

FENG Yuxuan, HE Jieying, MA Gang. Analysis of the Effect of the Fengyun-3D Satellite Microwave Humidity Sounder (MWHS-II) Data Assimilation on Typhoon "YAGI" Forecast (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(2): 364–382. CSTR:32142.14.cjss.2024-0201. DOI:10.11728/cjss2025.02.2024-0201

风云三号 D 星微波湿度计在台风“摩羯” 预报中的效果解析*

冯雨萱^{1,2} 何杰颖^{1,2} 马刚³

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(中国气象局地球系统数值预报中心 北京 100081)

摘要 2411 号台风“摩羯”于 2024 年 9 月登陆中国东南沿海地区, 风云三号 D 星 (FY-3D) 微波湿度计 (MWHS-II) 成功监测到该台风. 本研究在天气研究与预报模式数据同化系统 (Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system, WRFDA) 中构建了晴空条件下 FY-3D MWHS-II 资料三维变分同化框架, 通过设置 118 GHz, 183 GHz 单频段以及双频段联合同化及预报试验方案, 系统评估了 MWHS-II 资料同化对台风“摩羯”的强度、路径及降水预报效果. 试验表明, 同化 FY-3D MWHS-II 资料有效提升了分析场质量, 对台风强度、路径和降水的预报也产生了积极影响. 台风预报方面, 同化 118 GHz 和 183 GHz 通道对台风路径预报分别改进了 17.18% 和 13.39%, 洋面区域的 183 GHz 同化更使得路径预报改进率达到 14.59%; 降水预报方面, MWHS-II 资料同化显著提升初期 24 h 内中小雨量级 (<25 mm) 预报命中率, 其中 118 GHz 通道对强降水 (>50 mm) 预报表现出独特优势; 183 GHz 通道的改进效应在 24 h 后逐步显现, 而双频段联合同化方案展现出综合优势, 各量级降水的降水分数技能得分 (Fractions Skill Scores, FSS) 相比控制试验提升显著. FY-3D MWHS-II 的 118 GHz 和 183 GHz 频段在不同预报要素上的差异化改进效果, 突显了 FY-3D MWHS-II 资料在区域台风数值预报中的独特应用价值及应用潜力.

关键词 微波湿度计, 风云三号 D 星, 卫星微波资料同化, 数值天气预报, 台风“摩羯”

中图分类号 P412

Analysis of the Effect of the Fengyun-3D Satellite Microwave Humidity Sounder (MWHS-II) Data Assimilation on Typhoon "YAGI" Forecast

FENG Yuxuan^{1,2} HE Jieying^{1,2} MA Gang³

1(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 中国科学院青年交叉团队项目资助 (JCTD-2021-10)

2024-12-31 收到原稿, 2025-03-10 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*)

3(*Center for Earth System Modeling and Prediction, China Meteorological Administration, Beijing 100081*)

Abstract The Fengyun-3D satellite (FY-3D) Microwave Humidity Sounder (MWS-II) successfully monitored the Typhoon “YAGI” (2411). In this paper, a three-dimensional variational assimilation framework of FY-3D MWS-II data in clear sky is constructed in WRFDA. By setting up a single-band and dual-band joint assimilation and prediction experiment scheme of 118 GHz and 183 GHz, the microwave data assimilation and the forecast effect on the intensity, path and precipitation of Typhoon “YAGI” are systematically evaluated. The experiment shows that the assimilation of FY-3D MWS-II data effectively improves the quality of the analysis field, and also has a positive impact on the forecast of typhoon intensity, track and precipitation. For the typhoon forecast, the assimilation of 118 GHz and 183 GHz channels improved the typhoon path forecast by 17.18% and 13.39% respectively, and the assimilation of 183 GHz in the ocean area made the path forecast improve by 14.59%. For the precipitation forecast, the assimilation of MWS-II data significantly improves the hit rate of medium and small rainfall levels (< 25 mm) in the initial 24 hours, among which the 118GHz channel has a unique advantage in forecasting heavy rainfall (> 50 mm); The improvement effect of 183 GHz channel gradually appeared after 24 hours, while the dual-band joint scheme showed comprehensive advantages, and the FSS score of precipitation in each magnitude was significantly improved compared with the control experiment. The differential improvement effect of FY-3D MWS-II’s 118 GHz and 183 GHz frequency bands on different forecast elements highlights the unique application value and potential of FY-3 MWS-II data in regional typhoon numerical forecast.

Key words Microwave humidity sounder, Fengyun-3D satellite, Satellite microwave data assimilation, Numerical weather prediction, Typhoon “YAGI”

0 引言

风云三号 (FY-3) 气象卫星是中国自主研发的第二代极轨气象卫星系统, 致力于通过全天候、高精度全球观测数据, 支撑大气环境监测、数值天气预报及气候变化研究等重大需求^[1-3]. 作为该系列第二颗业务化运行卫星, FY-3D 卫星自 2017 年成功发射后持续稳定运行, 积累了丰富的全球气象数据, 其上搭载的第二代微波湿度计 (Microwave Humidity Sounder-II, MWS-II) 具备穿透云雨的独特优势, 通过 118 GHz 和 183 GHz 频段协同观测, 可全天时、全天候获取大气温湿度垂直分布 (廓线)、水汽含量和降雨量等关键空间气象参数, 在台风、强降雨等极端天气预报和跟踪监测等方面发挥了重要作用^[4].

欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 等业务气象机构的评估研究表明, FY-3 系列卫星微波湿度计 (MWS) 观测数据不仅具有可靠的业务实用性^[5-7], 其同化系统中的重要性也呈现日益增长趋

势^[8]. 这一技术优势在台风同化及数值预报领域得到充分验证: 早期 FY-3A/B 卫星的 MWS 数据同化已展现出显著效益, Yang 等^[9]通过直接同化 FY-3A MWS 数据, 改进了初始场质量, 实现了更准确的台风路径预报; Xu 等^[10]进一步发现, FY-3B MWS 数据同化可有效改善双台风系统的风场、温度场和湿度场, 并提高了台风强度和路径预报精度. 随着 FY-3C/D/E 等新批次卫星的发射, MWS-II 探测性能的持续提升推动了同化技术的创新发展. 针对单台风系统, Chen 等^[11]以美国气象环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球预报系统 (Global Forecast System, GFS) 的 FNL (Final) 业务全球分析数据为背景场同化 FY-3C MWS-II 辐射资料, 有效改善了台风“黑格比” (Hagupit) 的路径和强度预报; Xu 等^[12]在晴空条件下同化 FY-3D MWS-II 数据, 发现在辐射数据同化后产生了匹配良好的分析区域, 高度和湿度场得到了显著改善, 从而提高了台风“安比” (Ampil) 降水和路

径预报的准确性. 在复杂台风个例研究中, Xian 等^[13]研究了 FY-3C MWHS-II 资料同化对双台风分析和预报的影响, 结果表明, 两个台风中心区域周围的湿度和温度的垂直结构有所增强, 风场、温度和湿度的预报有所改善, 进而有效降低了台风强度的预报误差; Huang 等^[14]使用不同背景场和快速辐射传输模型, 通过同化 FY-3D MWHS-II 辐射数据, 减少了超强台风“梅花”(Muifa)的路径误差和强度误差. Xiao 等^[15]使用中国气象局全球预报系统(CMA-GFS)中的四维变分(4D-Var)系统, 通过分组同化 FY-3E MWHS-II 温度和湿度通道探测数据, 有效改进了全球预报系统中的短期暴雨预报; Shen 等^[16]研究了同化 FY-3D 和 FY-3E MWHS-II 辐射数据对晴空条件下台风“梅花”(Muifa)分析和预报的影响, 结果表明, 晴空条件下同化 MWHS-II 数据能够增强台风系统的动力学和热力学结构.

现有研究已证实 FY-3 系列卫星搭载的 MWHS-II 资料同化对数值天气预报系统的改进效能, 但 FY-3D MWHS-II 和常规观测数据同化对台风的独立和综合影响的评估较少. 此外, 常规观测数据和卫星各通道观测数据的不同同化策略对预报的影响有待进一步研究. 本研究选取 2024 年第 11 号台风“摩羯”为研究对象, 在 WRFDA 中构建 FY-3D MWHS-II 资料三维变分同化框架, 通过设计单一频段(118 GHz/183 GHz)与双频段协同同化的对比试验方案, 系统评估 FY-3D MWHS-II 数据对台风“摩羯”的同化及预报效果, 为 FY-3 系列卫星微波资料在区域极端天气数值预报系统中的业务应用提供策略参考.

1 数据与方法

1.1 FY-3D MWHS-II 数据

相比于前一代微波湿度计, FY-3D MWHS-II 具有更多的探测通道和更高的探测精度, 垂直分辨率有了很大的提高. MWHS-II 具有 4 个探测频段, 共 15 个探测通道. 位于 89 GHz 和 150 GHz 两个窗区的探测通道可用于降水判识; 位于 118.75 GHz 氧气吸收带附近的 8 个探测通道可用于大气温度的垂直探测, 而国际上其他类似的微波湿度探测仪器(如

MHS 和 ATMS) 不具备此功能; 位于 183.31 GHz 水汽吸收带附近的 5 个探测通道可用于探测从地表到约 300 hPa 的水汽和降水, 获取更为详细的大气水汽垂直分布信息^[17-19]. 同化时, 通道 1 和通道 10 作为窗区通道一般不直接参与同化, 仅用来对降水进行识别^[20].

MWHS-II 采用跨轨扫描的方式, 天线的扫描宽度约为 2645 km, 扫描间隔为 20 km, 一个运行周期内有 2378 条或 2379 条扫描线, 每条扫描线有 98 个像元, 不同频段的星下点分辨率不同. 表 1 给出了 FY-3D MWHS-II 的中心频率、权重函数峰值高度、极化方式及主要探测目的信息. 图 1 是快速辐射传输模式(Radiative Transfer for TOVS, RTTOV)^[21]计算出的晴空条件下 MWHS-II 的 118 GHz 和 183 GHz 通道的温度和湿度雅克比图. 通道 2~4 对高层大气温度敏感, 受水汽影响很小, 是纯温度探测通道; 通道 5~9 的温度雅克比分布在权重函数高度附近, 对水汽显示出一定的敏感性, 具有更好的穿透云雨的能力; 183 GHz 通道作为水汽探测通道, 同样也对温度显示出敏感性, 且 183 GHz 通道的水汽敏感性与温度敏感性高度相似, 分布在其权重函数高度附近. 本研究使用的 FY-3D MWHS-II 的 L1 级数据产品通过风云卫星遥感数据服务网^{*}获得.

