hPa 高度层的温度增量无论在空间范围还是数值大小上都更为显著。这种垂直分布特征主要是由于微波湿度计对温度的敏感性随高度增加而增强, 其中高层通道对温度的探测能力更强, 因此对中高层温度场的调整作用更为明显。尽管不同高度层的温度增量存在差异, 但整体变化趋势仍保持相对一致, 这反映了同化过程对整个大气温度场影响的协调性。这种温度场的调整对天气系统的演变具有重要影响。对于华北以北地区,

东西向温度梯度的增加强化了南向热成风，有利于北方干冷空气与南部湿润气流的交汇，为极端暴雨的初始阶段——华北平原大范围降水的形成创造了有利条件。就北京地区而言，其西北部温度的增加与南部温度的减少导致南北温度梯度增大。这种温度场配置有利于台风“杜苏芮”残余环流在京津冀地区西南侧被东风引导，并与太行山脉相遇，为后续极端降水的发生提供了有利的热力和动力条件。

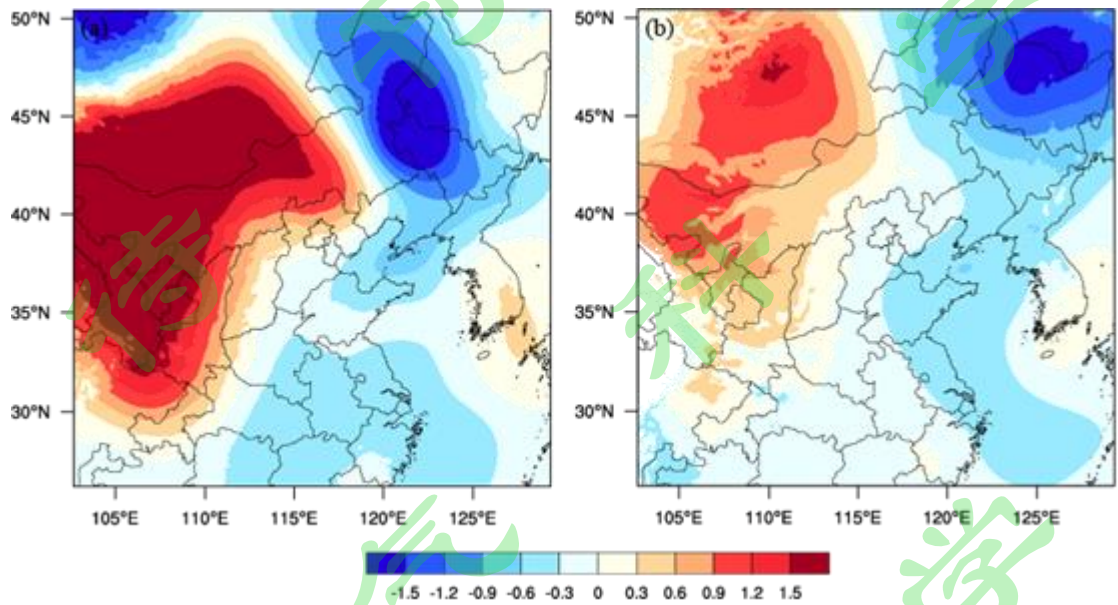


图 6 2023 年 7 月 29 日 06 时 500hPa (a) 和 700hPa (b) 的温度增量场 (单位: K)

Fig. 6 Temperature increment field at 500hPa (a) and 700hPa (b) on July 29, 2023 at 06:00 (unit: K).

