

沈菲菲, 闵锦忠, 李泓, 等. GPM 微波成像仪资料同化对台风“麦德姆”路径预报的影响研究[J]. 海洋学报, 2021, 43(10): 124–136, doi:10.12284/hyxb2021121

Shen Feifei, Min Jinzhong, Li Hong, et al. Effect of data assimilation of GPM microwave imager on the track forecast of Typhoon Matmo[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(10): 124–136, doi:10.12284/hyxb2021121

GPM 微波成像仪资料同化对台风“麦德姆” 路径预报的影响研究

沈菲菲^{1,2,4}, 闵锦忠¹, 李泓², 许冬梅^{1,3,4*}, 邢建勇⁵, 束艾青¹, 宋丽欣¹

(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. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 4. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 5. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘要: 基于中尺度数值模式 WRF 及其三维变分同化系统, 自主构建了新的探测仪器 GMI(Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager) 的同化模块。本文以 2014 年太平洋台风季中台风“麦德姆”为例, 实现了 GMI 资料在登陆台风中的有效应用。试验结果表明: 晴空条件下 GMI 资料同化能够对模式背景场中的台风位置进行有效修正。与没有同化该资料的控制试验相比, 同化 GMI 微波成像仪资料可以有效改进台风暖心结构的分析, 同时使得台风涡旋环流结构增强, 并进而提高了对台风路径的预报水平。

关键词: WRF 模式; GMI 微波成像仪资料; 三维变分同化; 台风

中图分类号: P457.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)10-0124-13

1 引言

自 20 世纪 90 年代以来, 由于大气辐射传输模式、数据同化技术的迅速发展以及众多新型气象卫星的发射, 卫星观测资料已成为数值天气预报(Numerical Weather Prediction, NWP)中使用的观测资料的主要来源之一。针对卫星辐射率观测资料, 给定大气状态、卫星扫描方式和固定地表属性, 就可以通过快速辐射传输模式来获取模拟辐射率, 然后根据模拟辐射率和观测辐射率的差异对数值模式模拟背景场进行调整并获取当前大气状态的最优分析^[1]。前人的大量研究工作表明在全球^[1-9]和区域模式^[10-17]中直接同化卫星辐射率资料可以有效提高数值预报的准确性。

到目前为止, 卫星辐射率资料的直接同化已被公认为可以有效地减少数值天气预报误差。在开阔的洋面上, 常规业务观测资料相对较少, 这给人类对热带气旋的分析和预报带来一定的困难和挑战。在过去的数十年里, 很多专家学者一直致力于卫星观测资料的直接同化来有效改善对热带气旋路径和强度的预报^[18-26]。全球卫星降水计划^[27](Global Precipitation Measurement, GPM)由美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)联合发起, 旨在监测全球降水情况并有效提高天气预报的精确度。GPM 的主卫星于 2014 年 2 月 28 日发射升空, 其上搭载了星载双频测

收稿日期: 2019-04-30; 修订日期: 2019-11-23。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401008); 国家自然科学基金(G41805016, G41805070); 上海台风基金项目(TFJJ202107); 上海市优秀学术/技术带头人计划(21XD1404500); 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(SZKT201901, SZKT201904); 中国气象局沈阳大气环境研究所和东北冷涡研究重点开放实验室联合开放基金(2020SYIAE02, 2020SYIAE07)。

作者简介: 沈菲菲(1984—), 男, 副教授, 主要从事中小尺度数值模拟与资料同化研究。E-mail: ffshen@nuist.edu.cn

* **通信作者:** 许冬梅(1984—), 女, 讲师, 博士, 主要从事卫星资料同化和云参数反演研究。E-mail: dmxu@nuist.edu.cn

雨雷达 (Dual-frequency Precipitation Radar, DPR) 和一架锥形多通道 GPM 微波成像仪 (GPM Microwave Imager, GMI)。GMI 不仅继承了其上一代热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 微波成像仪 (TRMM Microwave Imager, TMI)^[28] 监测大雨到小雨的 9 个通道, 而且增加了 4 个有效监测降雪的高频通道。此外, GMI 空间分辨率是 TMI 空间分辨率的 2 倍, 相比以往的卫星降水产品具有更高的空间分辨率。

与上一代 TRMM 卫星相比, GPM 卫星的性能有了较大的改进。同时前人在卫星资料同化改进对台风的预报方面也做了大量研究并取得了令人鼓舞的研究成果。然而到目前为止, 针对新一代 GMI 微波成像仪资料在有限区域尺度下的直接同化研究工作开展还较少, 仍然有大量细节的工作有待进一步开展。因此本文拟采用美国新一代中尺度数值模式 (Weather Research and Forecasting Model, WRF) 及其三维变分同化系统 (Three Dimensional Variational Data Assimilation System, 3DVAR), 以 2014 年台风“麦德姆”为例, 考察 GMI 资料直接同化对台风“麦德姆”分析和预报的影响。

2 观测资料和同化系统

2.1 GMI 微波成像仪资料

GMI 微波成像仪是 NASA 与 JAXA 联合研发的无源辐射计^[27]。主要用来测量云层内的降水信息。GMI 采用锥形对地扫描方式, 扫描宽度为 885 km, 其视场为一个椭圆。另外 GMI 天线直径从其上一代 TMI 的 61 cm 提升到 1.2 m, 从而可以获取更高的空间分辨率。在探测频段方面, GMI 包含低频 (10~89 GHz) 和高频 (166~183 GHz) 共 8 个频率 13 个通道。通道 1 至 9 的频率 (10~89 GHz) 与其上一代 TMI 微波成像仪类似。其中 10 GHz 的低频通道只对液态降水较为敏感, 主要监测对流层下部的降水和水汽分布。183 GHz 的高频通道则对大气深度进行探测, 该通道对冰相态的水凝物较为敏感, 因此可以探测到小冰粒子的散射信号。GMI 的另外 4 个高频通道则用来监测小雨和降雪。GMI 不仅具有探测降水的能力, 还有将覆盖范围扩展到中纬度地区的能力。

2.2 WRFDA 同化系统

WRFDA (Weather Research and Forecasting Model Data Assimilation System) 同化系统是由美国国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 开发并维护的一个资料同化系统, 与中尺度数值模式 WRF 相匹配。它由三维变分 (3DVAR)、四

表 1 全球卫星降水计划微波成像仪传感器特性
Table 1 Global precipitation measurement microwave imager sensor characteristics

通道	频率/GHz	偏振方式	扫描点/km
1, 2	10.65	V, H	19.4×32.2
3, 4	18.7	V, H	11.2×18.3
5	23.8	V	9.2×15.0
6, 7	36.5	V, H	8.6×15.0
8, 9	89.0	V, H	4.4×7.3
10, 11	166	V, H	4.4×7.3
12	183±3	V	4.4×7.3
13	183±7	V	4.4×7.3

维变分 (Four Dimensional Variational Data Assimilation System, 4DVAR) 以及混合同化等几部分^[29] 组成。本研究工作在 WRFDA 同化系统上进行了扩展, 自主搭建了适用于 GMI 资料同化的模块。为了对新搭建的同化模块进行检验和测试, 本文采用传统的 3DVAR 同化方法, 该方法是通过代价函数 $J(x)$ 的迭代极小化来提供最佳分析场

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T \mathbf{B}^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}[(H(x) - y_0)^T \mathbf{O}^{-1}(H(x) - y_0)], \quad (1)$$

式中, x 为分析变量 (分析向量); x_b 为背景场, 一般为模式预报场; \mathbf{B} 为背景误差协方差矩阵; \mathbf{O} 为观测误差协方差矩阵^[30]; \mathbf{B}^{-1} 为 \mathbf{B} 的逆矩阵; \mathbf{O}^{-1} 为 \mathbf{O} 的逆矩阵; $y = H(x)$ 为分析变量的观测相当量^[31]。