1.2 三维变分同化方法

大气资料同化的目的之一是通过“最优”结合过去与现在尽可能多的模式和观测信息, 获得一个最大可能精确的大气运动状态, 作为输入到数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)模式的初始条件^[22]. 资料同化技术经过了多项式插值法、逐步订正法、最优插值等历史发展阶段, 目前业务上普遍使用的方法是变分同化方法^[23,24]. 本研究采用的同化方法是三维变分同化方法, 三维变分同化是在背景场误差和观测误差不相关且都无偏, 同时满足正态分布的假设下, 通过逐步迭代得到目标函数最小解, 从而获得最优分析场 $\mathbf{x}_a$, 其代价函数可以写为^[25]

$$J(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b) + \frac{1}{2}[\mathbf{H}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{y}^{\text{obs}}]^T \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{H}(\mathbf{x}_0) - \mathbf{y}^{\text{obs}}]. \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_0$ 表示大气状态变量, $\mathbf{x}_b$ 表示大气先验信息

^{*} <http://satellite.nsmc.org.cn/DataPortal/cn/home/index.html>

表 1 FY-3D MWHS-II 通道特性参数
Table 1 Channel characteristics of FY-3D MWHS-II

序号	中心频率/GHz	权重函数峰值高度/hPa	极化方式	主要探测目的
1	89.0	—	V	背景微波辐射探测、降水检测
2	118.75±0.08	20	H	大气温度和降水参数垂直结构探测
3	118.75±0.2	60	H	
4	118.75±0.3	100	H	
5	118.75±0.8	250	H	
6	118.75±1.1	300	H	
7	118.75±2.5	700	H	
8	118.75±3.0	—	H	
9	118.75±5.0	—	H	
10	150.0	—	V	背景微波辐射探测、降水检测
11	183.31±1	350	H	大气湿度垂直结构探测
12	183.31±1.8	400	H	
13	183.31±3	500	H	
14	183.31±4.5	550	H	
15	183.31±7	650	H	

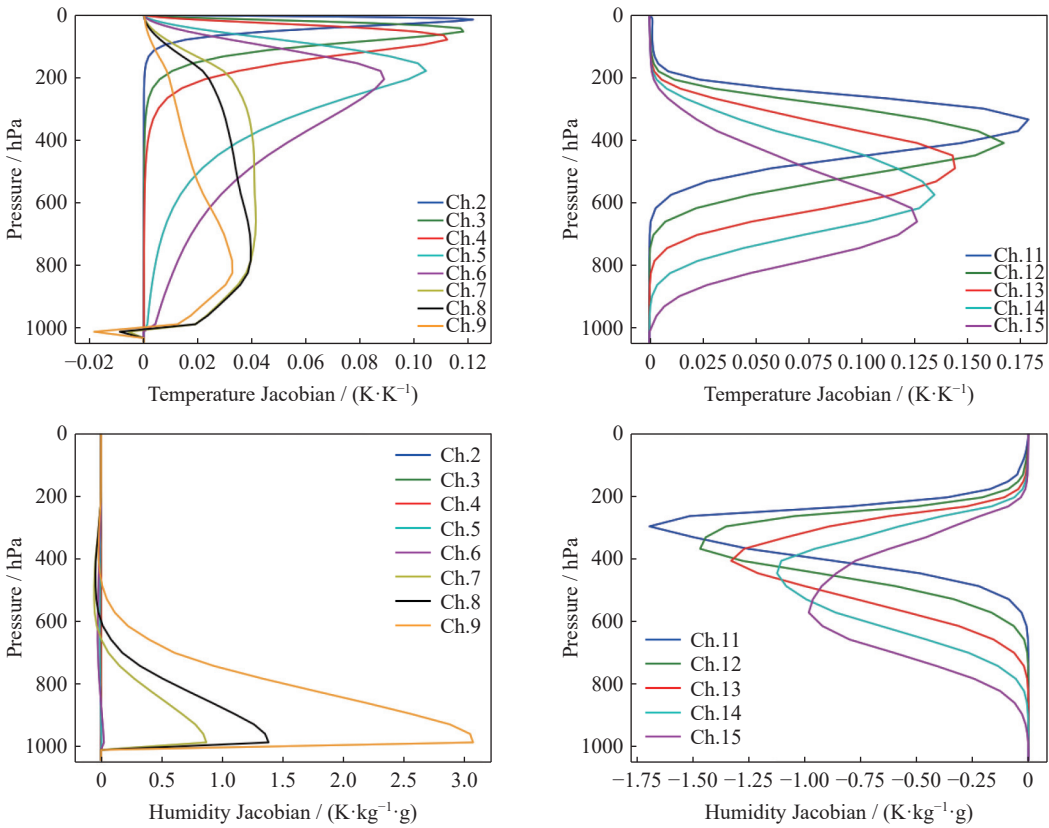


图 1 FY-3D MWHS-II 118 GHz 和 183 GHz 通道温度雅克比和湿度雅克比特征

Fig. 1 Characteristics of temperature Jacobian and humidity Jacobian of FY-3D MWHS-II channels at 118 GHz and 183 GHz

(背景场). 右侧第一项为背景项, 其中 $\mathbf{B}$ 为背景误差协方差矩阵. 右侧第二项为观测项, 其中 $\mathbf{y}^{\text{obs}}$ 为观测矢量, $\mathbf{R}$ 为观测误差协方差矩阵, $\mathbf{H}$ 为观测算子, 具有将模式变量投影到观测空间的能力.

1.3 数据预处理

为确保高质量的数据进入到同化系统中, 在同化前需要对 FY-3D MWHS-II 资料进行预处理. 常见的处理方式包括质量控制和偏差订正. 本研究所使用的质量控制^[26]方案包括: 极值检测, 剔除亮度温度值低于 90 K 和高于 340 K 的卫星观测数据; 地表类型检测, 剔除被划分为混合地表的卫星观测数据; 临边检测, 剔除扫描线最外侧的 8 个像元的数据; 残差检测, 剔除偏差订正后观测背景误差 (Observation Minus Background, OMB) 超过其三倍标准差的数据; 云检测, 剔除背景场中云中液态水路径 (Cloud Liquid Water Path, CLWP) $\text{CLWP} \geq 0.2 \text{ mm}$ 对应区域的观测资料^[27-30]; 降水检测, 利用窗区通道 (通道 1 和通道 15) 对散射指数 (Scatter Index, SI) 进行反演, 当 $\text{SI} > 4.0 \text{ K}$ 时, 对受云影响的观测进行检测并剔除.

在卫星资料同化系统中, 观测资料和背景场误差均假定为无偏的, 快速辐射传输模式引起的模式偏差以及卫星资料校准的残余偏差引起的观测资料偏差会使得无偏假定不成立^[22], 因此在同化前还需要对这些偏差进行订正. 卫星观测亮温的偏差通常可以表示为一组预报因子 $\mathbf{p}$ 的线性组合, 经过订正后的观测算子表示为

$$\tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = H(\mathbf{x}) + \beta_0 + \sum_{i=1}^{N_p} \beta_i \mathbf{p}_i. \quad (2)$$

其中, β_0 是偏差中的常数部分, $\mathbf{p}_i$ 是第 i 个预报因子, β_i 是第 i 个偏差订正系数. 偏差订正系数可以通过在变分同化过程中实时更新得到^[31], 即变分偏差订正. 本研究采用变分偏差订正方案, 在循环同化中, 代价函数将根据偏差参数和模式变量迭代极小化, 即

$$\begin{aligned} \mathbf{J}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta}) = & \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{B}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \\ & \frac{1}{2}(\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_b)^T \mathbf{B}_\beta(\boldsymbol{\beta} - \boldsymbol{\beta}_b) + \\ & \frac{1}{2}[\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})]^T \mathbf{R}^{-1}[\mathbf{y} - \tilde{H}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\beta})]. \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $\boldsymbol{\beta}_b$ 为背景偏差修正系数向量, $\mathbf{B}_\beta$ 为背景误差协

方差的偏差参数.

2 试验方案

2.1 台风“摩羯”介绍

台风“摩羯”(YAGI, 编号 2411) 于 2024 年 9 月 1 日 23:00 BJT 在菲律宾以东洋面生成, 该台风路径范围广且影响范围大, 是 2024 年第 11 个被命名的风暴^[32]. 在 9 月 2 日 14:00 BJT 位于深圳东南方约 1109 km 的洋面上, 中心附近最大风力为 8 级, 强度为热带风暴级. 9 月 3 日 09:00 BJT, “摩羯”进入南海海域, 中心附近最大风力为 9 级; 17:00 BJT, 强度升为强热带风暴级, 之后以每小时 10 km 左右的速度向西偏北方向移动. 在 9 月 4 日 05:00 BJT 位于中国海南省文昌市偏东方约 760 km 的南海东北部海面上, 中心附近最大风力为 11 级, 在 08:00 BJT 加强为台风, 并在 23:00 BJT 进一步升级为超强台风. 自 9 月 4 日 04:00 BJT 起, 其有明显增强过程, 并在 9 月 6 日 05:00 BJT 左右达到最强, 于下午和晚上分别以高强度登陆中国海南和广东沿海, 后维持其高强度进入北部湾, 给路径沿线国家造成了重大损失.

2.2 模式配置

本研究使用中尺度数值天气预报模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model) V4.4 作为预报模式, 其资料同化模块 WRFDAV4.4 的三维变分同化模块作为同化模式, 选择 RTTOV 作为观测算子对台风“摩羯”进行晴空同化及预报试验. 研究使用 NCEP $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 的 FNL 业务全球分析数据作为初始场和边界场*, 该数据未同化过 FY-3 卫星微波资料, 因此不会造成信息重复. 试验中配置了具有涡旋追踪功能的两层嵌套网格 (图 2), 水平网格间距分别为 15 km 和 5 km, 网格点数分别为 360×264 和 195×195 , 两个区域垂直 45 层, 模式层顶为 10 hPa. 外层 D01 网格主要覆盖了中国华东、华南地区, 以及南海和东海的部分地区, 包含了一般情况下影响中国台风系统发生发展的主要区域; 内层 D02 可以自动跟随台风移动, 覆盖了台风的初始位置.

预报模式采用了以下物理参数化方案: WRF Single-Moment 6-class scheme (WSM6) 参数化方案^[33]、短波辐射过程 Dudhia 方案^[34]、长波辐射过程

* <https://rda.ucar.edu/datasets/d083002/>

快速辐射传输模型 (Rapid Radiative Transfer Model, RRTM)^[35]、延世大学 (Yonsei University, YSU) 边界层方案^[36]、莫宁-奥布霍夫 (Monin-Obukhov) 地表方案、统一的 Noah 陆面模型和 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案^[37]。

在进行同化试验之前, 利用 GEN_BE 作为统计背景误差协方差的工具, 采用 CV7 控制变量方案, 基于增量法^[38]和变量转换法^[39], 使用 U-V 分量作为动力场控制变量^[40]。使用 NMC (National Meteorology Center) 法统计背景误差^[41], 共基于 20 个 12 h 和 24 h 预报集合样本计算背景误差协方差。

2.3 试验设计

选择 2024 年的第 11 号台风“摩羯”(YAGI) 作为研究对象, 共进行了 4 组试验 (见表 2), 时间范围为 2024 年 9 月 4 日 06:00 UTC 至 9 月 7 日 18:00

UTC, 这段时间涵盖了台风“摩羯”的快速增强到减弱的过程。试验中设置同化前 6 h 为模式的 spin-up 时间, 这样可以通过冷启动修正大尺度环流偏差, 减少循环同化和模式集成过程中积累的系统模式误差。在同化前, 首先从 9 月 4 日 00:00 UTC 进行 6 h 前向积分的冷启动, 为首次同化提供初始场。同化每 6 h 进行一次, 直到 9 月 5 日 18:00 UTC, 然后以最后一次同化的分析场作为模式的初始场进行 48 h 确定性预报。

3 同化分析

3.1 参与同化的 OMB 和 OMA

图 3 中显示了 FY3D MWHS-II 通道 7 和通道 15 的亮温分布 (a, b), 以及在三组同化 MWHS-II 观测资料的不同试验中, 参与同化的微波湿度计通道 7 和通道 15 观测的 OMB (c, d, e, f) 和观测减分析 (Observation Minus Analysis, OMA) (g, h, i, j) 的分布情况。在台风附近, 通道 7 和通道 15 的观测数据具有较大的 OMB, 表明台风区域观测场与背景场之间存在较大的不一致性, 这导致一些观测数据由于 OMB 较大而未能通过质量控制, 从而未能参与同化。经过同化后, OMA 相较于 OMB 整体减小, 表明分析场值逐渐向观测场值靠近。Exp.118+183 试验的 OMA 总体上比 Exp.118 和 Exp.183 试验的 OMA 小, 特别是通道 7 的台风区域, OMA 的标准差也更小, 表明 Exp.118+183 试验使分析场更加接近观测场, 观测场中和温度、湿度有关的信息都更好地被同化到了分析场中, 有效改善了背景场的质量。