5.1.3 气压增量场

下图为 2023 年 7 月 29 日 06 时 500hPa、700hPa 高度层同化前后的气压增量场。

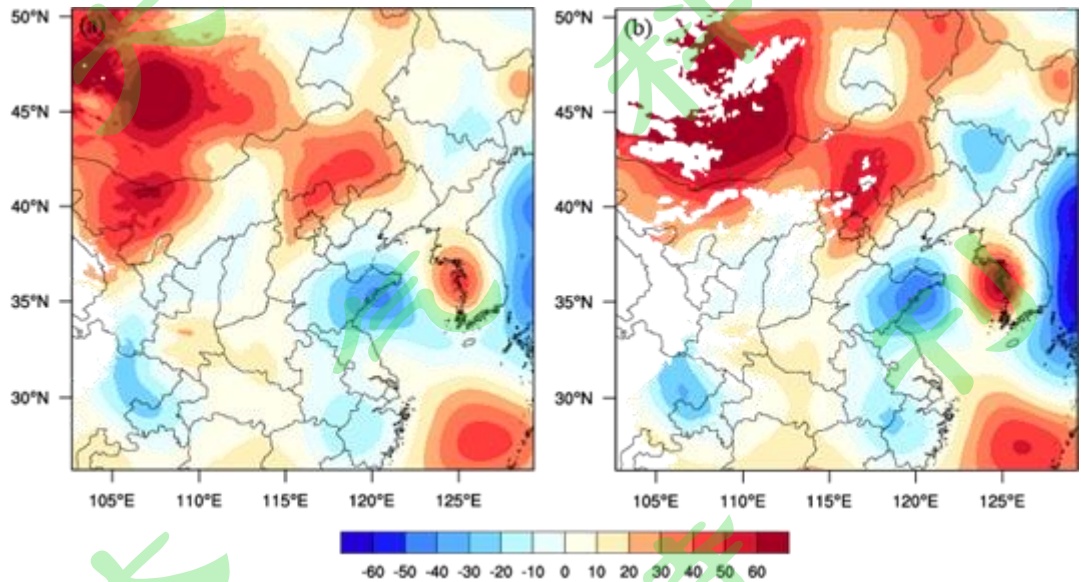


图 7 2023 年 7 月 29 日 06 时 700hPa (a) 和 850hPa (b) 的气压增量场 (单位: Pa)

Fig. 7 Atmospheric pressure increment field at 700hPa (a) and 850hPa (b) on July 29, 2023 at 06:00 (unit: Pa).

根据 2023 年 7 月 29 日的天气形势显示 (图略)，副热带高压已向北推进至山东以东海域，同时华北以北及西北部的高压脊正在东移。这两个高压系统的演变趋势预示着它们将在短期内在华北北部汇合，形成一个高压脊。这种大尺度环流配置将显著影响台风“杜苏芮”残余环流的运动，可

能导致其向北移动速度减缓，并在华北至黄淮一带滞留较长时间。通过同化卫星资料后的分析表明，北京北侧出现明显的正气压增量。这一变化强化了华北北部高压脊的形成趋势，进一步制约了“杜苏芮”残余环流的北向移动。在这种情况下，携带大量水汽的环流系统可能会在京津冀地区停滞，导致水汽的持续积累，为长时间强降水事件的发生创造有利条件。

图 7 的分析结果表明，东海地区呈现显著的正气压增量，而山东沿海地区则出现明显的负增量。这种气压梯度的增强将加大副热带高压引起的东南气流，有利于加强来自西太平洋台风“卡努”附近的水汽向北京地区的输送，加速了北京上空水汽的聚集过程，为极端降水的形成提供了充足的水汽来源。此外，北京地区 700hPa 和 850hPa 层面上南北气压梯度的增大，加强了该区域的东风分量。同时，同化后温度梯度的增加导致热成风增强，这两个因素共同作用，有利于将京津冀地区西南侧的“杜苏芮”残余环流引导至该区域。

综合相对湿度、温度场和气压场的增量分析，可以看出同化后的初始场更有利于水汽的辐合和积累。这种协同效应显著提高了该地区发生极端降水的可能性，充分体现了数据同化对大尺度物理量场的协调改进作用。

5.2 极端暴雨对流系统分析

前文分析表明，卫星资料同化显著改善了此次极端暴雨过程的大尺度天气背景场，优化了水汽辐合和积累的环境条件，体现了 FY-3D 直接数据同化对多个物理量场的协调改进。然而，大尺度系统虽为暴雨提供必要条件，却非直接因素。为深入理解同化对极端暴雨模拟的改进机制，还需进一步分析同化对降水对流系统的影响机制。本文将以北北京区域的对流系统的热力、动力以及对流降水的微物理变化为切入点，通过分析大气位温、垂直速度、水凝物含量等关键要素，构建从大尺度环境到微观降水过程的完整影响链。

5.2.1 热力场分析

相对湿度和位温的对比表明，两组试验的大气结构均呈现出有利于强降水发生的特征，中低层高达 90% 以上的相对湿度为水汽凝结和降水形成提供了充足的水分来源。同时，在中低层存在一个明显的逆温层，导致位温随高度增加而减少，形成了显著的大气不稳定结构。这种热力配置与高相对湿度相结合，为强对流的发展和持续性降水创造了理想条件。本次同化仅针对初始场进行，其影响在模拟开始后的前 12 小时内最为显著，表现为中低层相对湿度和位温的明显增加。这种增加不仅强化了大气的的不稳定度，还为降水过程提供了更多可用水汽。然而，从 31 日 18 时左右开始，同化后的相对湿度和位温演变呈现出一种先偏低后偏高的特征，这可能是由于这段时间的强降水发生更为延后导致的。

进一步分析显示，在同化试验的前 36 小时内，相对湿度的垂直分布发生了显著变化，主要表现为低层湿度增加而中层湿度减少。这种垂直分布的调整不仅增加了近地面层的水汽供应，更重要的是加剧了大气的垂直不稳定度，为强对流的触发和发展提供了更有利的环境。同时，同化试验存在中低层位温增加现象，很可能是由于降水过程中水汽凝结释放潜热导致的。从 30 日 06 时左右开始，同化后的位温垂直梯度增加，增强了大气的的不稳定性，为持续性强降水的形成和维持创造了更为有利的热力学条件。综上所述，卫星数据同化通过调整大气的热力和动力结构，显著增强了大气的的不稳定度和水汽供应，从而为极端降水事件的发生和发展提供了更为有利的环境条件。