2.3 GMI 同化模块构建

由于当前 WRFDA 同化系统不具备 GMI 微波成像仪资料的同化功能, 因此首先需要搭建针对 GMI 资料的同化模块。本文采用 CRTM (Community Radiative Transfer Model) 辐射传输模式来对 GMI 资料进行模拟计算, 从 HDF5 (Hierarchical Data Format 5) 格式的 GMI Level 1 资料中读取扫描时间、地球入射角和方位角、太阳方位角和高度角、经纬度信息、亮温值来为背景场的模拟计算亮温提供输入信息。另一方面对观测资料进行质量控制的云中液态水路径值 (Cloud Liquid Water Path, CLWP) 则从 Level 2 文件中读取。

在同化系统中, 观测资料质量控制非常重要。为了确保试验结果的正确性, 本文在沿用了一些其他卫星观测资料的质量控制方法的同时还增加了适用于 GMI 资料特有的质量控制方案。最后确定使用的

GMI 的质量控制方法包括以下几点:

(1) 在读取 GMI 观测资料时剔除异常观测值, 例如小于 50 K 和大于 550 K 的观测;

(2) 考虑到陆地地表复杂的下垫面, 本文只同化海上观测, 剔除了陆地上的观测以及海洋表面类型较为复杂的观测;

(3) 根据观测与背景模拟亮温的差异进行检验, 剔除超过特定阈值的观测(表 2);

(4) 进一步剔除偏差订正后观测残差大于 $3\sigma_0$ 的观测, σ_0 为观测标准差(表 2);

(5) 通过观测的 CLWP, 剔除 CLWP 超过阈值的观测(表 2), 其阈值参照杨春等^[32] 同一频段的设置。

(6) 由于通道 1 和通道 2(10 GHz) 受地表发射率的影响较大, 通道 8 和通道 9(89.0 GHz) 对对流降水区域比较敏感。参照杨春等^[32] 的研究, 本文只使用通道 5, 6, 7 的观测数据。

表 2 全球卫星降水计划微波成像仪通道 5, 6, 7 的观测误差、云中液态水路径值和观测残差检验阈值

Table 2 The observation errors of channel 5, 6, 7 from global precipitation measurement microwave imager, cloud liquid water path check and quality control thresholds for absolute innovation

通道	观测误差	CLWP 剔除标准	观测残差标准
5	1.60	0.25	8
6	1.18	0.10	6
7	2.67	0.10	6

本文采用 2014 年 7 月 10–25 日的 GMI 微波成像仪资料对观测误差进行统计。根据该段时间内观测亮温值和晴空模拟亮温值的差异, 计算其标准差作为观测误差^[24]。另一方面, 卫星观测资料往往会有一些系统性偏差, 所以在进行 GMI 观测资料同化前要进行偏差订正处理。通常用一些预报因子的线性组合来表示辐射率偏差:

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

式中, 该等式右边由 3 项组成: 第 1 项: $H(x)$ 为初始观测算子(偏差订正前), x 为模式状态向量; 第 2 项: β_0 为总偏差的常量部分; 第 3 项中 p_i 和 β_i 为第 i 个预报因子和偏差订正系数。等式左边: $\tilde{H}(x, \beta)$ 为修改订正过的观测算子。偏差订正系数 β 通常假设通道内相互独立, 并且可以通过变分极小化算法进行离线计算^[32], 这种方法被称为变分偏差订正(Variational Bias Cor-

rection, VarBC)^[33–34]。本研究运用 WRFDA 的 VarBC 离线计算模式, 使用 2014 年 7 月 10–25 日的 GMI 观测, 统计得到 GMI 同化初始时刻的偏差订正系数。

3 台风个例试验

3.1 个例介绍

本文以 2014 年 7 月的台风“麦德姆”为研究个例。7 月 17 日 18 时(协调世界时, 下同), “麦德姆”生成于菲律宾以东的西北太平洋洋面上(图 1)。7 月 19 日 20 时, 美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)将其升级为一级台风。7 月 23 日 00 时在台湾台东县长滨乡沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力达 14 级, 中心最低气压为 955 hPa。7 月 23 日 15 时 30 分在福建省福清市高山镇沿海登陆, 登陆时中心附近最大风力为 11 级, 中心最低气压为 980 hPa。台风登陆后减弱至热带风暴, 先向西移动, 后向偏北方向移动, 途经福建–江西–安徽–江苏; 7 月 25 日 09 时登陆山东荣成, 然后穿过山东半岛东部后进入黄海北部海面, 变性为温带气旋, 中央气象台对其停止编号。截至 2014 年 7 月 27 日 09 时, 受台风影响共有 254.3 万人受灾, 13 人死亡, 近 2 600 间房屋倒塌。台风造成的直接经济损失约 33.7 亿元。

3.2 试验设计

本文采用 WRFV3.9.1 的 ARW(Advanced Research WRF) 版本作为预报模式。模拟区域(图 2)中心在 17°N, 117.30°E, 格距为 9 km, 模式层顶气压为 10 hPa, 垂直方向为 43 层。由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 1°×1° 分辨率的再分析资料提供初边界条件。模式参数化方案包括: WSM6(WRF Single-Moment 6-Class)类方案^[35], Tiedtke 对流参数化方案^[36–37], YSU(Yonsei Uni-

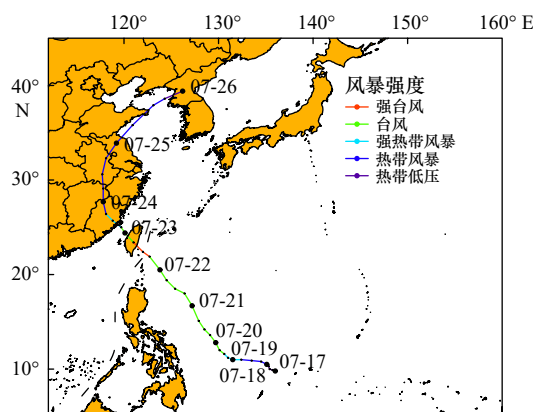


图 1 2014 年台风“麦德姆”路径

Fig. 1 The track of typhoon Matmo in 2014

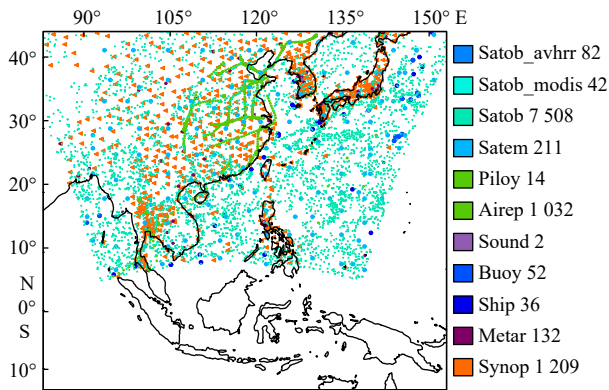


图2 2014年7月21日16时模式模拟区域的GTS观测资料水平分布

Fig. 2 The distribution of GTS observations in the simulation domain at 16:00 UTC on July 21, 2014

图右侧为观测资料名称和个观测资料的数目

The name and the counts of observations are listed on the right

versity)^[38]边界层方案, RRTMG(Rapid Radiative Transfer Model for GCMs)短波辐射和长波辐射方案^[39], unified Noah 地表模式^[40]以及 Monin-Obukhov 近地面层处理方法^[41]。

本文试验流程如下: 首先从2014年7月21日12时进行4h的spin-up预报, 然后以2014年7月21日16时的预报场作为背景场来进行同化, 随后进行72h确定性预报。试验设计分为两组: 试验一为控制试验(ctrln试验), 只同化GTS(Global Telecommunications System)常规观测资料, 其中GTS观测资料包括了飞机报、船舶报、探空报、卫星云导风资料、地面测站等常规观测资料; 图2为2014年7月21日16时模拟区域的GTS观测资料分布。试验二在试验一的基础上进一步同化了GMI资料(clear试验), 本文对

GMI资料采用90 km的稀疏化处理从而避免相邻观测之间的潜在相关性。同化中的背景误差协方差采用NMC(National Meteorological Center)方法^[30]生成, 具体做法: 对2014年7月1日至7月30日, 每天的00:00 UTC和12:00 UTC分别作24h和12h的预报, 通过对同一时刻24h和12h预报值之间的差作为预报误差的近似。控制变量包括流函数、非平衡速度势、非平衡温度、假比湿和非平衡地面气压。在统计背景误差协方差过程中, 由于采用了与流函数之间的非平衡量作为控制变量, 进一步改进变量间的平衡关系。