3.2 模式空间的分析场特征

观测场的变化对于分析场有直接影响。对于微波湿度计数据, 影响最大的分析变量是湿度和温度。

图 4 中显示了 4 组试验分别在 2024 年 9 月 5 日

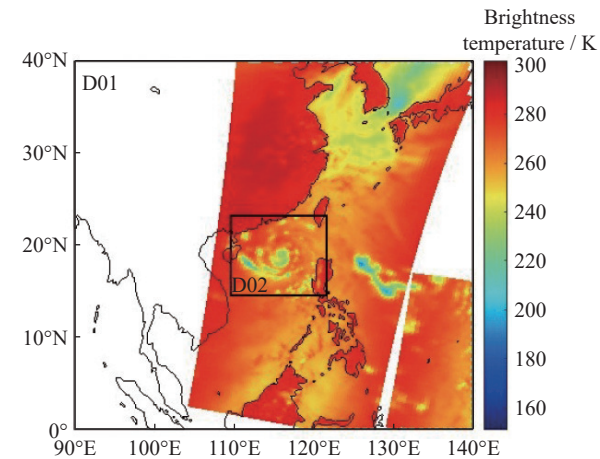


图 2 同化及预报试验的网格设置. 背景为 2024 年 9 月 4 日 17:06 UTC 时 FY-3D MWHS-II 通道 1 (89 GHz) 的亮温分布
Fig. 2 Grid setting of assimilation and forecast experiment, with the background of the brightness temperature of FY-3D MWHS-II Channel 1 (89 GHz) at 17:06 UTC on 4 September 2024

表 2 同化试验设置
Table 2 Assimilation experimental settings

试验名称	使用的观测资料
CTRL	仅同化常规观测资料
Exp.118	同化常规观测资料 + MWHS-II Channel 2~9
Exp.183	同化常规观测资料 + MWHS-II Channel 11~15
Exp.118+183	同化常规观测资料 + MWHS-II Channel 2~9 + Channel 11~15

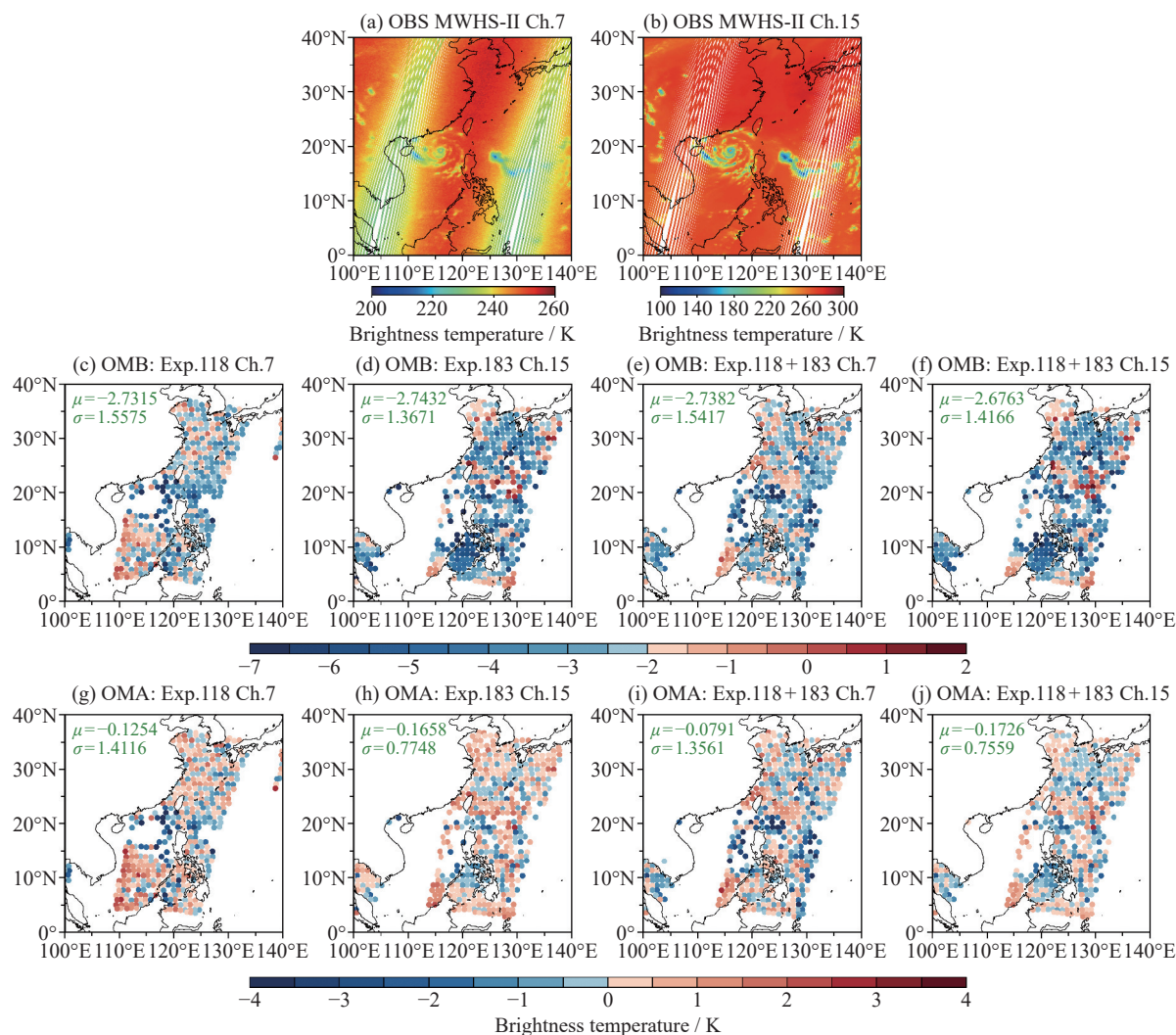


图3 2024年9月4日18:00 UTC时FY-3D MWHS-II通道7和通道15观测结果

Fig. 3 Channel 7 and Channel 15 observations of FY-3D MWHS-II at 18:00 UTC on 4 September 2024

18:00 UTC 台风区域 300 hPa, 500 hPa, 850 hPa 处的温度分析增量及其对应的背景场分布. 相比于仅同化常规观测资料的 CTRL 试验, 同化 MWHS-II 资料的三组试验具有更大的温度分析增量, 而同化不同通道的三组试验之间存在一定的差异. CTRL 试验的温度分析增量 (见图 4a, e, i) 主要集中在对流层中低层, 这是因为台风作为一种典型的强对流系统, 近地面暖湿空气在眼壁附近强烈上升, 到高层后向外辐散流出, 导致台风中心高层通常为下沉气流区, 受这种热力结构影响, 同化后高层的温度分析增量会降低. 118 GHz 通道作为主要的温度探测通道, 虽然其温度雅克比峰值主要集中于对流层中高层, 但对低层大气温度仍显示出一定的敏感性, 因此在三个高度层上均可以观察到较大的温度分析增量 (见图 4b, f, j). 特别

是在对流层中高层, 台风西北部和东南部得到了更大的温度正增量, 在台风北部具有更大的温度负增量. 由于 118 GHz 对水汽也具有较高的敏感性, 特别是在 850 hPa 处水汽量充沛, 这使得水汽潜热释放更多热量, 因此 Exp.118 在 850 hPa 台风北部和东南侧雨带显示出了更大的温度负增量.

尽管 183 GHz 通道作为湿度探测通道, 但由于其对温度也具有敏感性, 因此也产生了较大的温度分析增量 (见图 4c, g, k). 然而与 Exp.118 试验不同的是, Exp.183 试验在 850 hPa 处具有更大温度正增量 (14°N–19°N), 这与 Exp.118 的温度负增量相反. 这是因为水汽分布与云雨过程密切相关, 晴空区的湿度观测一定程度上会间接反映周围云雨区的变化, 云雨区中发生的雨滴蒸发、冰晶融化等物理过程的吸收潜

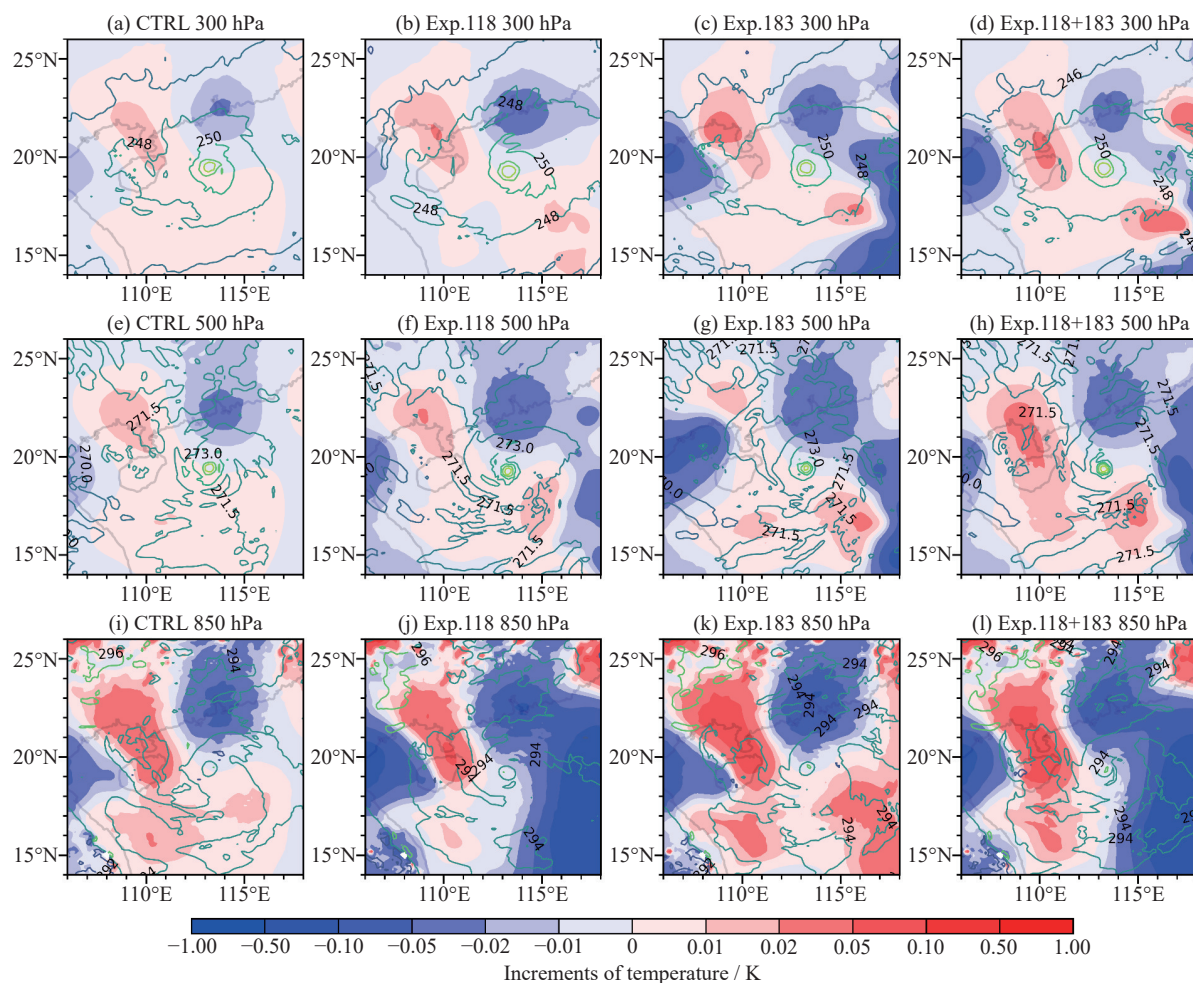


图 4 2024 年 9 月 5 日 18:00 UTC 时 4 组试验在不同高度处的温度分析增量和温度背景场分布

Fig. 4 Analysis increments and the background field of temperature at different pressure levels for four experiments at 18:00 UTC on 5 September 2024

热促使周围空气温度上升,带来更大的温度正增量。相较于仅同化 118 GHz 通道和仅同化 183 GHz 通道试验, Exp.118+183 试验在对流层高层具有更大温度正增量 ($16^{\circ}\text{N}-18^{\circ}\text{N}$, $21^{\circ}\text{N}-23^{\circ}\text{N}$), 同时对流层中低层 ($108^{\circ}\text{E}-112^{\circ}\text{E}$) 温度正增量增大并以这种趋势向西南部扩散, 使正负温度增量形成更加强烈的对比 (见图 4d, h, l), 这表明 Exp.118+183 综合了 118 GHz 频段和 183 GHz 频段的探测特点和优势, 在对流层低、中、高层均具有更加明显的温度分析增量。