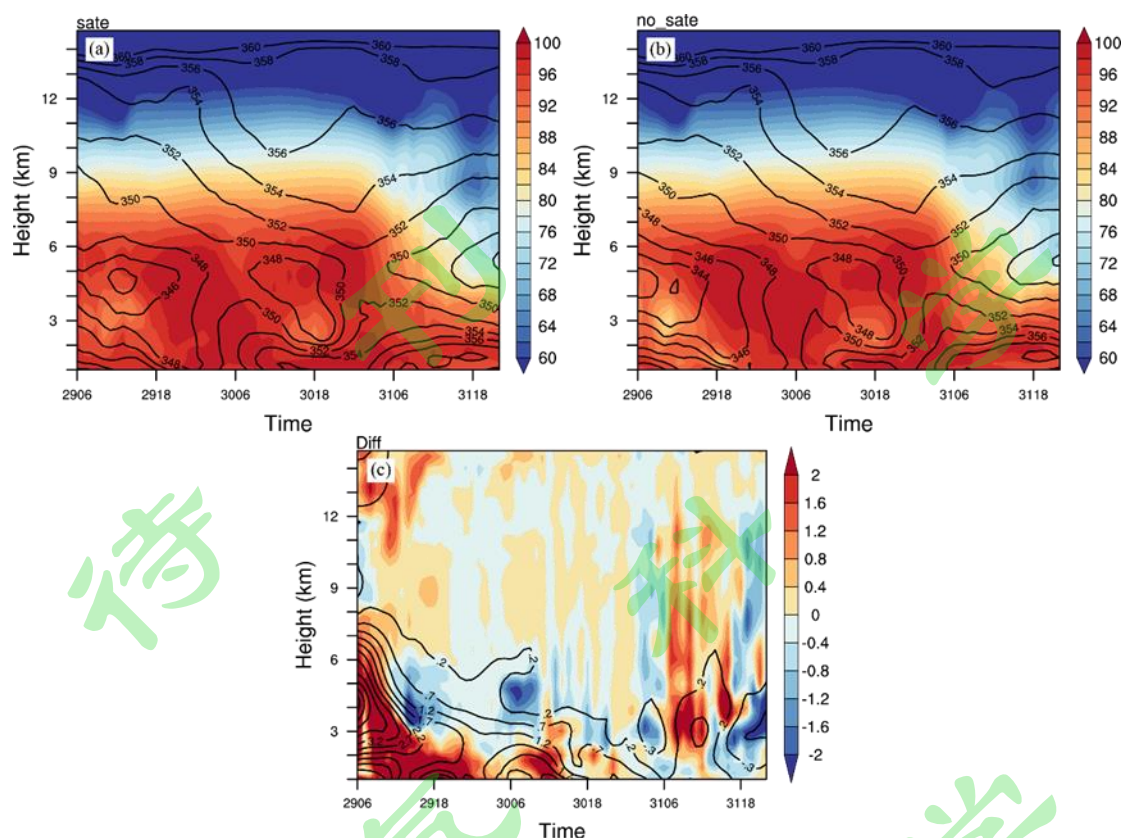


图 8 北京地区同化 (a)、未同化 (b) 和同化后增量 (c) 的相对湿度 (填色, 单位: %) 和位温 (等值线, 单位: K) 时间—高度剖面图, 时间为 2023 年 7 月 29 日 06 时至 2023 年 7 月 31 日 18 时。

Fig. 8 Time height profiles of relative humidity (colored, unit: %) and potential temperature (contour line, unit: K) for assimilation (a), non assimilation (b), and assimilation increment (c) in the Beijing area, from 06:00 on July 29, 2023 to 18:00 on July 31, 2023.

5.2.2 动力场分析

在对大气热力结构和水汽分布的深入分析基础上, 本文进一步探讨了卫星数据同化对大气动力学特征的影响, 主要分析垂直速度和相对涡度场的变化, 见图 9。本文主要关注降水的前四个阶段, 每个阶段都呈现出独特的垂直运动特征和相应的同化效应。降水初期, 即北京时间 7 月 29 日下午华北地区降水开始时, 高层垂直速度较强而低层较弱的特征, 表明此阶段降水主要呈现层状性质。同化过程显著增强了中高层的垂直速度, 不仅强化了层状云系统, 还为随后的强对流发展奠定了动力学基础。降水的第二阶段, 京津冀东部出现了明显的对流性降水, 垂直速度高值区从近地面延伸至 10km 高度。这一阶段同化的影响主要体现在增强中低层垂直速度上, 虽然增幅不及第一阶段显著, 但与前文提到的低层水汽增加和不稳定度增强相结合, 有效促进了对流系统的快速发展。这个阶段低层正相对涡度的明显增加, 与垂直速度的增强呈现出良好的对应关系, 揭示了涡度场调整对对流增强的动力学贡献。降水强度在第三阶段达到顶峰, 又在第四阶段增强。这个阶段, 大气柱从低层到高层均维持较大的垂直速度, 在 9km 左右出现最大值, 说明了台风残涡对降水增强的显著贡献。在这一阶段, 同化前后高层垂直速度的差异较小, 但对中低层垂直速度的增强作用依然存在。从整体来说, 在强降水期间, 两组试验呈现出高层负涡度、低层正涡度的典型结构, 这种垂直分布利于大尺度上升运动的形成和维持。同化过程通过增强这种涡度结构, 特别是在降水初期显著增强了中高层的负涡度和低层的正涡度, 增强了对流的强度。这种相对涡度的分布变化, 很可能是同化后前期对流增强的动力学机制, 与前文讨论的热力不稳定性增加和水汽供应增强形成了协同