4 检验结果分析

4.1 GMI观测模拟

图3为2014年7月21日16时GMI通道6的观测亮温、背景场模拟亮温和分析场模拟亮温图。从图3a可以看出, 在同化窗口中共有2条扫描轨道经过, 其中从左向右的第2条轨道正好覆盖了台风“麦德姆”的部分区域, 且能发现清晰的螺旋云带, 从中国台湾南部沿海一直延伸到菲律宾海, 因此本文选取该时刻作为分析时刻, 进一步考察GMI同化对台风“麦德姆”的分析和预报改进效果^[42]; 图3b是模式背景场模拟亮温分布, 该背景场由4h spin-up预报生成。由图可以发现整个试验区有两条扫描轨道经过, 台风“麦德姆”的螺旋云带不够清晰。从背景场以及台风“麦德姆”的内核区来看, 整体量级比观测亮温要偏弱; 图3c是分析场模拟亮温分布, 可以发现台风区域模拟亮温相比图3b要更加接近于观测亮温, 表明在同化了GMI资料后的分析场与观测场更加接近。

图4a至图4c分别给出了2014年7月21日

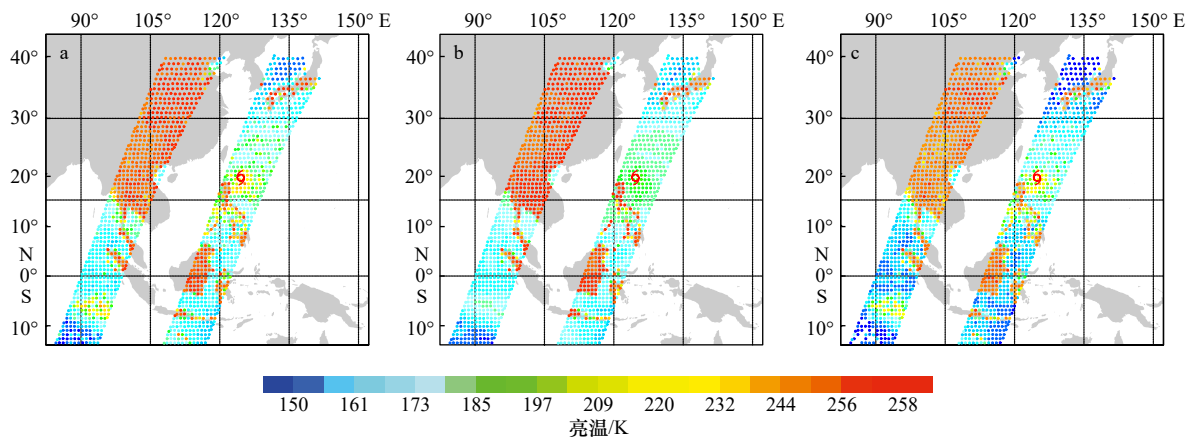


图3 2014年7月21日16时GMI通道6的观测亮温(a), 背景场亮温(b)和分析场亮温(c)

Fig. 3 The brightness temperature from the observation (a), the simulation with the background (b), and the simulation with the analysis (c) for GMI channel 6 at 16:00 UTC on July 21, 2014

16时 GMI 通道 6 偏差订正前观测亮温减去背景亮温, 偏差订正后观测亮温减去背景亮温, 以及偏差订正后观测亮温减去分析亮温分布。模拟区域有两条扫描轨道经过, 台风螺旋云带被从左向右的第 2 条轨道覆盖。图 4a 是偏差订正前观测亮温减去背景亮温分布, 可见背景场模拟亮温值相比观测亮温偏低, 在台风附近有负值亮温存在; 经过偏差订正后的观测亮温减去背景亮温分布(图 4b)与图 4a 一致, 但亮温负值区域增大, 台风螺旋云带最大亮温差值减小; 图 4c 发现经过 GMI 资料同化后的分析场模拟亮温和观测亮温整体差异减小, 大部分像素点的亮温误差小于 0.1 K。

图 5a 和图 5b 分别给出了偏差订正前后的散点分布, 图 5a 横坐标表示观测亮温值, 纵坐标表示模式背

景场通过 CRTM 观测算子模拟亮温值。从图中可以看出偏差订正前背景场模拟亮温和观测亮温在不同亮温区间有较好对应, 但绝大多数散点处于观测亮温和背景模拟亮温等值线的上方, 表明背景模拟亮温比观测亮温要高。由图 5b 发现经过偏差订正之后, 观测亮温与背景模拟亮温均匀地分布在等值线的两侧。由图 5 还可以发现均方根误差有明显的减小, 从偏差订正前的 7.340 K 减小为偏差订正后的 4.319 K。进一步说明变分偏差订正方案的合理性。图 5c 可以发现经过 GMI 同化后散点更加紧密均匀地分布在等值线两侧, 均方根误差相比图 5b(同化前)也有显著减小, 从分析前 4.319 K 减小到分析后的 0.882 K 表明分析场相比背景场要更加接近于观测。

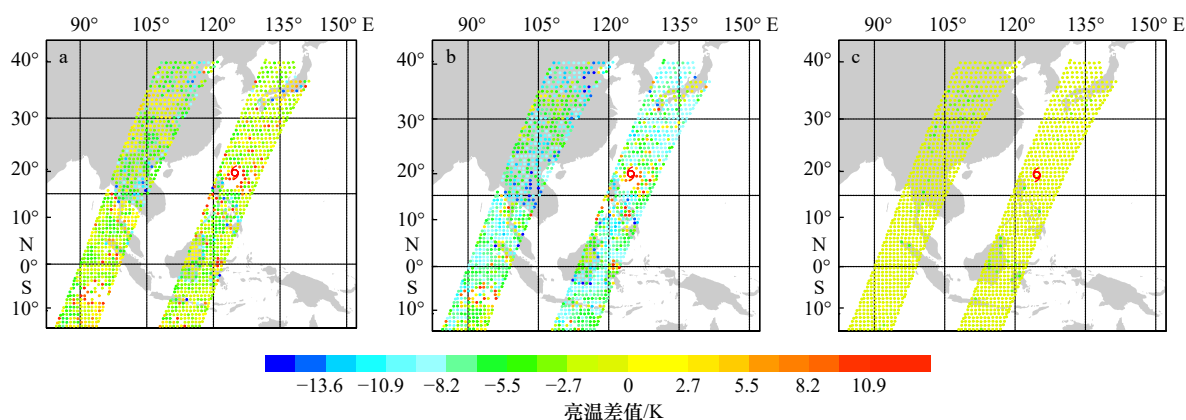


图 4 2014 年 7 月 21 日 16 时 GMI 通道 6 偏差订正前观测亮温减去背景亮温(a), 偏差订正后观测亮温减去背景亮温(b) 和偏差订正后观测亮温减去分析亮温(c)

Fig. 4 The observed minus the simulated brightness temperature with the background before the bias correction (a), after the bias correction (b), and the observed minus the simulated brightness temperature with the analysis (c) for GMI channel 6 at 16:00 UTC on July 21, 2014

红色台风符号为该时刻的台风最佳观测

The red typhoon symbol is the best track location of the typhoon at 16:00 UTC on July 21, 2014