相对湿度分析的情况与温度相反, 其分析增量和背景场分布如图 5 所示。台风区域低空水汽输送活跃, 850 hPa 处于低空暖湿输送带附近, 水汽在此汇聚、辐合强烈, 为平衡水汽收支, 会产生较大的水汽增量, 因此 CTRL 试验的相对湿度分析增量 (见图 5a, e, i) 主要集中在对流层低层。在中高层大气中, 水

汽含量本就低于低空, 水汽输送、辐合过程相对较弱, 同化后的湿度状态改变幅度更小。118 GHz 通道在晴空条件下对水汽也具有一定的敏感性, 因此相比于 CTRL 试验, Exp.118 试验在对流层中、高、低层均显示出更大的相对湿度分析增量, 并主要集中在台风的螺旋雨带区 (见图 5b, f, j)。183 GHz 通道作为主要的水汽探测通道, 对 3 个高度层的相对湿度均产生了影响。分析增量 (见图 5c, g, k) 主要集中在对流层中高层, 并且对流层高层以相对湿度的增大为主, 对流层低层以相对湿度的减小为主。Exp.118 和 Exp.183 试验在 850 hPa 的湿度分析增量正负相反 (台风东南侧), 这与通道 6~9 和通道 11~15 的水汽雅克比符号相反有关。

Exp.118+183 试验综合了 Exp.118 和 Exp.183 试验的特点, 在对流层低、中、高层均具有较大的相

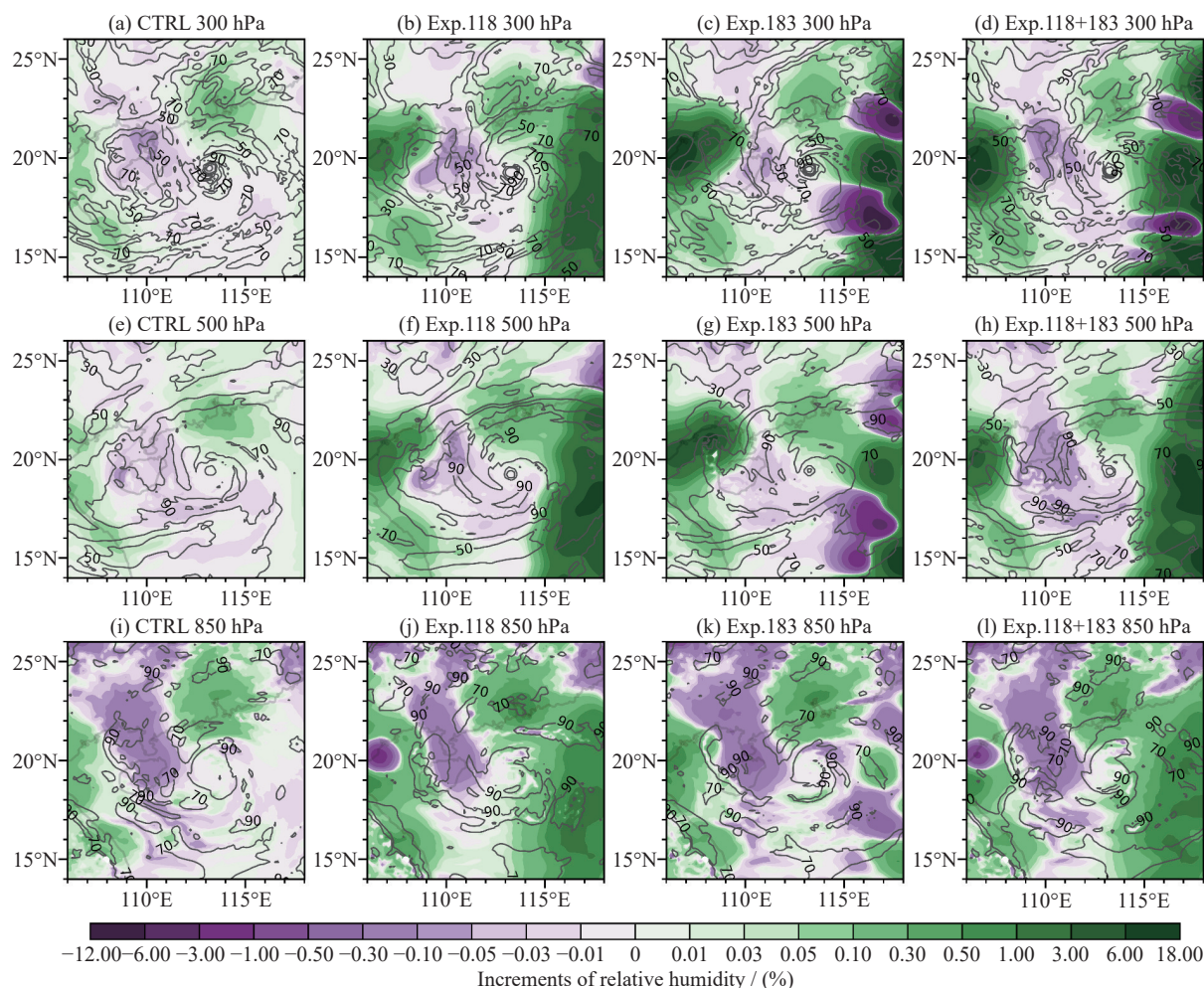


图5 2024年9月5日18:00 UTC时4组试验在不同高度处的相对湿度分析增量和相对湿度背景场

Fig. 5 Analysis increments and the background field of relative humidity at different pressure levels for four experiments at 18:00 UTC on 5 September 2024

对湿度分析增量(见图5d, h, l). 但是相比于183 GHz通道, 118 GHz通道对分析场产生了更大的影响. 同时注意到, 在114°E—118°E区域, 同化MWHS-II资料的3组试验在3个高度层均有较大的相对湿度正增量, 随着高度层的升高, 正增量越大. 这是因为台风的强对流会伴随着剧烈的垂直上升运动, 能将低层水汽迅速输送至高层, MWHS-II通道对水汽具有高敏感性, 同化时会迅速捕捉到因上升运动新抵达高层的水汽, 导致相对湿度增量增大.

4组试验在300 hPa, 500 hPa, 850 hPa的位势高度分析增量和位势高度背景场分布如图6所示. 与温度类似, 位势高度分析增量与温度分析增量分布较为一致. 正温度增量对应于负位势高度增量, 负温度增量对应于正位势高度增量. CTRL试验(见图6a,

e, i)对3个高度层的位势高度均产生了影响, 高层大气垂直风切变较小, 导致随着高度层的升高, 对位势高度产生的影响越小. Exp.118试验在台风北部(20°N—26°N)有较大的正位势高度分析增量, 而在台风东南部有较大的负增量, 这两种情况共同导致台风的低压中心向东南移动(见图6b, f, j). 但是因为Exp.183试验在台风西南部也产生了较大的负位势高度分析增量(见图6c, g, k), 导致台风的低压中心相较于Exp.118试验向西北移动. Exp.118+183试验(见图6d, h, l)中参与同化的MWHS-II观测数据较多, 台风南部的负分析增量更大, 这种驱动力也更强, 所以此时Exp.118+183试验的台风位置比Exp.183试验更偏南. 同时注意到, 在108°E—112°E, 19°N—21°N区域, Exp.118+183试验具有更大的位势高度

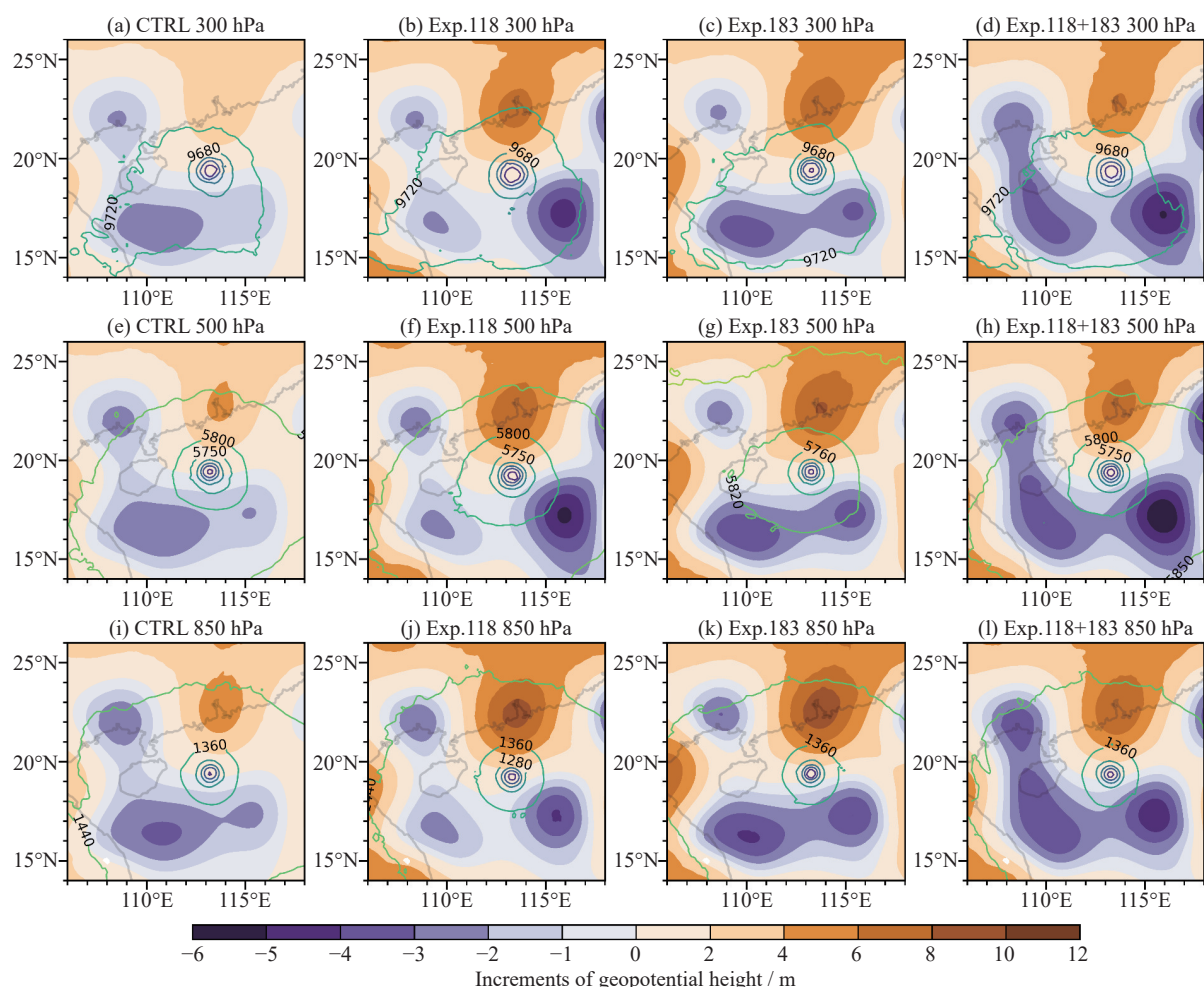


图6 2024年9月5日18:00 UTC时4组试验在不同高度处的位势高度分析增量和位势高度背景场

Fig. 6 Analysis increments and the background field of geopotential height at different pressure levels for four experiments at 18:00 UTC on 5 September 2024

负增量, 南北两侧负增量均向中部扩散, 这一现象与温度及相对湿度分析增量类似. 总体来说, 同化 MWHS-II 资料会产生更大的位势高度分析增量, 这会对台风位置的变化产生直接影响.