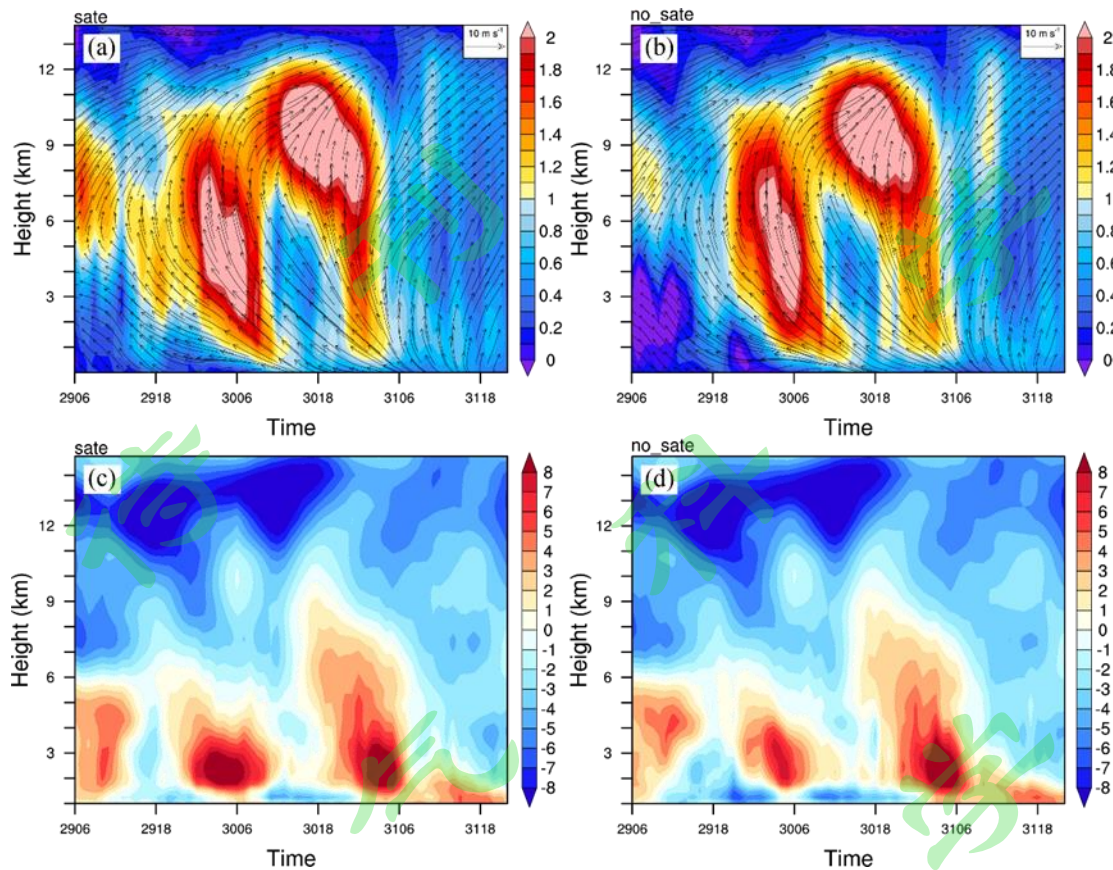


图9北京地区的同化（第一列）和未同化（第二列）的（a、b）垂直速度（填色，单位： m s^{-1} ）和水平风场（箭头）以及（c、d）垂直涡度（单位： 10^{-3} s^{-1} ）的时间—高度剖面图。时间为2023年7月29日06时至2023年7月31日18时。

Fig. 9 Time height profiles of (a, b) vertical velocity (colored, unit: m s^{-1}) and horizontal wind field (arrow) as well as (c, d) vertical vorticity (unit: 10^{-3} s^{-1}) for assimilation (first column) and non assimilation (second column) in the Beijing area. The time is from 06:00 on July 29, 2023 to 18:00 on July 31, 2023.