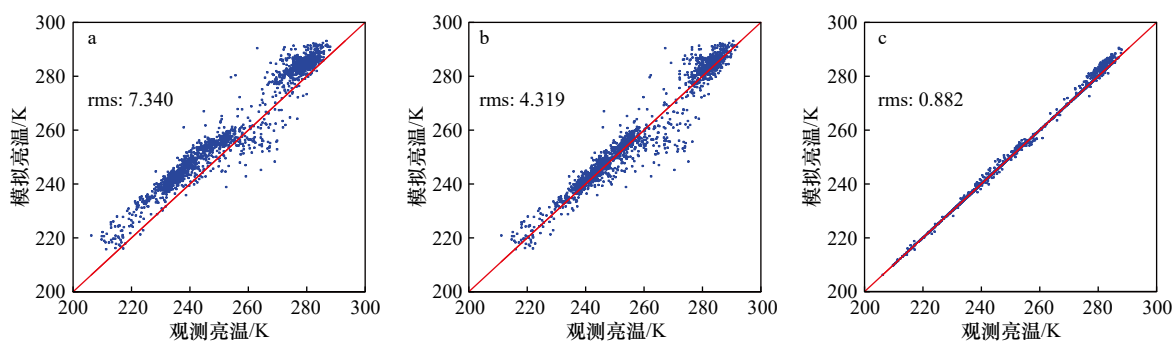


图 5 2014 年 7 月 21 日 16 时 GMI 通道 6 偏差订正前观测与背景模拟亮温(a), 偏差订正后观测与背景模拟亮温(b)和观测与分析模拟亮温(c)的散点分布

Fig. 5 The scatters of the observed and the simulated brightness temperature with the background before the bias correction (a), after the bias correction (b), and the observed and the simulated brightness temperature with the analysis (c) for GMI channel 6 at 16:00 UTC on July 21, 2014

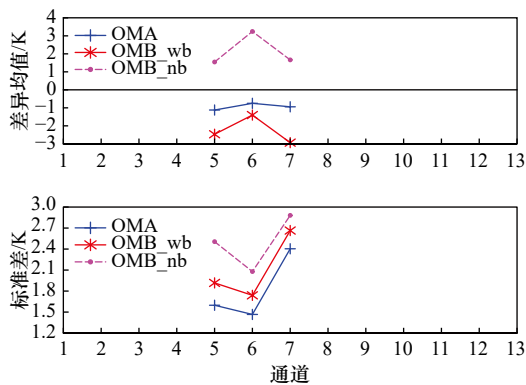


图6 2014年7月21日16时对应观测和模式的差异均值及标准差(13个通道只给出同化的3个同化结果),其中 OMB_nb: 同化前未经偏差订正; OMB_wb: 同化前经偏差订正; OMA: 同化后

Fig. 6 The mean and standard deviation of the observed minus the simulated brightness temperature with the background before the bias correction (OMB_nb), after the bias correction (OMB_wb), and with the analysis (OMA) for GMI 3 channels assimilated at 16:00 UTC on July 21, 2014 for the 3 assimilated channels of the total 13 channels

图6给出了2014年7月21日16时不同通道偏差订正前观测亮温和背景模拟亮温差值(Observation Minus Background with no bias correction, OMB_nb)、偏差订正后观测亮温和背景模拟亮温差值(Observation Minus Background with bias correction, OMB_wb)、偏差订正后观测亮温和分析模拟亮温差值(Observation Minus Analysis, OMA)的均值及标准差。由图可见偏差订正有效校正了系统误差,降低了观测残差的均值。观测残差的标准差显著降低,同化后的分析场更接近观测。其中通道5的同化效果较其他2个通道效果更好。

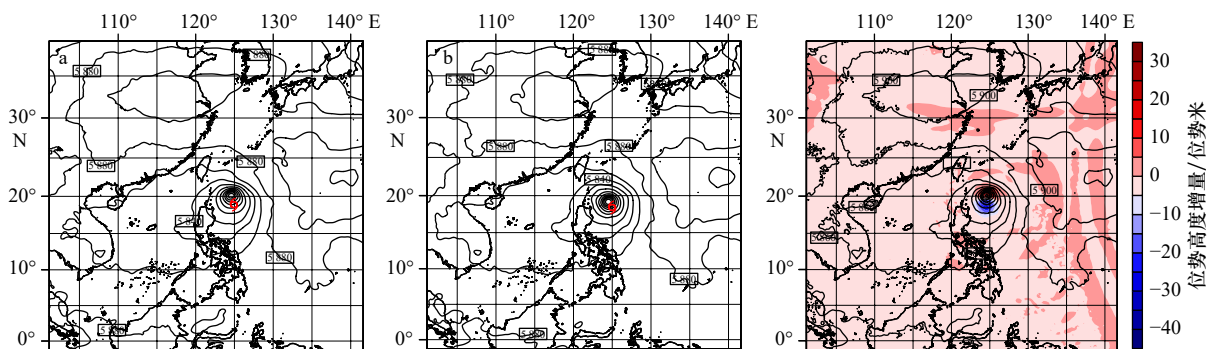


图7 2014年7月21日16时控制试验500 hPa位势高度(等值线)(a),同化试验500 hPa位势高度(等值线)(b)和500 hPa位势高度增量(等值线和阴影)(c)。图中红色台风符号为台风观测位置

Fig. 7 The 500 hPa geopotential height (contours) for the control experiment (a), the 500 hPa geopotential height (contours) for the assimilation experiment (b), and geopotential height analysis increment (contours and shaded) (c) at 16:00 UTC on July 21, 2014. The red typhoon symbol is the best track location of the typhoon

4.2 分析场和预报场诊断分析

图7给出了2014年7月21日16时同化时刻500 hPa位势高度场及其增量场^[43]。由图7a可以发现控制试验模拟的台风中心位置相比台风实况中心位置(黑色台风符号)偏北。图7b发现同化试验在分析了GMI资料后对台风中心位置进行了有效修正,与观测台风中心位置更接近,等高线也更为密集。图7c给出了同化试验中500 hPa位势高度增量场,增量场中低压中心以北位势高度增高,低压中心以南位势高度降低。从而将背景场中台风位置系统性地往南修正,进一步表明GMI资料同化可以有效修正模式背景场中台风的位置。

图8a和图8b分别是2014年7月21日16时控制试验和同化试验的500 hPa高度场和温度距平。图8c为同化试验和控制试验500 hPa温度距平的差场。图中黑色台风标识为实况台风中心。从图8a可以看出控制试验高度场等值线在菲律宾海海面上较为密集,台风中心相对实况台风中心偏北。台风内核区的温度距平较大,表明台风暖心结构明显。相比控制试验图8b为同化试验中的500 hPa高度场和温度距平。与控制试验相比高度场等值线在菲律宾海海面上更加密集,进一步表明台风强度增强,与实际台风强度发展更为相似。此外高度场中等值线的中心区域也向南进行修正,把控制试验中的台风位置系统性地往南修正,表明GMI资料同化可以有效地修正模式控制试验中台风的位置。台风内核区的温度距平梯度较控制试验更大,说明GMI资料同化可以有效地增强台风暖心结构。从图8c可以发现GMI观测轨道附近两组试验有显著的温度距平差异,在台风中心附近同化试验的距平高于控制试验。

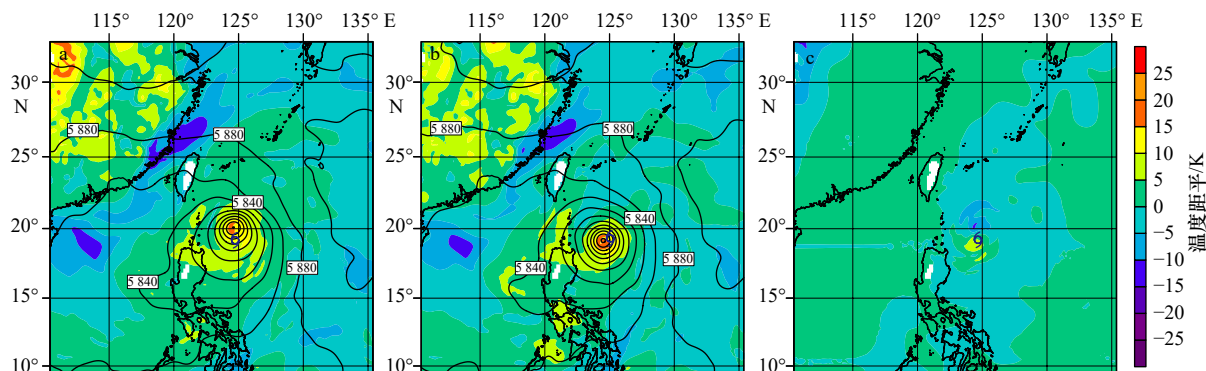


图 8 2014 年 7 月 21 日 16 时 500 hPa 高度场和温度距平控制试验(a), 同化试验(b), 同化试验和控制试验差场(c)。图中蓝色台风符号为台风观测位置