4组试验分别在2024年9月5日18:00 UTC对流层低、中、高层的纬向风(U)分析增量及其对应的背景场如图7所示. U风场分析增量分布与温度分析增量分布结构较为一致, 正温度增量对应于负U风场增量, 负温度增量对应于正U风场增量. 同时注意到, 四组试验在背景场U风场较低的区域(台风北部, 20°N–26°N)具有U风场正增量, 而在背景场U风场较高的区域(台风南部, 14°N–20°N)具有U风场负增量. 随着高度层的升高, 台风北部22°N–26°N的负分析增量呈增大的趋势, 台风西南侧雨带

逐渐向东南方移动, 同化 MWHS-II 的3组试验尤为明显. 由于大气中水汽梯度的变化会引起大气热力结构的变化, 进而驱动大气产生水平环流调整. 因此, 在同化后形成的热力差异会促使空气在水平方向上加速流动, 使得U风场分析增量增大.

4组试验分别在2024年9月5日18:00 UTC对流层低、中、高层的经向风(V)分析增量及其对应的背景场如图8所示. 与U风场类似, 4组试验在背景场V风场较低的区域(台风西部, 107°E–113°E)具有V风场正增量, 而在背景场V风场较高的区域(台风东部, 113°E–118°E)具有V风场负增量. 同时注意到, V风场分析增量分布与温度分析增量分布结构较为一致. 相比于300 hPa和850 hPa, 4组试验在500 hPa高度层具有最小的正V风场分析增量(台风

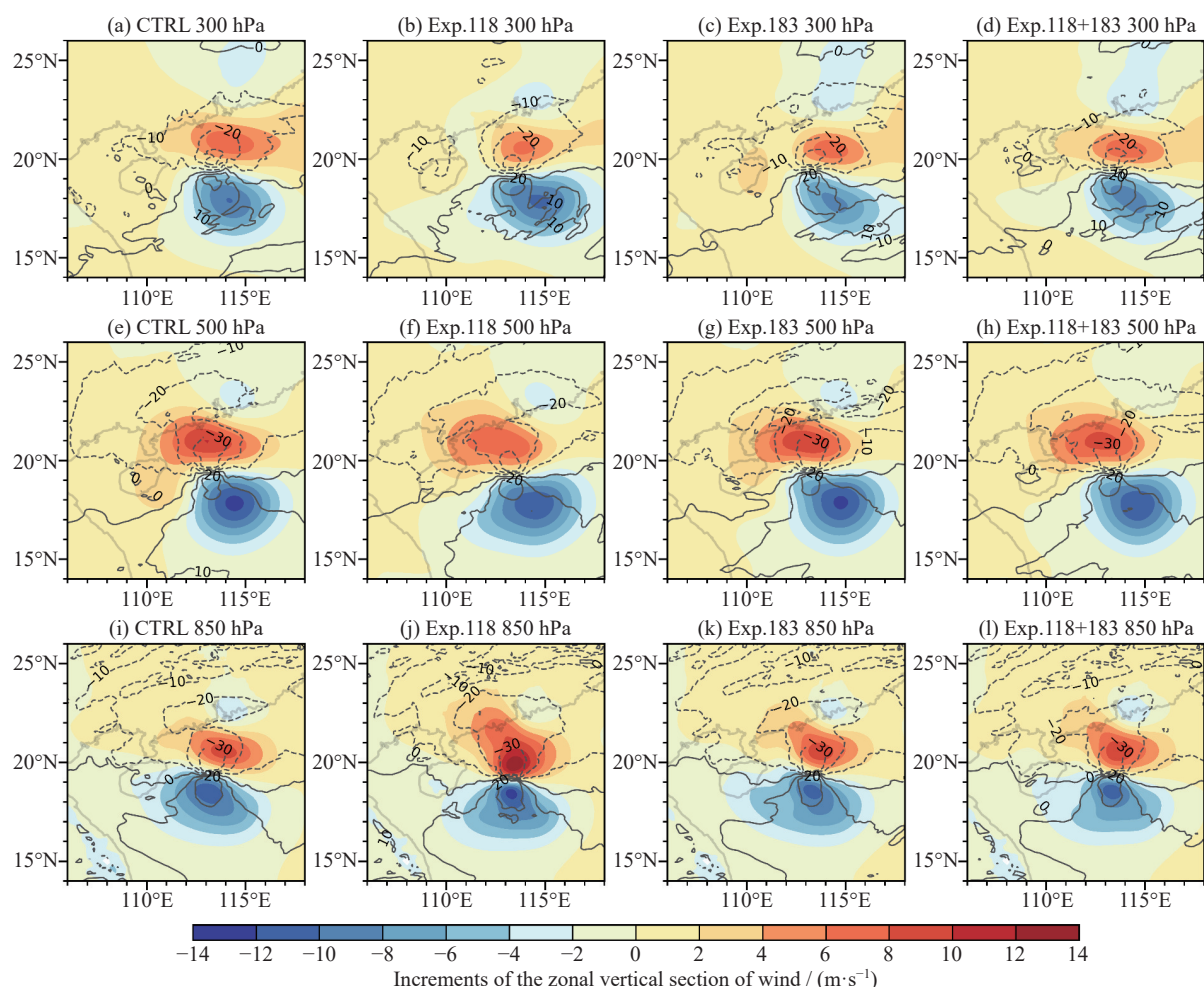


图 7 2024 年 9 月 5 日 18:00 UTC 时 4 组试验在不同高度处的 U 风场分析增量和 U 风场背景场

Fig. 7 Analysis increments and the background field of the zonal vertical section of wind at different pressure levels for four experiments at 18:00 UTC on 5 September 2024

中心西部) 和最大的负 V 风场分析增量 (台风中心东部), 而在对流层高层和低层大气中的台风中心西部具有较大的正 V 风场分析增量, 此时台风中心东部具有较小的负 V 风场分析增量, 这与台风深对流密切相关. 相比于 CTRL 试验, 同化 MWHS-II 的 3 组试验中负 V 风场分析增量略有减小 ($114^{\circ}\text{E}-118^{\circ}\text{E}$), 而正 V 风场分析增量明显增大 (特别是 Exp.183 试验), 这是由于 MWHS-II 提供了丰富的水汽信息进入到同化系统中, 为平衡水汽分布变化产生了补偿性环流, 使得 V 风场分量调整幅度增大.

3.3 分析场评估

这里进一步以 ECMWF 第五代再分析资料 ERA5^[42] 为参考场, 对 4 组试验的分析场质量进行评估检验. 由于 ERA5 未同化 FY-3 MWHS-II 资料, 避

免了重复观测所带来的相关性干扰. 同时 ERA5 具有先进的全天空同化技术, 被认为是高度可靠的. 不同变量的分析场均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 展示在图 9 中. 可以看到, Exp.118 试验具有最小的温度分析误差, 这与 118 GHz 通道的特征是一致的. 虽然 Exp.118+183 试验和 Exp.183 试验的温度分析误差较为接近, 但 Exp.118+183 在对流层中低层误差更小. 几组同化 MWHS-II 通道资料试验的相对湿度分析误差较为接近, 特别是 Exp.183 和 Exp.118+183 试验, 而 Exp.118 试验在对流层中低层具有更小的误差, 同时 Exp.118 试验对于风场的分析显示出一定的改善, 特别是 U 风场在 900 hPa 以上的 RMSE 有显著调整, 900~200 hPa 的 V 风场也有明显的改善. Exp.183 试验和 Exp.118+183 试验对于

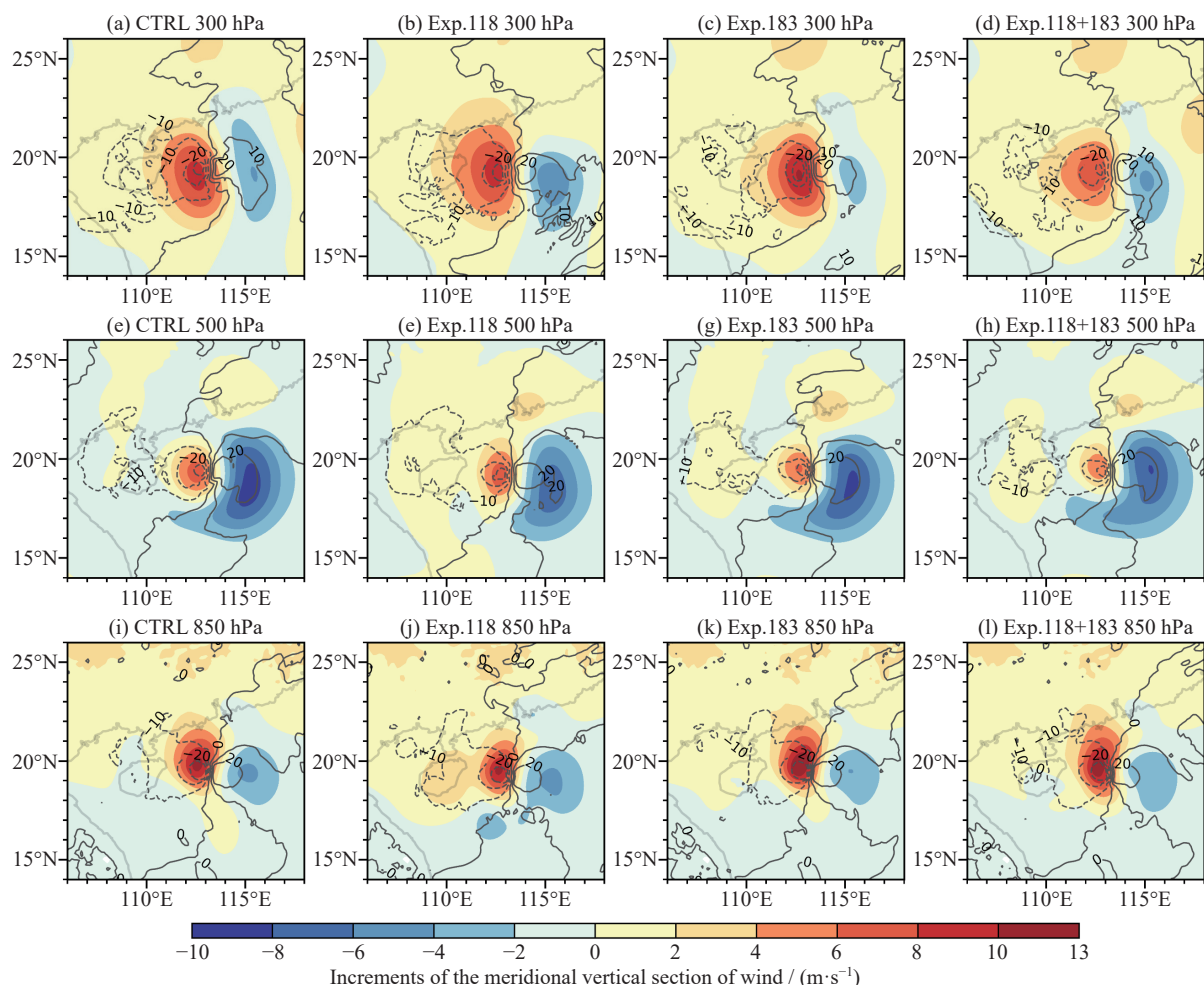


图 8 2024 年 9 月 5 日 18:00 UTC 时 4 组试验在不同高度处的 V 风场分析增量和 V 风场背景场

Fig. 8 Analysis increments and the background field of the meridional vertical section of wind at different pressure levels for four experiments at 18:00 UTC on 5 September 2024

风场也具有一定的改善效果, 且二者较为接近, 特别是在对流层中低层 Exp.118+183 效果更显著. 此外, Exp.118+183 试验在对流层低层具有更小的位势高度分析误差, 而 Exp.183 试验在对流层中层具有更好的位势高度分析, 这与 183 GHz 通道也具有一定温度探测能力有关.