5.2.3 微物理过程分析

在对大气热力和动力特征进行全面分析的基础上，本文进一步探讨了卫星数据同化对微物理过程的影响，以更全面地理解同化如何影响极端降水事件的形成和演变，见图 10。微物理过程作为连接大尺度动力热力环境与最终降水形成的关键环节，其变化直接反映了同化对降水机制的调控作用。研究发现，雨水含量的垂直分布与前文讨论的垂直速度变化呈现出高度一致的对应关系，表现出了降水过程的几个关键阶段。需注意，在模拟开始后的前 36 小时内，同化对降水的影响最为显著，主要表现为第一和第二阶段雨水含量的明显增加。这一现象与前文分析的同化后垂直运动增强和水汽供应增加的结果相互印证，揭示了同化在降水初期和发展阶段的重要作用。在同化开始后的前 12 小时（即降水的第一阶段），霰和雪的含量出现显著增加，而云水和云冰的变化则相对不明显。这一现象与同化导致的中高层垂直速度增强密切相关。基于这些特征，本文推测这一时期降水量增加的主要机制是：优化后的动热力配置促进了中高层雪和霰粒子的形成和增长，这些粒子在下落过程中融化成雨水，最终导致地面降水量的增加。在降水的第二阶段，同化后的雪和霰含量继续保持高于未同化状态，这与前期观察到的趋势一致。然而，同化后低层云水含量的显著减少。这一变化可能由于同化增强了低层大气的不稳定性和垂直速度，从而促进了两个重要的微物理过程：一

是云水更有效地自动转化为雨水，二是下落的雨滴更充分地收集云水粒子并完成增长。这些过程共同导致了云水向雨水的快速转化，解释了低层云水的减少以及降水效率的提高。在模拟开始的 36 小时后，大致对应降水第二阶段结束的时间点，同化对各类水凝物含量的影响均显著减弱。这一现象说明了同化效应的时间依赖性，也与前文讨论的动力和热力场变化趋势相一致，进一步证实了同化在降水事件早期阶段的关键作用。