Fig. 8 The geopotential height and the temperature anomaly at 500 hPa for the control experiment (a), the assimilation experiment (b), the difference between the assimilation experiment and control experiment (c). The blue typhoon symbol is the best track location of the typhoon at 16:00 UTC on July 21, 2014

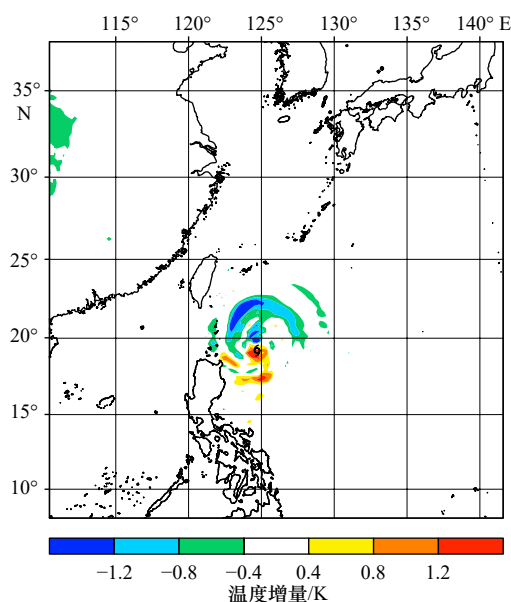


图 9 2014 年 7 月 21 日 16 时 850 hPa 温度增量。图中黑色台风符号为台风观测位置

Fig. 9 The 850 hPa temperature increments at 16:00 UTC July 21, 2014. The black typhoon symbol represent the observed location of typhoon

图 9 给出了 850 hPa 温度增量场, 可以发现温度增量主要集中在台风涡旋内核区及其附近区域, 在台风中心位置(黑色台风标识)产生一个正的温度增量, 并且在台风眼壁和外围雨带部分呈螺旋状分布。从物理机制上来说, 一个正在增强的台风涡旋环流结构应当伴随有涡旋暖核中心逐渐变暖加深的趋势。这也说明 GMI 亮温观测的直接同化有效改进了台风暖核结构, 而台风北侧的负温度增量往往是由于三维变分满足静力平衡约束所产生。

图 10 给出的是在 2014 年 7 月 21 日 16 时控制试

验和同化试验的海平面气压和近地面风场合成示意图以及两者的差场。此时日本气象厅发布的最佳路径数据集中的最佳观测数据强度为 965 hPa, 最大风速为 38 m/s。由图 10a 可以发现, 控制试验在同化了 GTS 常规观测资料之后可以较好地模拟出台风的涡旋结构。控制试验分析的最小海平面气压 (Minimum Sea Level Pressure, MSLP) 为 972 hPa, 而 JMA 观测的台风中心强度为 965 hPa; JMA 观测的近地面最大风速 (Maximum Surface Wind, MSW) 为 38 m/s, 而控制试验分析的 MSW 为 33 m/s。由图 10b 可以发现, 同化试验在加入 GMI 资料之后, 台风涡旋眼墙区的结构更好地组织和发展起来, 并且在台风内核区的风速要大于控制试验台风内核区的风速, 其分析的 MSLP (MSW) 为 969 hPa (35 m/s), 与实况 (965 hPa, 38 m/s) 更为接近。这里值得指出的是, 虽然同化试验在加入了 GMI 资料后对台风强度有了一定的改进和增强作用, 但是与观测强度 (965 hPa, 38 m/s) 仍然存在一定差距。这主要是由于 3DVAR 试验采用的是各向同性的静态背景误差协方差, 其中的风场和地表气压的多变量相关关系较弱。图 10c 是同化试验和控制试验的海平面气压和近地面风场合成的差场, 由图可以发现台风中心北部海平面气压增高, 南部海平面气压降低, 从而把背景场中的台风位置系统性地往南修正。

图 11 给出的是在 2014 年 7 月 21 日 16 时控制试验和同化试验的近海平面风场以及两者差场示意图。由图 11a 可以看出控制试验模拟的台风内核区风速较强, 可以看见清晰的台风螺旋云带^[43]。图 11b 和图 11c 分别是同化试验模拟的近海平面风场以及两者的差场, 可以明显地看出台风内核区流线相比控制试验更加密集, 风速有所增加。其中大于 20 m/s 的

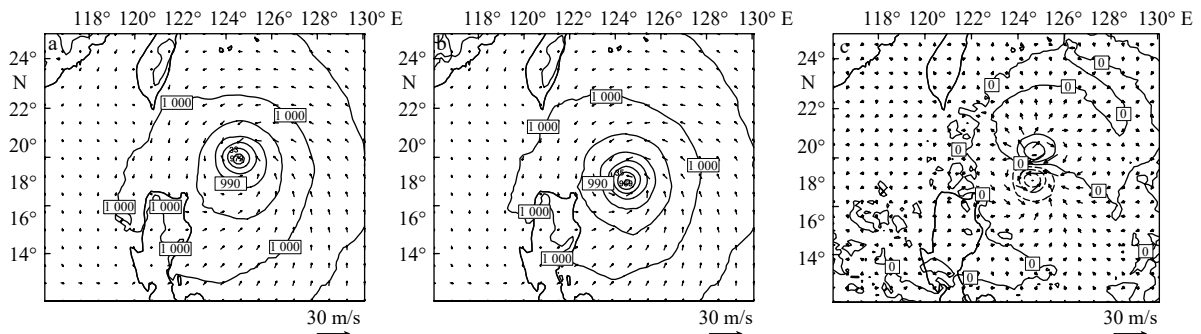


图 10 2014 年 7 月 21 日 16 时海平面气压(等直线, 单位: hPa)和近地面风速(矢量箭头, 单位: m/s)控制试验(a), 同化试验(b)和同化试验和控制试验差场(c)

Fig. 10 The sea level pressure (counters, unit: hPa) and surface wind speed (arrow, unit: m/s) for the control experiment (a), the assimilation experiment (b), and the difference between the assimilation experiment and control experiment (c) at 16:00 UTC on July 21, 2014

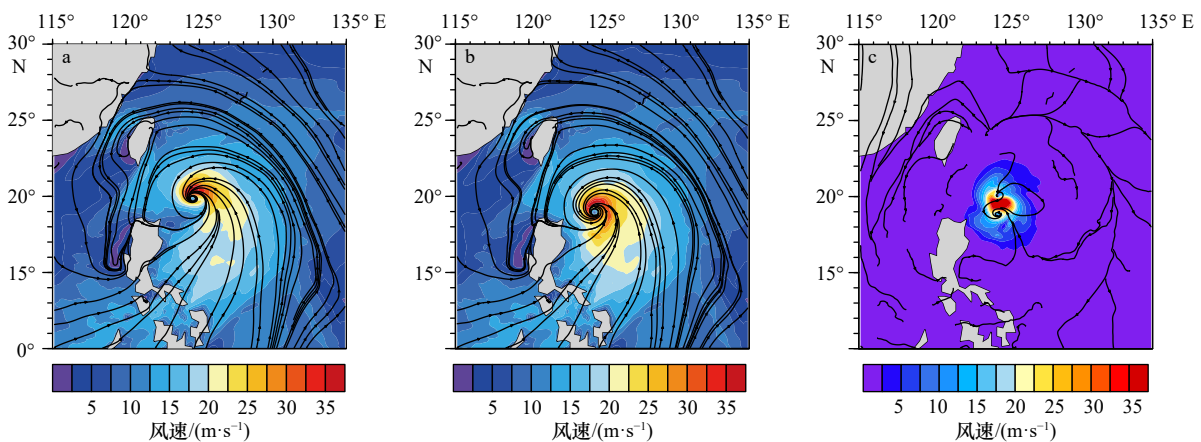


图 11 2014 年 7 月 21 日 16 时近海平面风场(流线和阴影)控制试验(a), 同化试验(b)和同化试验和控制试验差场(c)