4 台风预报效果分析

4.1 台风路径及强度

图 10 中显示了循环同化和确定性预报期间台风“摩羯”的中心海平面气压 (CSLP) 和路径, 预报场的路径和强度结果来自最内层涡旋自动追踪的输出. 中国气象局台风网提供的最佳路径数据显示, “摩羯”

用了 24 h 使中心海平面气压下降了约 55 hPa, 这对预报来说是一个挑战. 在循环同化期间, 同化 MWHS-II 通道观测资料的 3 组试验中的台风增强过程比仅同化常规观测资料的 CTRL 试验更快、更强. 在经过几个同化周期后 (对应 05 日 18:00 UTC), Exp.183 试验的中心海平面气压最低. 在随后的 48 h 确定性预报中, Exp.183 试验也保持着较低的中心海平面气压. 4 组试验的台风路径比较相似, 特别是在同化期间和预报初始阶段. 在台风预报后期, 随着观测资料的同化对各预报变量影响作用逐渐消散, 这 4 组试验与最佳路径之间存在着一定差异. 而同化期间 4 组试验模拟的台风路径和最佳路径具有较小的差异, 如图 10(b) 中空心圆轨迹所示, 说明各组试验中具有模拟良好的台风系统. 48 h 确定性预报是在台风登陆的前

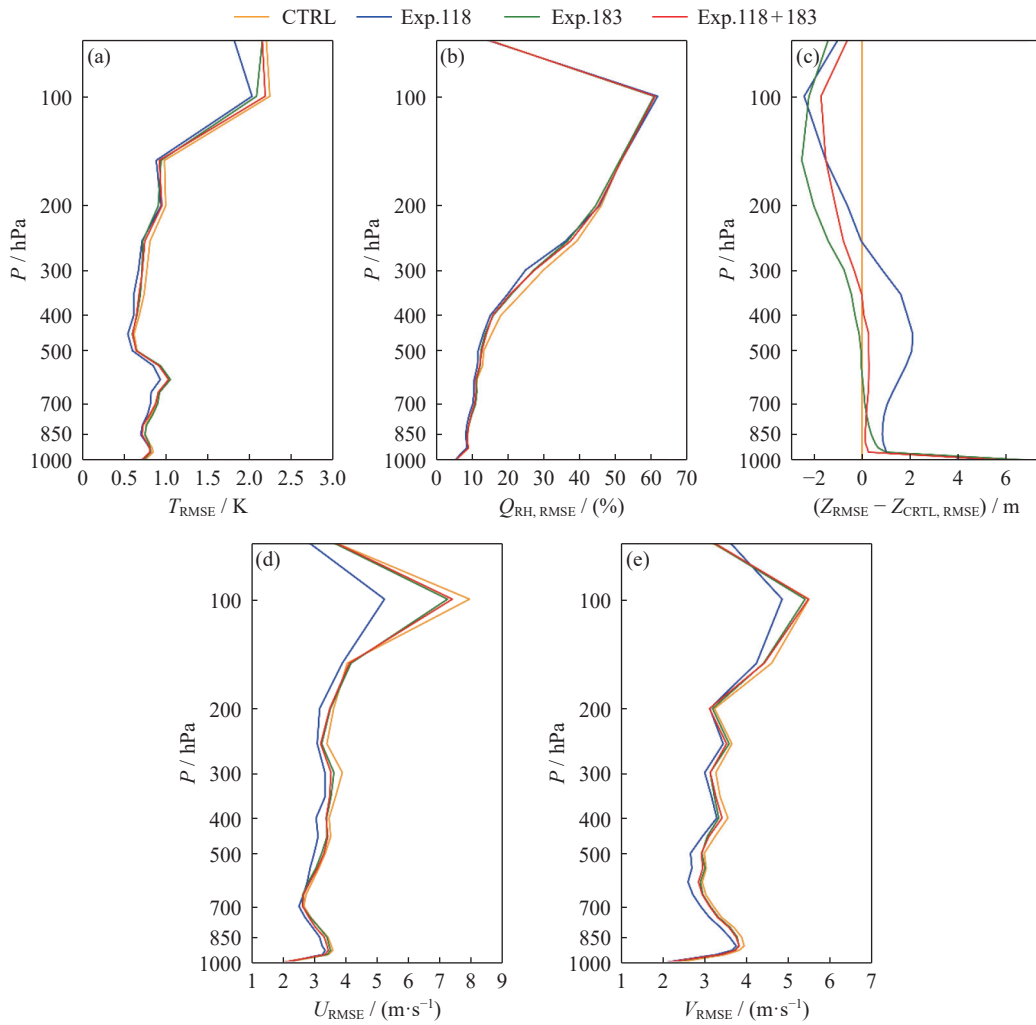


图9 分析场 RMSE 的垂直廓线 (以 ERA5 为参考)

Fig. 9 Vertical profiles of RMSE of the analyzed field (with ERA5 as reference)

一天进行的,这使得证明数据同化对台风预报的影响更具挑战性,由于 CTRL 试验中已经存在一个模拟良好的台风系统,但其预报的台风路径在前 24 h 后出现显著偏差,这是受到了台风登陆的影响.可以注意到,在 109°E—111°E 的陆地区域,几组试验的路径预报误差均较大,这是由于台风登陆后,地表发射率发生了变化.24 h 后变量平衡后,台风再次回到洋面上,各试验预报的台风路径轨迹偏差逐渐减小.

针对 4 组试验在 48 h 确定性预报的中心海平面气压和路径的 RMSE 结果展示在表 3 中.可以看出,相比于仅同化常规观测资料的 CTRL 试验,同化 MWHS-II 通道观测资料后的中心海平面气压和路径具有更小的 RMSE.这表明,同化 MWHS-II 资料对台风强度和路径的预报产生了积极影响.为进一步量

化预报影响,定义预报改进率 Ratio (数学符号 σ_{Ratio})^[43] 为

$$\sigma_{\text{Ratio}} = \frac{e_{\text{RMSE}}^{\text{CTRL}} - e_{\text{RMSE}}^{\text{MWHS-II}}}{e_{\text{RMSE}}^{\text{CTRL}}} \times 100\%. \quad (4)$$

其中, $e_{\text{RMSE}}^{\text{CTRL}}$ 表示 CTRL 试验的 RMSE, $e_{\text{RMSE}}^{\text{MWHS-II}}$ 表示同化 MWHS-II 通道观测资料的 3 组不同试验的 RMSE. 3 组试验的 RMSE 和 Ratio 列于表 3.

4.2 台风温湿风场预报

为研究同化 MWHS-II 资料对台风“摩羯”预报的影响,4 组试验的预报结果分别与 ERA5 再分析资料进行了评估检验,确定性预报期间不同预报变量的预报 RMSE 展示在图 11 中.

首先分析 6 h 和 12 h 预报情况.可以看到 Exp.118 试验经过模式积分后,对温度的影响逐渐显

现,特别是在对流层中高层,展示出一定程度的改善,在 700~400 hPa 也具有较小的相对湿度误差.此外,Exp.118 试验对纬向风和经向风都表现出较为明显的改善.有研究^[43,44]表明,对微波温度探测资料进行循环同化会为风场预报带来一定程度的改善,Exp.118 试验也进一步证实了这一点. Exp.183 试验具有较小的相对湿度预报误差,特别是在 700 hPa 及以上的高

度,并且对于 450 hPa 以上的温度也有明显的改善. Exp.183 试验虽然具有更大与水汽和热力相关的分析增量和更接近观测的分析场,但其对动力场的影响很小,水汽和热力的影响缺少动力因素的维持,因此持续性较差,效果并未能体现到预报中.

对于更长的预报时效,4 组试验温度在低层大气预报的差异相对较小,随着高度层的升高,差异逐渐显现.对于相对湿度,Exp.118 试验依然具有更小的预报误差,而 Exp.183 试验对于相对湿度也仅具有略微的改善. MWHS-II 的不同通道对温度和湿度的影响基本可以持续 24 h 左右.而 Exp.118 试验对 U 风场的改善较为持久,48 h 预报中改善依然明显,但对 V 风场的改善未能持续.

4.3 台风降水预报

为研究同化 FY-3D MWHS-II 资料对台风降水预报的影响,这里评估了累计 24 h 的台风降水预报,结果如图 12 和图 13 所示.对标的降水数据来自全球降水测量计划 (GPM) 的 IMERG (综合多卫星反演产品) 数据^[45].从 2024 年 9 月 5 日 18:00 UTC 开始的 24 h 累计降水如图 12 中显示,4 组试验都预报出了台风外围的螺旋雨带.但是由于预报的台风移速较慢,与 GPM 数据相比,台风登陆点附近的降水整体偏东一些.4 组试验对于偏西南的降水带出现了过报,特别是同化 MWHS-II 资料的试验.但相比于控制试验,同化 MWHS-II 的 3 组试验中对于台风中心部的预报有较大改善.对于台风西部眼墙区域和偏东南的降水带则出现了漏报,同化 MWHS-II 的 3 组试验相比于控制试验略有改善,与 GPM 数据更为接近.图 13 中从 2024 年 9 月 6 日 18:00 UTC 开始的 24 h 累计降水显示,4 组试验在登陆点附近观测到了强降水

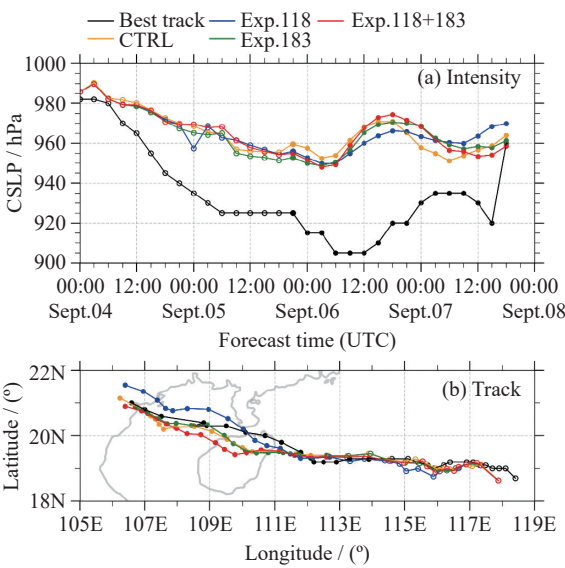


图 10 循环同化和确定性预报期间台风“摩羯”(2411) 预报结果. (a) 中心海平面气压变化, (b) 台风移动路径. 空心圆表示同化分析后的结果, 实心圆表示预报结果

Fig. 10 Forecast results of Typhoon “YAGI” (2411) during cyclic assimilation and deterministic forecast. (a) Central sea level pressure change, (b) typhoon moving path. Hollow circles represent the assimilation analysis results and solid circles represent the forecast results

表 3 48 h 确定性预报的中心海平面气压和路径的 RMSE 和预测改进率 (Ratio)

Table 3 RMSE and ratio of central sea level pressure and path during the 48-hour deterministic forecast

试验名称	中心海平面气压				路径			
	洋面+陆地		仅洋面		洋面+陆地		仅洋面	
	RMSE/hPa	Ratio/(%)	RMSE/hPa	Ratio/(%)	RMSE/km	Ratio/(%)	RMSE/km	Ratio/(%)
CTRL	40.5418	—	31.3296	—	116.9672	—	106.4815	—
Exp.118	39.4163	2.78	33.3405	-6.42	96.8727	17.18	97.9256	8.04
Exp.183	40.0193	1.29	31.3021	0.087	101.3016	13.39	90.9416	14.59
Exp.118+183	40.6933	-0.37	30.2557	3.43	117.5214	-0.47	98.2435	7.74