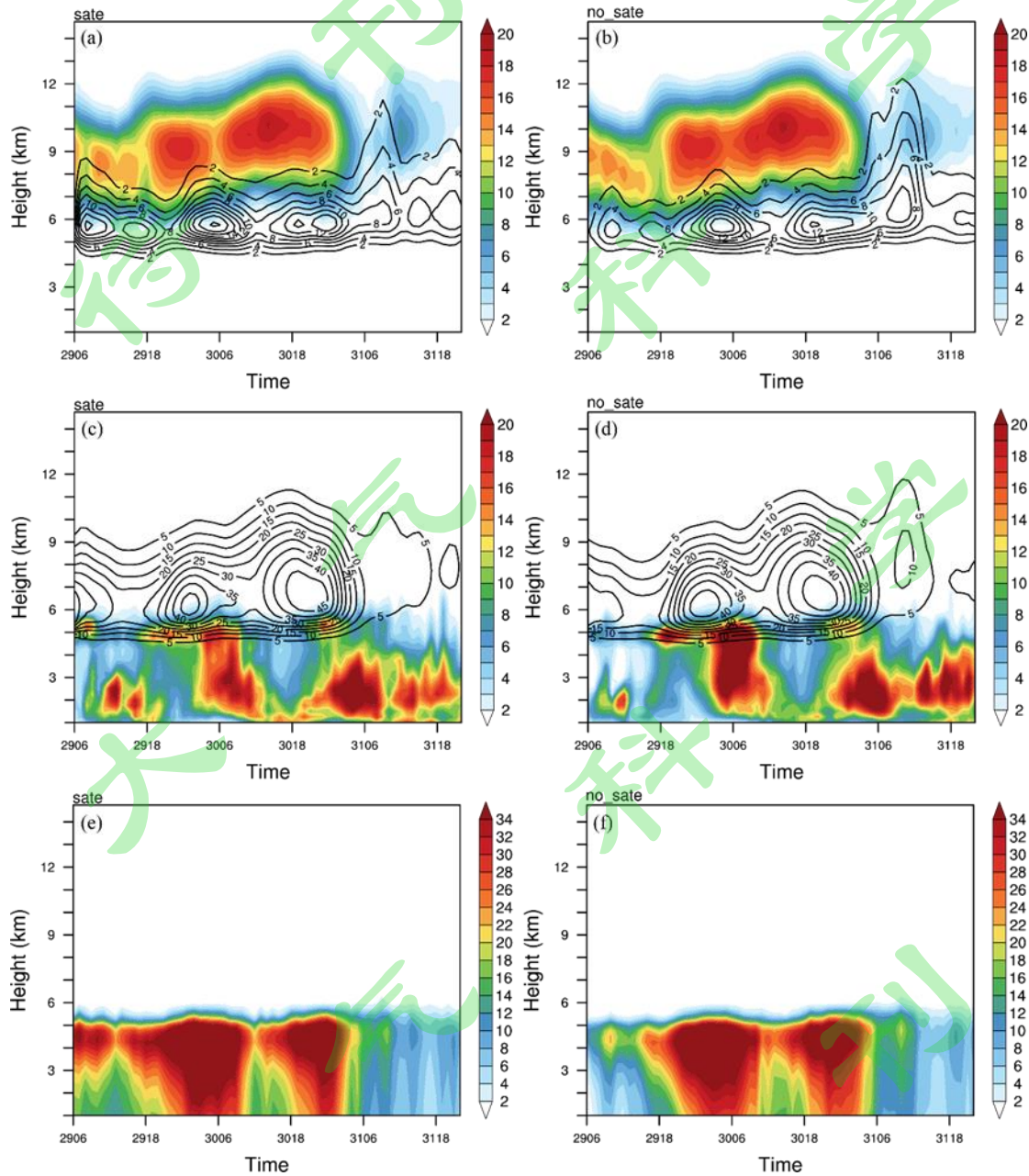


图 10 2023 年 7 月 29 日 06 时至 2023 年 7 月 31 日 18 时北京地区的同化（第一列）和未同化（第二列）的（a、b）云冰（填色）和霰（等值线）；（c、d）云水（填色）和雪（等值线）；（e、f）雨水（填色）的时间—高度剖面图。（单位： $10^{-4} \text{ kg kg}^{-1}$ ）

Fig. 10 The assimilation (first column) and non assimilation (second column) of (a, b) cloud ice (colored) and hail (contour lines) in the Beijing area from 06:00 on July 29, 2023 to 18:00 on July 31, 2023; (c, d) Cloud water (coloring) and snow (contour lines); (e, f) Time height profile of rainwater (coloring). (Unit: $10^{-4} \text{ kg kg}^{-1}$)

5.3 卫星资料同化对极端暴雨的改进机制

总结此次同化对极端暴雨的影响如下：在天气学尺度上，卫星数据同化对极端降水事件的影响主要体现在以下几个方面：首先，同化增强了北方高压坝与高纬度冷槽之间的温度梯度，导致华北

区域以北的南向热成风增强，促进了海上暖湿气流与北方干冷空气的汇聚。其次，同化加剧了北京地区的南北温差，增强了西向热成风，有利于对流系统向西移动并与太行山脉相遇，通过地形抬升作用增加降水。同时，同化也强化了气压场的南北梯度，使北方高压坝更为显著，南部气压相对降低，从而稳定了有利于降水的天气形势。在水汽输送方面，由于可用的卫星数据主要覆盖中国东部沿海区域，同化显著增强了台风向北京的水汽输送通道。这些大尺度环流和热力场的调整共同作用，为极端降水事件的发生创造了更为有利的大尺度背景。在对流及微物理尺度上，卫星数据同化通过多方面调整大气结构，显著影响了极端降水事件的发生和发展。在热力方面，同化增强了大气的垂直不稳定度，主要表现为低层相对湿度增加、中层减少，以及位温垂直梯度的增加。这些变化为强对流的触发和维持创造了有利条件。在动力方面，同化优化了涡度结构，增强了高层负涡度和低层正涡度，促进了大尺度上升运动。这些热力和动力场的调整协同作用，增强了垂直运动和水汽输送。在微物理过程中，同化促进了中高层雪和霰粒子的形成，以及低层云水向雨水的快速转化，提高了降水效率。这些影响在模拟的前 36 小时最为显著，体现了同化在降水初期和发展阶段的关键作用。

6 结论

本研究以 2023 年北京“7·31”暴雨为案例，深入探讨了 FY-3D 卫星 MWS II 微波湿度计资料直接同化对极端降水预报的影响。通过设置同化前后的对比实验，并结合 WRF 数值预报模式，我们对同化效果进行了多尺度、多要素的系统分析，得出以下主要结论：

（1）质控处理剔除了低质量的观测数据，减少目标函数的震荡，从而降低了目标函数极小化过程的不稳定性。这使得优化算法更加稳定地朝着目标函数的极小值点进行迭代，进而提高了收敛速度，提高了同化结果的可靠性

（2）MWS II 资料同化改善了极端降水的模拟效果。不仅成功捕捉到了超过 550 毫米的降水极值中心，还更准确地模拟了降水的空间分布。雷达回波的对比进一步证实了同化对强对流系统强度和位置模拟的改进。

（3）同化对大尺度环境场的协同改善为极端降水事件的发生创造了有利条件。

在温度场方面，同化增强了北方高压坝与高纬度冷槽之间的温度梯度，以及北京地区的南北温差，影响了热成风的分布；湿度场的改善主要体现在大气中低层水汽含量的增加，尤其在我国东部海域的水汽通道上更为明显；气压场南北梯度的强化则有利于维持稳定的降水天气形势。这些协同改善为极端降水事件的发生创造了有利条件

（4）对流系统的多方面增强是同化的又一显著效果。动力学角度来看，垂直运动得到加强，涡度结构更趋合理。热力学方面，大气垂直不稳定度增加，表现为低层相对湿度上升、中层降低，以及位温垂直梯度加大。微物理过程也因同化而优化，中高层雪和霰粒子形成增多，低层云水向雨水的转化加速，提高了整体降水效率。这些影响在模拟的前 36 小时内尤为显著