Fig. 11 The surface wind (stream and shaded) for the control experiment (a), the assimilation experiment (b), and the difference between the assimilation experiment and control experiment (c) at 16:00 UTC on July 21, 2014

螺旋云带区域也显著增大。由此表明 GMI 资料同化对台风内核区风速修正有正效果。

为了进一步检验 GMI 资料同化对台风垂直结构的影响, 图 12 给出了控制试验和同化试验分析的经过台风中心东西向垂直剖面图。图 12a 可以看出在台风眼区存在一个静风区, 台风眼相对较宽。在台风中心静风区的两侧出现对称的大风区, 最大风速达到 32 m/s 且位于边界层内。与控制试验相比, 同化试验的台风眼更窄(图 12b)。台风眼外围的云墙区也呈现出对称结构, 台风眼右侧云墙强度要比左侧云墙强度大。由图还可以发现同化试验右侧大风区最大风速高度比控制试验右边大风区最大风速高度要高约 3 km。

台风的暖心结构可以通过温度距平的垂直剖面图来分析, 从图 13 可以发现两组试验均分析出了台风的暖心结构, 但同化试验的暖心结构更强。控制试验模拟的台风暖心结构最大温度距平为 1.2 K, 出现

在 500 hPa 左右; 而同化试验模拟的台风暖心结构最大温度距平为 3.5 K, 出现在 600 hPa 左右。与控制试验(图 13a)温度距平最大值相差 2.3 K。另外值得注意的是同化试验的正温度距平一直延伸到近地面, 贯穿整个对流层。总体来看, 同化试验分析出的暖心结构更强, 更利于台风的发展加强。进一步表明 GMI 资料同化有利于台风暖心结构的增强。

图 14 为 2014 年 7 月 23 日 12 时的 500 hPa 高度场和风场合成示意图。由图可见同化 GMI 资料后副高西侧边缘的南风风量较控制试验要大, 东风风量要小。同化试验和控制试验的引导气流的差异直接导致了台风路径预报的差异。同化试验模拟的台风路径更易往东北方向移动, 而控制试验模拟的台风路径更容易往西侧移动。

4.3 台风路径预报检验

为了进一步评估 GMI 资料同化对台风“麦德姆”预报效果的影响, 本文以 7 月 21 日 16 时为起始时刻

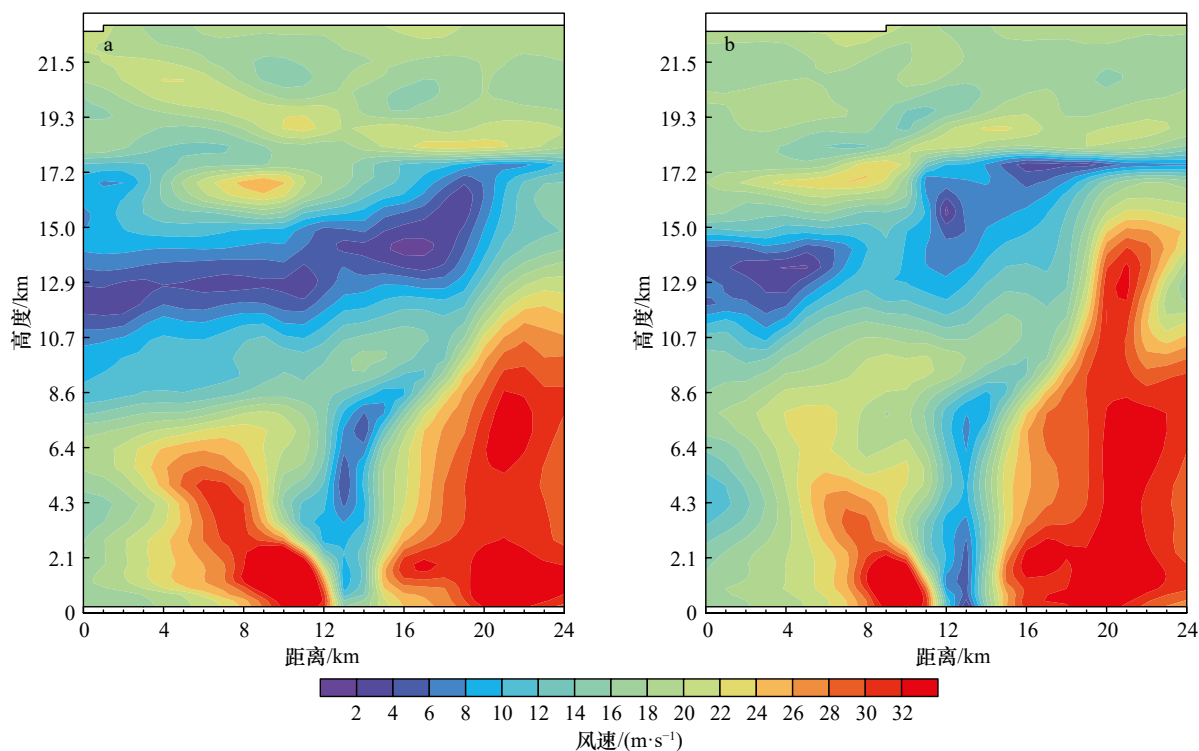


图 12 2014 年 7 月 21 日 16 时经过台风中心风速垂直剖面控制试验(a)和同化试验(b)

Fig. 12 Vertical cross sections of analyzed horizontal wind speed for control experiment (a) and the assimilation experiment (b) at 16:00 UTC on July 21, 2014

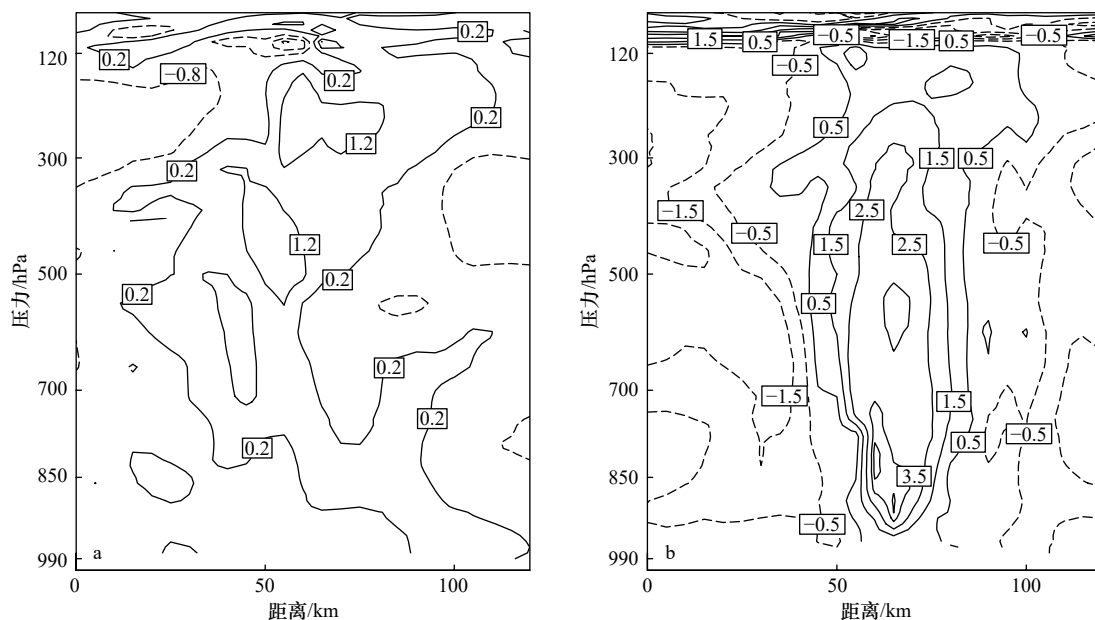


图 13 2014 年 7 月 21 日 16 时温度距平(单位: K)垂直剖面控制试验(a)和同化试验(b)

Fig. 13 Vertical cross sections of analyzed temperature anomalies (unit: K) for control experiment (a) and the assimilation experiment (b) at 16:00 UTC on July 21, 2014