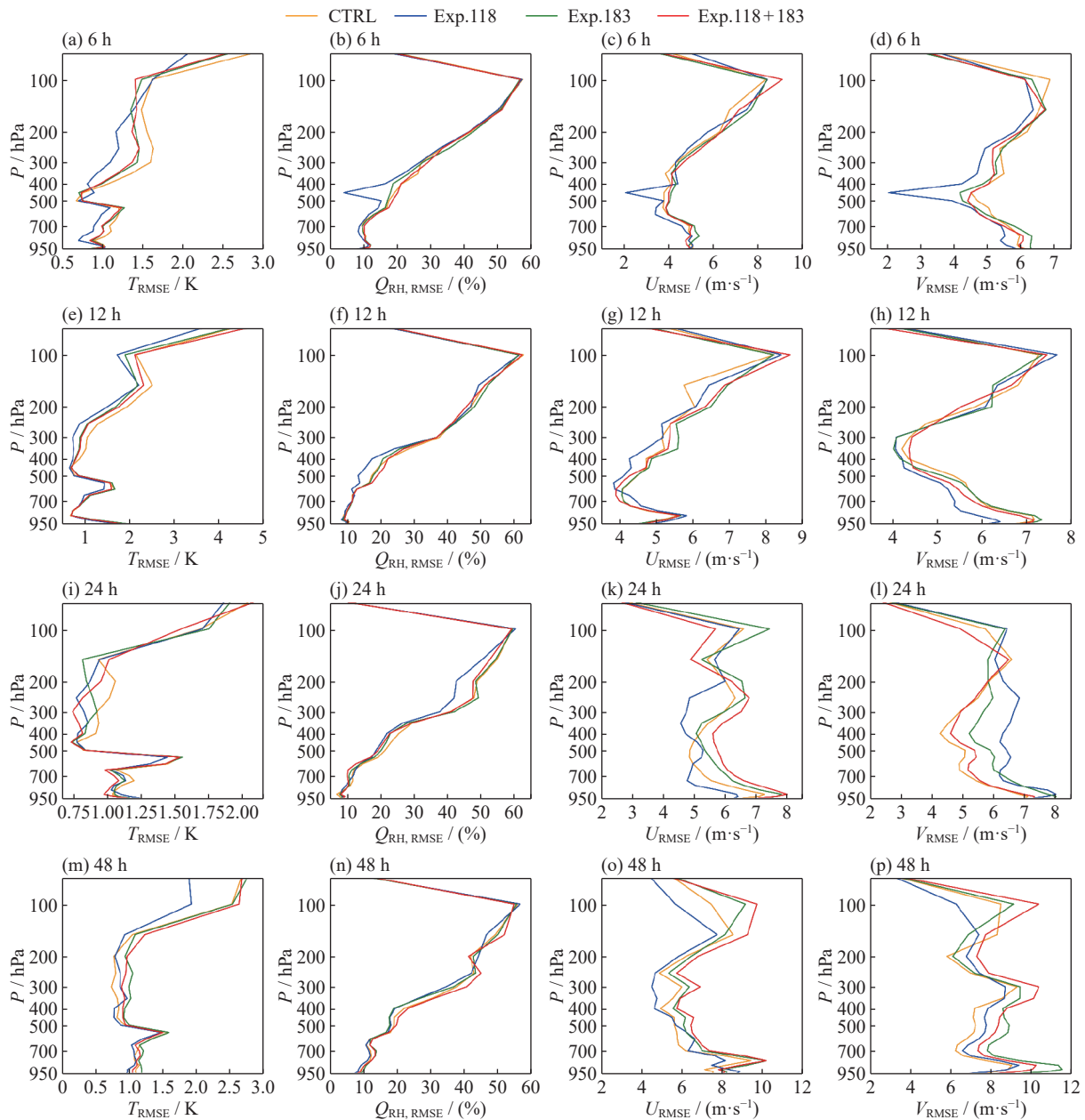


图 11 各试验在确定性预报期间不同预报时效的 RMSE 垂直廓线 (以 ERA5 为参考)

Fig. 11 Vertical profiles of RMSE for different forecast timescales during deterministic forecasting for each experiment (with ERA5 as reference)

(>250 mm), 并且都预报出了台风外围的螺旋雨带. 相比于 GPM 数据, 四组试验对台风西部眼墙区域和台风南部的降雨带出现了过报, 而对于台风东部降雨带则出现了漏报. 但对台风中心区域的预报与 GPM 数据较为接近.

为量化评估同化 FY-3D MWHS-II 资料对台风降水预报的影响, 图 14 中显示了在不同降水阈值下的 24 h 累计降水基于邻阈法的 FSS^[46]. FSS 降水

评分的取值范围在 0~1, 0 表示预报与观测没有重叠, 即完全错误预报; 1 表示预报与观测完全重合, 即完美预报. 在最初的 24 h 预报中 (图 14a), 同化 MWHS-II 的三组试验在中小雨 (<25 mm) 体现出较高的命中率, 而当降水阈值大于 50 mm 时, 只有 Exp.118 试验依旧保持着更高的命中率, 特别是大于 100 mm 的降雨, 优势明显. 在 24 h 后 (图 14b), Exp.183 和 Exp.118+183 试验的预报效果逐渐显现,

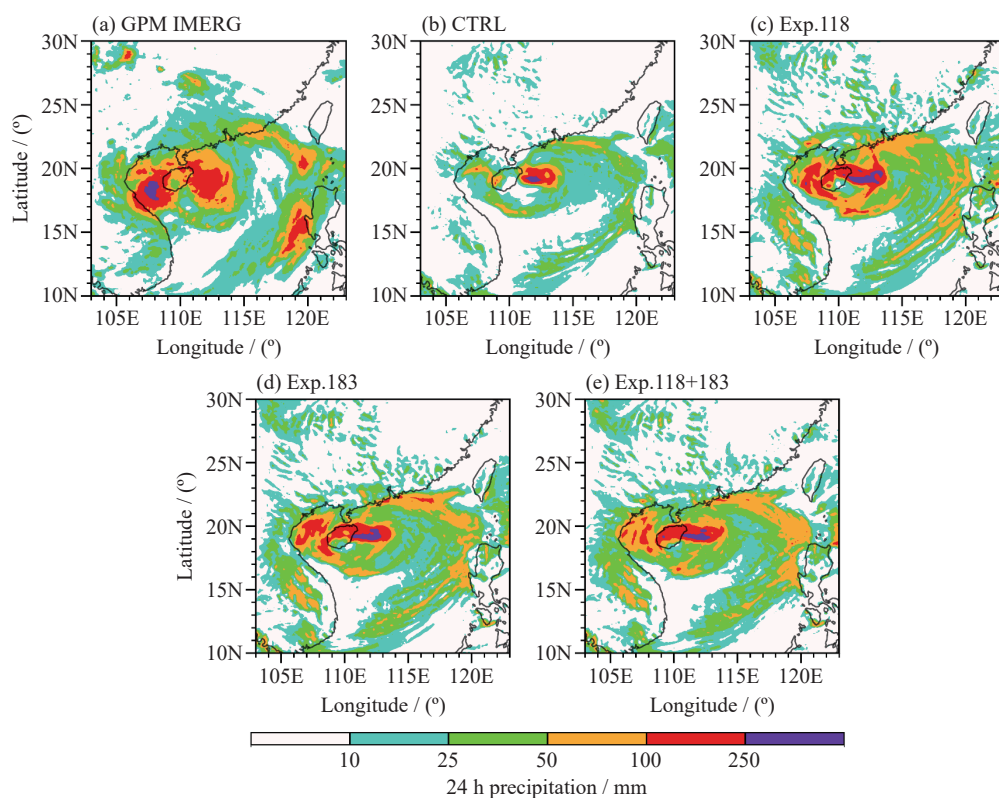


图 12 2024 年 9 月 5 日 18:00 UTC 开始的 24 h 累计降水

Fig. 12 24 h cumulative precipitation from 18:00 UTC on 5 September 2024

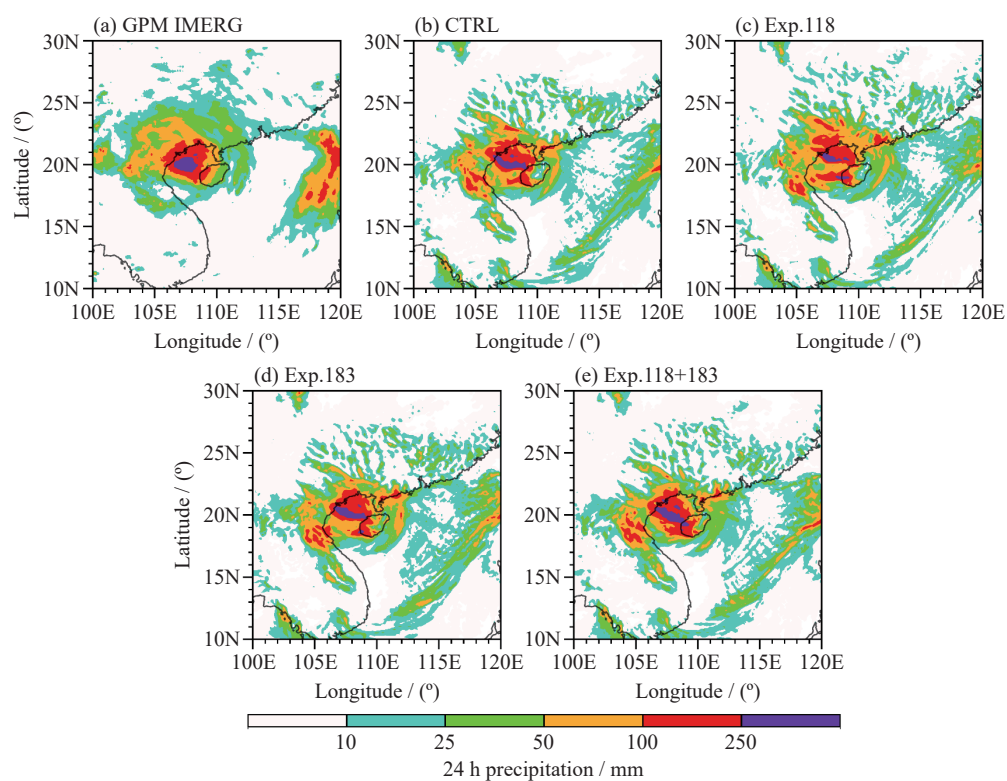


图 13 2024 年 9 月 6 日 18:00 UTC 开始的 24 h 累计降水

Fig. 13 24 h cumulative precipitation from 18:00 UTC on 6 September 2024

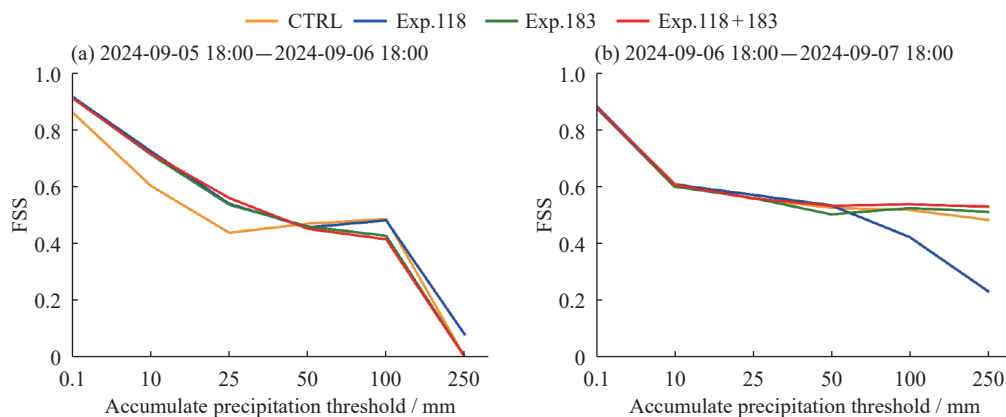


图 14 不同降水阈值下 24 h 累计降水在台风区域的 FSS 评分

Fig. 14 FSS score of 24 h cumulative precipitation in typhoon area under different precipitation thresholds

特别是 Exp.118+183 试验, 对于所有量级的降水都有着较高的 FSS 分数, 而 Exp.118 试验仅对 10~50 mm 的降雨预报保持较高的命中率, Exp.183 试验对大于 100 mm 的降雨预报体现出一定优势. 从上述对台风降水的结果来看, 同化 FY-3D MWHS-II 资料可以有效改善降水的强度预报.