（5）本研究揭示了同化作用的多尺度协同效应。从大尺度环流调整，到中尺度对流系统的增强，再到微观降水过程的优化，同化的影响贯穿了多个空间尺度。这种多尺度的协同作用不仅提高了模拟的整体精度，还增强了模式捕捉极端天气事件的能力。同时，本文也注意到同化效果存在空间差异，在卫星资料充足的区域（如海洋上）效果更为显著，这为未来多源资料同化研究指明了方

向。

参考文献 (References)

- Pailleux J, Kelly G, 1985. Use of satellite data in the ECMWF analysis system[C]. ECMWF Workshop High Resolut. Anal, 15-26.
- Chen K Y, English S, Bormann N, et al, 2015. Assessment of FY-3A and FY-3B MWS observations[J]. Weather and Forecasting, 30(5):1280-1290.
- Lawrence H, Carminati F, Bell W, et al, 2017. An Evaluation of FY-3C MWRI and Assessment of the Long-Term Quality of FY-3C MWS-2 at ECMWF and the Met Office[M]. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reading, UK.
- Xu D, Liu Z, Huang X Y, et al. Impact of assimilating IASI radiance observations on forecasts of two tropical cyclones[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2013, 122(1):1-18. DOI:10.1007/s00703-013-0276-2.
- 范娇. FY-3C 微波湿度计资料在西南涡降水预报中的同化研究[D]. 成都信息工程大学, 2019. Fan Jiao Assimilation Study of FY-3C Microwave Humidity Meter Data in Southwest Vortex Precipitation Forecast [D]. Chengdu University of Information Science and Technology, 2019
- 毛璐, 谢彦辉, 刘瑞霞, 等. 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, 2022, 41(4):896-908. Mao Lu, Xie Yanhui, Liu Ruixia, etc The influence of FY-3C microwave hygrometer emissivity data assimilation on precipitation forecasting of RMAPS-ST system [J]. Plateau Meteorology, 2022, 41 (4): 896-908
- 陈旭, 王磊, 李谢辉, 等. MWS-2 和 MHS 资料同化对三江源地区暴雨模拟影响的对比研究[J]. 高原气象, 2023, 42(6):1386-1401. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00024. Chen Xu, Wang Lei, Li Xiehui, etc Comparative study on the effect of MWS-2 and MHS data assimilation on rainstorm simulation in the source area of the three rivers [J]. Plateau meteorology, 2023, 42(6):1386-1401. DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00024.
- Newman K M, Schwartz C S, Liu Z, et al. Evaluating Forecast Impact of Assimilating Microwave Humidity Sounder (MHS) Radiances with a Regional Ensemble Kalman Filter Data Assimilation System[J]. Weather & Forecasting, 2015, 30(4):964-983. DOI:10.1175/WAF-D-14-00091.1.
- 束艾青, 许冬梅, 李泓, 等. FY-3D 卫星 MWS-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, 2022, 41(5):17-28. DOI:10.11978/2021160. Shu Aiqing, Xu Dongmei, Li Hong, etc The impact of direct assimilation of MWS-2 emissivity data from FY-3D satellite on typhoon "Mina" forecast [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2022, 41(5):17-28. DOI:10.11978/2021160.
- 米洁, 朱克云, 张杰. FY-3 双星 MWS 资料对江西暴雨的循环同化试验[J]. 成都信息工程学院学报, 2014(1):7. DOI:10.3969/j.issn.1671-1742.2014.01.013. Mi Jie, Zhu Keyun, Zhang Jie Cyclic assimilation experiment of FY-3 double star MWS data on rainstorm in Jiangxi [J]. Journal of Chengdu Institute of Information Engineering, 2014(1):7. DOI:10.3969/j.issn.1671-1742.2014.01.013.
- 张旭煜, 朱克云, 张杰, 等. FY-3A 卫星 MWS 资料同化及四川盆地暴雨数值模拟分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2013, 28(3):258-266. DOI:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.03.010. Zhang Xuyu, Zhu Keyun, Zhang Jie, etc Data assimilation of FY-3A satellite MWS and numerical simulation analysis of rainstorm in Sichuan Basin [J]. Journal of Chengdu Institute of Information Engineering, 2013, 28(3):258-266. DOI:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.03.010.
- 蒋璐西, 陈科艺, 陈林琳. MWS/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, 2019, 39(4):7. DOI:CNKI:SUN:SCCX.0.2019-04-002. Jiang Luxi, Chen Keyi, Chen Linlin Research on the Application of MWS/FY-3 Data Assimilation in rainstorm Forecast in Sichuan Basin [J]. Plateau Mountainous Meteorology Research, 2019, 39(4):7. DOI:CNKI:SUN:SCCX.0.2019-04-002.
- 洗智鹏. FY-3C 微波观测资料的全天候同化技术及其在台风预报中的应用[D]. 成都信息工程大学, 2019. Xian Zhipeng The all-weather assimilation technology of FY-3C microwave observation data and its application in typhoon forecasting [D]. Chengdu University of Information Science and Technology, 2019
- 符梓霖, 王磊, 李谢辉, 等. 卫星微波湿度计资料同化对雅鲁藏布江大峡谷暴雨模拟的影响[J]. 高原气象, 2024(1). DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00099. Fu Zilin, Wang Lei, Li Xiehui, etc Effect of satellite microwave hygrometer data assimilation on rainstorm simulation in the Yarlung Zangbo River Grand Canyon [J]. Plateau Meteorology, 2024(1). DOI:10.7522/j.issn.1000-0534.2023.00099.
- Lim, K.-S. S., and S.-Y. Hong, 2010: Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuclei (CCN) for weather and climate models. Mon. Wea. Rev., 138, 1587-1612. doi:10.1175/2009MWR2968.1
- Hong, Song-You, Yign Noh, Jimmy Dudhia, 2006: A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Mon. Wea. Rev., 134, 2318-2341. doi:10.1175/MWR3199.1
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the Winter Monsoon Experiment using a mesoscale two-dimensional model. J.