作 72 h 确定性预报^[43]。图 15a 为台风“麦德姆”路径预报效果图。图中 clear、cntl 和 best track 分别表示晴空 GMI 辐射率资料同化试验,控制试验和日本气象厅的最佳台风路径。在预报起始 12 h 内两组试验预

报的路径误差相对较小(<30 km),但在第 18 h 后,台风“麦德姆”的最佳观测路径出现了一个小的转折,即向西北的一个转折;值得指出的是在起始预报的第 12~24 h 区间内,同化试验预报的路径相比控制试验

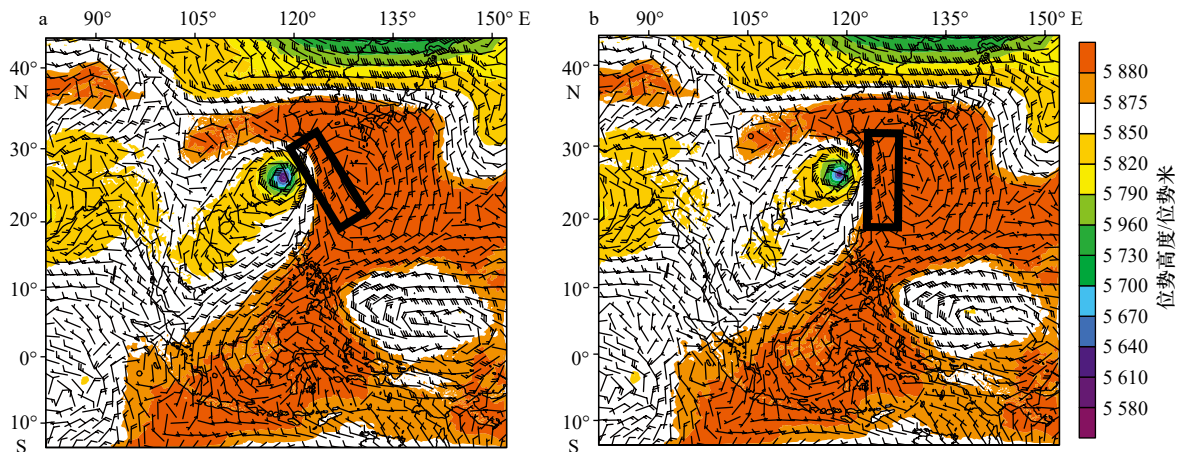


图 14 2014 年 7 月 23 日 12 时 500 hPa 高度场(阴影)和风场(矢量)控制试验(a)和同化试验(b)

Fig. 14 The geopotential height (shaded) and wind (vectors) at 500 hPa at 12:00 UTC on July 23, 2014, control experiment (a) and the assimilation experiment (b)

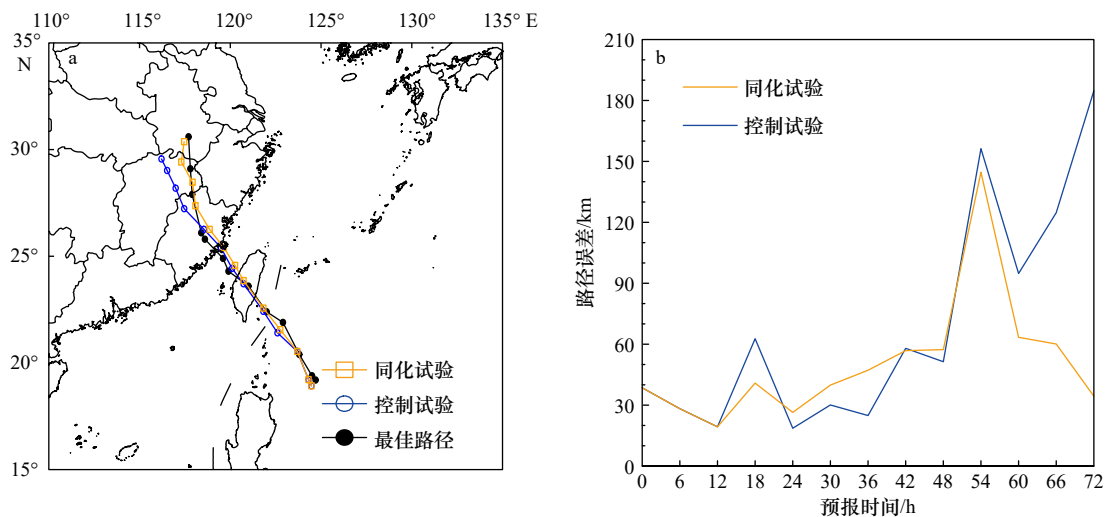


图 15 2014 年 7 月 21 日 16 时起始的 72 h 预报路径(a)和预报路径误差(b)

Fig. 15 The 72-hour predicted tracks (a) and track errors (b) initialized from 16:00 UTC on July 21, 2014

要更加地接近于实际观测路径。在预报的第 54 h, 台风“麦德姆”的最佳观测路径又出现了向东北的一个转折。同化试验较好地模拟出了台风“麦德姆”的最后 18 h 的路径转折。这说明当前模式背景场上的大尺度环流结构相对还是比较合理的。总体而言, 在 72 h 的确定性预报过程中同化试验预报的台风路径相比控制试验要更加接近观测。图 15b 为两组试验预报的台风路径误差, 从图中可以看出同化试验在预报的 0~24 h 和 48~72 h 预报误差要明显小于控制试验的预报误差。在整个 72 h 的确定性预报中, 控制试验和同化试验预报的路径平均误差分别为 70 km 和 41 km。

5 结论

本文使用中尺度数值模式 WRFV3.9.1 及其三维

变分同化系统, 自主搭建了针对 GMI 资料的同化模块。考察了 GMI 资料同化对台风“麦德姆”分析和预报的影响。研究表明:

(1) 晴空条件下 GMI 资料同化能够很好地捕捉到台风“麦德姆”的形态结构, 通过 WRFDA 的 VarBC 离线模式统计得到的偏差订正系数和质量控制可以提高试验的同化效果, 使得三维变分同化后的观测残差标准差有所减小, 保证了 GMI 资料同化对台风分析和预报的正效应。

(2) 与只同化 GTS 常规观测资料的控制试验相比, GMI 资料同化试验可以有效地增加台风“麦德姆”内核区的暖心结构, 且具有对模式背景场中的台风位置进行系统性的修正作用。

(3) 从 72 h 确定性预报效果来看, GMI 资料同化试验预报的台风路径平均误差为 41 km, 相比控制实

验预报的台风路径平均误差 70 km 有所改进,与观测的台风路径更加接近。

本文的研究结果表明,将 GMI 资料同化到 WRF 模式中,对提高台风路径预报具有很大潜力,台风“麦德姆”个例研究也表明 GMI 资料能够为台风初始化分析和预报提供正效果。另一方面,本文只同化了