5 结语

FY-3 系列卫星 MWHS-II 资料同化可有效改善分析场质量, 为下一时次的预报提供更好的初始条件, 进而优化数值天气预报结果. 本研究基于 WRF-DA 系统构建了晴空条件下 FY-3D MWHS-II 资料三维变分同化框架, 通过设计 118 GHz (Exp.118), 183 GHz (Exp.183) 单频段及双频段 (Exp.118+183) 组合同化试验, 系统评估了其对台风“摩羯”(2411) 的预报改进效果. 试验表明同化 MWHS-II 资料对于分析场改进效果显著, 进而对台风强度、路径和降水的预报也产生了积极影响. 在路径预报方面, 118 GHz 与 183 GHz 单频段同化对台风路径的预报误差分别改进了 17.18% 和 13.39%, 其中洋面区域 183 GHz 同化后的路径预报改进率达 14.59%, 118 GHz 通道同化和双频段联合同化的台风路径的预报误差改进率分别为 8.04% 和 7.74%. 降水预报中, 同化 MWHS-II 的三组试验在最初的 24 h 预报中对中小雨 (<25 mm) 体现出较高的命中率, 118 GHz 通道在强降水 (>50 mm) 预报方面优势显著; 而 183 GHz 通道的预报效果在 24 h 后开始显现, 同时双频段联合同化方案展现出全面优势, 各量级降水

FSS 评分均高于控制试验.

FY-3D MWHS-II 的 118 GHz 和 183 GHz 频段在不同的预报因素上表现出优势, 而双频段联合同化通过融合温度和湿度探测信息, 有效改善了台风的路径和降水预报, 优势显著, 体现了 FY-3D MWHS-II 数据的独特应用价值及应用潜力. 本研究仅针对台风“摩羯”个例开展区域晴空同化预报试验, 可为未来 FY-3 系列卫星 MWHS-II 资料在区域模式中的业务化应用提供策略参考. 然而, 不同台风的热力、动力结构及环境场配置会导致通道同化效果存在差异, 后续需通过多案例对比系统评估 MWHS-II 不同频段在晴空和全天空条件下的同化效果.

参考文献

- [1] ZHANG P, HU X Q, LU Q F, *et al.* FY-3E: the first operational meteorological satellite mission in an early morning orbit[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2022, **39**(1): 1-8
- [2] HE J Y, GUO Y, XIE X X, *et al.* Updates of microwave humidity sounder from FengYun-3A to 3F satellites[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2024, **21**: 4501405
- [3] ZHANG Shengwei, LI Jing. “FY-3” satellite MWHS[J]. *High-Technology & Commercialization*, 2013, **19**(11): 79-80 (张升伟, 李靖. “风云三号”卫星微波湿度计[J]. *高科技与产业化*, 2013, **19**(11): 79-80)
- [4] HE Jieying, ZHANG Shengwei, WANG Zhenzhan, *et al.* Prospects for microwave atmospheric sounding of the new generation of Fengyun meteorological satellites[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1025-1035 ((何杰颖, 张升伟, 王振占, 等. 风云气象卫星微波大气探测回顾与展望[J]. *空间科学学报*, 2023, **43**(6): 1025-1035)
- [5] DUNCAN D I, BORMANN N. On the Addition of Mi-

- crowave Sounders and NWP Skill, Including Assessment of FY-3D Sounders[R]. Reading: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2020
- [6] CARMINATI F, MIGLIORINI S. All-sky data assimilation of MWTS-2 and MWHS-2 in the Met Office global NWP system[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(10): 1682-1694
 - [7] CARMINATI F, ATKINSON N, CANDY B, *et al.* Insights into the microwave instruments onboard the Fengyun-3D Satellite: data quality and assimilation in the met office NWP system[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(8): 1379-1396
 - [8] BORMANN N, DUNCAN D, ENGLISH S, *et al.* Growing operational use of FY-3 data in the ECMWF system[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2021, **38**(8): 1285-1298
 - [9] YANG Y M, DU M B, ZHANG J. FY-3A satellite microwave data assimilation experiments in tropical cyclone forecast[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013, **19**(3): 297-304
 - [10] XU D M, MIN J Z, SHEN F F, *et al.* Assimilation of MWHS radiance data from the FY-3B satellite with the WRF Hybrid-3DVAR system for the forecasting of binary typhoons[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2016, **8**(2): 1014-1028
 - [11] CHEN K Y, CHEN Z X, XIAN Z P, *et al.* Impacts of the all-sky assimilation of FY-3C and FY-3D MWHS-2 radiances on analyses and forecasts of typhoon Hagupit[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(9): 2279
 - [12] XU D M, SHU A Q, LI H, *et al.* Effects of assimilating clear-sky FY-3D MWHS2 radiance on the numerical simulation of tropical storm ampil[J]. *Remote Sensing*, 2021, **13**(15): 2873
 - [13] XIAN Z P, CHEN K Y, ZHU J. All-sky assimilation of the MWHS-2 observations and evaluation the impacts on the analyses and forecasts of binary typhoons[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, **124**(12): 6359-6378
 - [14] HUANG L Z, XU D M, LI H, *et al.* Assimilating FY-3D MWHS2 radiance data to predict typhoon Muifa based on different initial background conditions and fast radiative transfer models[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(13): 3220
 - [15] XIAO H Y, HAN W, ZHANG P, *et al.* Assimilation of data from the MWHS-II onboard the first early morning satellite FY-3E into the CMA global 4D-Var system[J]. *Meteorological Applications*, 2023, **30**(3): e2133
 - [16] SHEN F F, YUAN X L, LI H, *et al.* Improving Typhoon Muifa (2022) forecasts with FY-3D and FY-3E MWHS-2 satellite data assimilation under clear sky conditions[J]. *Remote Sensing*, 2024, **16**(14): 2614
 - [17] LI Na, ZHAGN Shengwei, HE Jieying. Research on typhoon precipitation retrieval algorithm based on FY-3C MWHTS[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2019, **34**(5): 1091-1100 (李娜, 张升伟, 何杰颖. 基于 FY-3C MWHTS 的台风降水反演算法研究 [J]. 遥感技术与应用, 2019, **34**(5): 1091-1100)
 - [18] JU Y L, HE J Y, MA G, *et al.* Impact of the detection channels added by Fengyun Satellite MWHS-II at 183 GHz on global numerical weather prediction[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(17): 4279
 - [19] LIU K W, HE J Y, CHEN H N. Precipitation retrieval from Fengyun-3D microwave humidity and temperature sounder data using machine learning[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(4): 848
 - [20] QIN Luyao. Study on Microwave Data Assimilation of FY-3 Satellite in Cloud Environment and Its Influence on Numerical Prediction[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2023 (秦璐瑶. 云环境下风云三号卫星微波资料同化及对数值预报影响的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2023)
 - [21] MATRICARDI M, CHEVALLIER F, KELLY G, *et al.* An improved general fast radiative transfer model for the assimilation of radiance observations[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2004, **130**(596): 153-173
 - [22] ZOU X L. Atmospheric Satellite Observations: Variation Assimilation and Quality Assurance[M]. Beijing: Science Press, 2023
 - [23] BONAVITA M, ISAKSEN L, HÓLM E. On the use of EDA background error variances in the ECMWF 4D-Var[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2012, **138**(667): 1540-1559
 - [24] ZHANG P, LU Q F, HU X Q, *et al.* Latest progress of the Chinese meteorological satellite program and core data processing technologies[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, **36**(9): 1027-1045
 - [25] ZHU Guofu. Remarks on development of basic methods of atmospheric data assimilation for numerical weather prediction[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, **41**(8): 986-996 ((朱国富. 数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述 [J]. 气象, 2015, **41**(8): 986-996)
 - [26] Yang Yin, Han Wei, DONG Peiming. Overview on the Quality Control in Assimilation of AMSU Microwave Sounding Data[J]. *Meteorological Monthly*, 2011, **37**(11): 1395-1401 (杨寅, 韩威, 董佩明. AMSU 微波探测资料同化的质量控制方法概述 [J]. 气象, 2011, **37**(11): 1395-1401)
 - [27] WENG F Z, GRODY N C, FERRARO R, *et al.* Cloud liquid water climatology from the special sensor microwave/imager[J]. *Journal of Climate*, 1997, **10**(5): 1086-1098
 - [28] LIN B, MINNIS P, FAN A. Cloud liquid water path variations with temperature observed during the Surface Heat Budget of the Arctic Ocean (SHEBA) experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, **108**(D14): 4427
 - [29] WENG F Z, ZHAO L M, FERRARO R R, *et al.* Advanced microwave sounding unit cloud and precipitation algorithms[J]. *Radio Science*, 2003, **38**(4): 8068

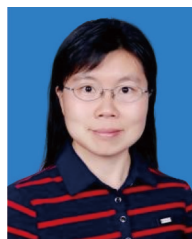
- [30] QIAN Xiaoli. Characteristics of Daily Temperature Variation and Trend of c Cloud Liquid Water Path Climate Change Based on Microwave Thermometer[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022: 26-28 (钱小立. 基于微波温度计的温度日变化特征及云水路径气候变化趋势研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022: 26-28)
- [31] AULIGNÉ T, MCNALLY A P, DEE D P. Adaptive bias correction for satellite data in a numerical weather prediction system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2007, **133**(624): 631-642
- [32] Severe Typhoon Yagi[EB/OL]. (2024-09-11)[2024-12-03]. https://baike.weixin.qq.com/v220167141.htm?scene_id=134&sid=10351723090268142305&ch=s1s (台风摩羯-百科 [EB/OL]. (2024-09-11)[2024-12-03]. https://baike.weixin.qq.com/v220167141.htm?scene_id=134&sid=10351723090268142305&ch=s1s)
- [33] HONG S Y, LIM J, OCK J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 2006, **42**(2): 129-151
- [34] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, **46**(20): 3077-3107
- [35] MLAWER E J, TAUBMAN S J, BROWN P D, *et al.* Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1997, **102**(D14): 16663-16682
- [36] HONG S Y, NOH Y, DUDHIA J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, **134**(9): 2318-2341
- [37] KAIN J S. The Kain-fritsch convective parameterization: an update[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004, **43**(1): 170-181
- [38] COURTIER P, THÉPAUT J N, HOLLINGSWORTH A. A strategy for operational implementation of 4D-Var, using an incremental approach[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1994, **120**(519): 1367-1387
- [39] DERBER J, BOUTTIER F. A reformulation of the background error covariance in the ECMWF global data assimilation system[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 1999, **51**(2): 195-221
- [40] SUN J Z, WANG H L, TONG W X, *et al.* Comparison of the impacts of momentum control variables on high-resolution variational data assimilation and precipitation forecasting[J]. *Monthly Weather Review*, 2016, **144**(1): 149-169
- [41] PARRISH D F, DERBER J C. The national meteorological center's spectral statistical-interpolation analysis system[J]. *Monthly Weather Review*, 1992, **120**(8): 1747-1763
- [42] ERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, *et al.* The ERA5 global reanalysis[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2020, **146**(730): 1999-2049
- [43] QIN L Y, CHEN Y D, MA G, *et al.* Assimilation of FY-3D MWTS-II radiance with 3D precipitation detection and the impacts on typhoon forecasts[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2023, **40**(5): 900-919
- [44] LI J, LIU G Q. Direct assimilation of Chinese FY-3C Microwave Temperature Sounder-2 radiances in the global GRAPES system[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2016, **9**(7): 3095-3113
- [45] HUFFMAN G J, STOCKER E F, BOLVIN D T, *et al.* GPM IMERG Final Precipitation L3 Day 0.1 Degree x 0.1 DegreeV06[R]. Greenbelt: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019
- [46] ROBERTS N M, LEAN H W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events[J]. *Monthly Weather Review*, 2008, **136**(1): 78-97

作者简介



冯雨萱 女, 现为中国科学院国家空间科学中心博士研究生, 主要从事微波遥感探测与定量信息处理技术研究。

E-mail: fengyuxuan22@mailsucas.ac.cn



何杰颖(通信作者) 女, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 风云三号卫星微波湿度计与海洋卫星盐度辐射计副主任设计师、空间科学(二期)预先研究项目负责人, 主要从事星载微波辐射计设计与研制、定标技术及地球与行星探测定量反演研究。

E-mail: hejieying@mirslab.cn



马刚(通信作者) 男, 现为中国气象局地球系统数值预报中心正研高工, 风云卫星工程产品生成系统和仿真系统副主任设计师、兰州大学兼职教授, 主要从事气象卫星观测资料正演仿真和卫星资料数值同化等研究。

E-mail: magang@cma.gov.cn