Atmos. Sci., 46, 3077–3107. doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3077:NSOCOD>2.0.CO;2

Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J. Geophys. Res.*, 102, 16663–16682. doi:10.1029/97JD00237

Jimenez, Pedro A., Jimmy Dudhia, J. Fidel Gonzalez-Rouco, Jorge Navarro, Juan P. Montavez, and Elena Garcia-Bustamante, 2012: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. *Mon. Wea. Rev.*, 140, 898–918. doi:10.1175/MWR-D-11-00056.1

Wang, Z., X. Zeng, and M. Decker, 2010: Improving snow processes in the Noah land model, *J. Geophys. Res.*, 115, D20108. doi:10.1029/2009JD013761

Xian Z., Chen K., Zhu J. All-Sky Assimilation of the MWS - 2 Observations and Evaluation the Impacts on the Analyses and Forecasts of Binary Typhoons[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124. DOI:10.1029/2018JD029658.

Bormann N., Fouilloux A., Bell W. Evaluation and assimilation of ATMS data in the ECMWF system[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(23):12-12,980. DOI:10.1002/2013JD020325.

Juan, Liu, Guiqing. Direct assimilation of Chinese FY-3C Microwave Temperature Sounder-2 radiances in the global GRAPES system[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016.

吴应昂. FY-3C 卫星微波辐射资料同化应用研究[D]. 国防科学技术大学, 2005. DOI: CNKI:CDMD:2.1017.834470. Wu Yingang Research on the Application of FY-3C Satellite Microwave Radiation Data Assimilation [D]. National University of Defense Technology, 2005. DOI: CNKI:CDMD:2.1017.834470.

吴志鹏, 李跃清, 李晓岚, 等. WRF 模式边界层参数化方案对川渝盆地西南涡降水模拟的影响[J]. *大气科学*, 2021, 45(1):15. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171. Wu Zhipeng, Li Yueqing, Li Xiaolan, etc The Influence of WRF Model Boundary Layer Parameterization Scheme on Southwest Vortex Precipitation Simulation in the Sichuan Chongqing Basin [J]. *Atmospheric Science*, 2021, 45(1):15. DOI:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.19171.

衡志伟, 程晓龙. 西南涡加密资料同化对西南区域模式降水预报的影响[J]. *高原山地气象研究*, 2018, 38(2):8. DOI:10.3969/j.issn.1674-2184.2018.02.001. Heng Zhiwei, Cheng Xiaolong The Impact of Southwest Vortex Encryption Data Assimilation on Southwest Regional Model Precipitation Forecast [J]. *Research on Plateau Mountain Meteorology*, 2018, 38(2):8. DOI:10.3969/j.issn.1674-2184.2018.02.001.

官元红, 周广庆, 陆维松, 等. 资料同化方法的理论发展及应用综述[J]. *气象与减灾研究*, 2007, 30(4):8. DOI:10.3969/j.issn.1007-9033.2007.04.001. Guan Yuanhong, Zhou Guangqing, Lu Weisong, etc A Review of the Theoretical Development and Application of Data Assimilation Methods [J]. *Meteorology and Disaster Reduction Research*, 2007, 30(4):8. DOI:10.3969/j.issn.1007-9033.2007.04.001.

董佩明, 薛纪善, 黄兵, 等. 数值天气预报中卫星资料同化应用现状和发展[J]. *气象科技*, 2008, 36(1):7. DOI:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.001. Dong Peiming, Xue Jishan, Huang Bing, etc The Current Status and Development of Satellite Data Assimilation Application in Numerical Weather Forecasting [J]. *Meteorological Technology*, 2008, 36(1):7. DOI:10.3969/j.issn.1671-6345.2008.01.001.

Errico, Ronald, M, et al. NOAA-NASA-DoD Workshop on Satellite Data Assimilation. [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(10):2457-2457.

Eyre J R., Kelly G A., McNally A P., et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1993. DOI:10.1002/qj.49711951411.

E. Andersson, J., et al. Use of cloud-cleared radiances in three/four-dimensional variational data assimilation[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1994. DOI:10.1002/qj.49712051707.