GMI 晴空条件下的观测资料。因此未来的工作将针对更多的台风个例,进一步研究全空条件下的 GMI 资料同化对台风分析和预报的影响。

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与帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Derber J C, Wu W S. The use of TOVS cloud-cleared radiances in the NCEP SSI analysis system[J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 126(8): 2287–2299.
- [2] McNally A P, Derber J C, Wu W, et al. The use of TOVS level-1b radiances in the NCEP SSI analysis system[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2000, 126(563): 689–724.
- [3] Okamoto K, Derber J C. Assimilation of SSM/I radiances in the NCEP global data assimilation system[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(9): 2612–2631.
- [4] Bauer P, Lopez P, Benedetti A, et al. Implementation of 1D+4D-Var assimilation of precipitation affected microwave radiances at ECMWF. I: 1D-Var[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2006, 132(620): 2277–2306.
- [5] Miyoshi T, Sato Y. Assimilating satellite radiances with a local ensemble transform Kalman filter (LETKF) applied to the JMA global model (GSM)[J]. *SOLA*, 2007, 3: 37–40.
- [6] Sakamoto M, Christy J R. The influences of TOVS radiance assimilation on temperature and moisture tendencies in JRA-25 and ERA-40[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2009, 26(8): 1435–1455.
- [7] Goerss J. Impact of satellite observations on the tropical cyclone track forecasts of the navy operational global atmospheric prediction system[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 137(1): 41–50.
- [8] Aravéquia J A, Szunyogh I, Fertig E J, et al. Evaluation of a strategy for the assimilation of satellite radiance observations with the local ensemble transform Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(6): 1932–1951.
- [9] Hoppel K W, Eckermann S D, Coy L, et al. Evaluation of SSMIS upper atmosphere sounding channels for high-altitude data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(10): 3314–3330.
- [10] Zou Xiaolei, Qin Zhengkun, Weng Fuzhong. Improved coastal precipitation forecasts with direct assimilation of GOES-11/12 imager radiances[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(12): 3711–3729.
- [11] Liu Zhiqian, Schwartz C S, Snyder C, et al. Impact of assimilating AMSU-A radiances on forecasts of 2008 Atlantic tropical cyclones initialized with a limited-area ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(12): 4017–4034.
- [12] Qin Zhengkun, Zou Xiaolei, Weng Fuzhong. Evaluating added benefits of assimilating GOES imager radiance data in GSI for coastal QPFs[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(1): 75–92.
- [13] Zhang Man, Zupanski M, Kim M J, et al. Assimilating AMSU-A radiances in the TC core area with NOAA operational HWRF (2011) and a hybrid data assimilation system: Danielle (2010)[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(11): 3889–3907.
- [14] Zhang S Q, Zupanski M, Hou A Y, et al. Assimilation of precipitation-affected radiances in a cloud-resolving WRF ensemble data assimilation system[J]. *Monthly Weather Review*, 2013, 141(2): 754–772.
- [15] Kazumori M. Satellite radiance assimilation in the JMA operational mesoscale 4DVAR system[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(3): 1361–1381.
- [16] Wang P, Li J, Goldberg M D, et al. Assimilation of thermodynamic information from advanced infrared sounders under partially cloudy skies for regional NWP[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, 120(11): 5469–5484.
- [17] Lin Haidao, Weygandt S S, Benjamin S G, et al. Satellite radiance data assimilation within the hourly updated rapid refresh[J]. *Weather and Forecasting*, 2017, 32(4): 1273–1287.
- [18] 郭云霞, 侯一筠, 齐鹏. Monte-Carlo模拟与经验路径模型预测台风极值风速的对比[J]. *海洋学报*, 2020, 42(7): 64–77.
Guo Yunxia, Hou Yijun, Qi Peng. Comparison of extreme wind speeds predicted by Monte-Carlo simulation and empirical track model[J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(7): 64–77.
- [19] 沈菲菲, 唐超, 许冬梅, 等. 基于不同背景场条件的雷达资料同化在登陆台风“桑美”中的应用研究[J]. *海洋学报*, 2021, 43(1): 69–81.
Shen Feifei, Tang Chao, Xu Dongmei, et al. Experiment of assimilating Doppler radar data in Typhoon Saomai based on the different initial conditions[J]. *Haiyang Xuebao*, 2021, 43(1): 69–81.
- [20] 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: 1–18.
- [21] Zou X, Weng F, Zhang Banglin, et al. Impacts of assimilation of ATMS data in HWRF on track and intensity forecasts of 2012 four landfall hurricanes[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(20): 11558–11576.
- [22] Zhang Hailing, Pu Zhaoxia. Influence of assimilating surface observations on numerical prediction of landfalls of Hurricane Katrina

- (2005) with an ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(8): 2915–2934.
- [23] Yang Chun, Liu Zhiqian, Bresch J, et al. AMSR2 all-sky radiance assimilation and its impact on the analysis and forecast of Hurricane Sandy with a limited-area data assimilation system[J]. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 2016, 68(1): 30917.
- [24] Xu Dongmei, Min Jinzhong, Shen Feifei, 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.
- [25] Wu Tingchi, Zupanski M, Grasso L D, et al. The GSI capability to assimilate TRMM and GPM hydrometeor retrievals in HWRF[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2016, 142(700): 2768–2787.
- [26] Hou A Y, Kakar R K, Neeck S, et al. The global precipitation measurement mission[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2014, 95(5): 701–722.
- [27] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1998, 15(3): 809–817.
- [28] Barker D, Huang Xiangyu, Liu Zhiqian, et al. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(6): 831–843.
- [29] 张卫民, 朱小谦, 赵军. 气象资料三维变分同化阶段区域分解并行实现[J]. *计算机研究与发展*, 2005, 42(6): 1059–1064.
Zhang Weimin, Zhu Xiaoqian, Zhao Jun. Implementation of phase domain decomposition parallel algorithm of three dimensional variational data assimilation[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(6): 1059–1064.
- [30] 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.
- [31] Migliorini S. On the equivalence between radiance and retrieval assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(1): 258–265.
- [32] 杨春, 闵锦忠, 刘志权. 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*, 2017, 41(2): 372–384.
Yang Chun, Min Jinzhong, Liu Zhiqian. The impact of AMSR2 radiance data assimilation on the analysis and forecast of typhoon son-tinh[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, 41(2): 372–384.
- [33] Dee D. Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system[C]//Proceedings of ECMWF Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP. Reading, United Kingdom: ECMWF, 2004: 97–112.
- [34] 刘志权, 张凤英, 吴雪宝, 等. 区域极轨卫星ATOVS辐射偏差订正方法研究[J]. *气象学报*, 2007, 65(1): 113–123.
Liu Zhiqian, Zhang Fengying, Wu Xuebao, et al. A regional ATOVS radiance-bias correction scheme for radiance assimilation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(1): 113–123.
- [35] Hong S Y, Lim J O J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6)[J]. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 2006, 42(2): 129–151.
- [36] Tiedtke M. A comprehensive mass flux scheme for cumulus parameterization in large-scale models[J]. *Monthly Weather Review*, 1989, 117(8): 1779–1800.
- [37] Zhang Chunxi, Wang Yuqing, Hamilton K. Improved representation of boundary layer clouds over the southeast Pacific in ARW-WRF using a modified Tiedtke cumulus parameterization scheme[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(11): 3489–3513.
- [38] 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.
- [39] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13103.
- [40] Chen Fei, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 569–585.
- [41] Jiménez P A, Dudhia J, González-Rouco J F, et al. A revised scheme for the WRF surface layer formulation[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140: 898–918.
- [42] 张爱忠, 齐琳琳, 纪飞, 等. 资料同化方法研究进展[J]. *气象科技*, 2005, 33(5): 385–389, 393.
Zhang Aizhong, Qi Linlin, Ji Fei, et al. Advancement in data assimilation method research[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2005, 33(5): 385–389, 393.
- [43] Wang Xuguang. Application of the WRF Hybrid ETKF-3DVAR data assimilation system for hurricane track forecasts[J]. *Weather and Forecasting*, 2011, 26(6): 868–884.

Effect of data assimilation of GPM microwave imager on the track forecast of Typhoon Matmo

Shen Feifei^{1,2,4}, Min Jinzhong¹, Li Hong², Xu Dongmei^{1,3,4}, Xing Jianyong⁵, Shu Aiqing¹, Song Lixin¹

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 3. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 4. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 5. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081, China)

Abstract: The interface of assimilating radiance on a new satellite sensor GMI (Global Precipitation Measurement (GPM) microwave imager) was constructed in the framework of the mesoscale numerical model WRF (Weather Research and Forecasting Model) and its three-dimensional variational assimilation system (3DVAR). The assimilation of GMI radiance data is applied for the typhoon system based on the case of typhoon Matmo in the Pacific typhoon season in 2014 before its landing. The results show that, after assimilating the GMI radiance data under the clear sky condition, the typhoon position in the background of the model is effectively corrected. The GMI data are able to improve the warm core structure of the typhoon when compared with the control experiment without assimilation and enhanced the typhoon vortex circulation structure at the same time. Data assimilating of GMI data further improves the forecast skills of the typhoon track.

Key words: Weather Research and Forecasting Model; GMI (GPM microwave imager); three-dimensional variational assimilation; typhoon