

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, doi:10.12284/hyxb2021075

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, doi:10.12284/hyxb2021075

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

沈菲菲^{1,2,3}, 唐超^{1,4}, 许冬梅^{1,2,3*}, 李泓⁵, 刘瑞霞⁶

(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. 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 3. 中国气象局沈阳大气环境研究所, 辽宁 沈阳 110166; 4. 云南省维西傈僳族自治县气象局, 云南 维西 674400; 5. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 6. 国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 本文针对 2006 年登陆我国的超强台风“桑美”, 分别采用美国国家环境预报中心的全球预报系统 (Global Forecasting System, GFS) 再分析资料和日本气象厅 (Japan Meteorological Agency, JMA) 区域客观再分析资料作为背景场, 利用中尺度数值模式 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 及其三维变分同化系统进行多普勒雷达资料同化和数值模拟试验, 考察不同的背景场条件下雷达资料同化对台风初始场、内部结构及其随后确定性预报的影响。结果表明: GFS 试验和 JMA 试验在同化了雷达资料之后分析出的台风 700 hPa 风场和 500 hPa 高度场相比其初始场均有所增强, JMA 试验在 3 h 同化窗内的均方根误差和最小海平面气压的改进效果均比 GFS 试验显著, 同时对台风动力和热力结构的改进效果也优于 GFS 试验; JMA 试验对台风降水、路径、强度的预报均优于 GFS 试验, 且能预报出台风前沿的降水, 更加接近观测实况。

关键词: 背景场; 资料同化; WRF 模式; 雷达径向风

中图分类号: P457.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)01-0069-13

1 引言

台风是热带洋面上生成并发展的涡旋系统, 我国东部沿海地区靠近西太平洋且海岸线较长, 台风登陆次数多, 影响范围大, 从而使其成为世界上受台风破坏最为严重的国家之一^[1]。台风登陆虽然能带来丰富的降水, 补给水资源, 但同样会带来狂风、暴雨、风暴潮等自然灾害, 甚至会引发城市内涝、房屋坍塌、通信中断等次生灾害。为了使沿海地区居民的生命财产安全得到保障, 降低因台风破坏造成的经济损失,

提高台风移动路径、强度和登陆位置的预报准确度就变得至关重要。

近年来, 通过同化多普勒雷达资料来改善对我国近海登陆台风的预报已取得很大进展。陈锋等^[2]利用 WRF (Weather Research and Forecasting Model) 模式及其三维变分同化系统进行雷达资料同化试验, 发现同化雷达径向风资料可以调整台风的初始风场, 提高台风路径、降水的预报准确度, 且同化效果的提升可以通过提高同化频次来实现。李新峰^[3]将雷达径向风资料加入到 ARPS (The Advanced Regional Prediction

收稿日期: 2019-10-23; 修订日期: 2019-12-06。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (G41805070, G41805016); 国家重点研发计划项目 (2018YFC1506404, 2018YFC1506603); 高原与盆地暴雨旱涝灾害四川省重点实验室开放研究基金项目 (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课题项目 (2020SYIAE07, 2020SYIAE02)。

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。E-mail: fshen@nuist.edu.cn

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

System)模式进行同化试验,结果表明,雷达资料同化可以改进台风内核区的结构,进而提高 12 h 台风的强度、结构、路径和降水的预报能力,加入雷达反射率因子资料对降水预报的改进更显著,同时预报误差会随着同化次数的增加而降低。王明筠^[4]研究 T-TREC (Typhoon-Tracking Radar Echo by Correlation)反演风循环同化对台风预报效果的影响,结果表明,由于反演风的风场信息更为完整,其对台风强度、路径的预报效果更佳。沈菲菲等^[5]通过同化双多普勒雷达资料研究对飓风“艾克”预报的改进效果,结果表明,经过尺度化因子的调整之后的雷达径向风同化能够在飓风中心产生较为合理的气旋性增量,提供更为确切的中小尺度信息,同时能改进对飓风初始场、结构、强度和路径的预报。李昕等^[6]利用集合-变分混合同化方法联合同化雷达径向速度观测和反演风资料,研究发现,联合同化能改进台风强度和环流结构的预报,同时能改进确定性预报时效,且随着同化次数的增加,台风的环流结构能得到持续改善。冯佳宁等^[7]使用集卡尔曼滤波法研究同化雷达径向速度资料对台风数值模拟的改进效果,结果表明,雷达资料同化能降低预报误差,使预报的台风强度和路径更加接近实况,同时发现同化效果主要受台风内核 100 km 范围内雷达资料的影响。沈菲菲等^[8]和 Shen 等^[9]对台风“桑美”进行混合同化试验,研究发现 En3DVAR (Ensemble three-Dimensional Variational Data Assimilation System)同化能提供“流依赖”的集合协方差信息,可以较好修正背景场上台风的位置,同时对台风路径和强度预报的改进效果也要优于变分同化试验。戚佩霓等^[10]运用 WRF 模式及 WRF-3DVAR 进行试验研究雷达径向风同化对台风分析和预报的影响,发现台风的初始场以及台风涡旋结构在同化雷达资料后能够得到调整,进而提高了 18 h 的预报效果。以上研究结果表明,雷达资料同化对台风结构、强度和路径预报具有较大的改进作用。

然而目前绝大多数的中尺度数值模式运行的初始场通常是由常规报文资料对全球模式预报场或者分析场进行客观分析所提供。不同数值模式的预报场(分析场)之间有差异,为中尺度模式提供的背景场就不同,从而必将影响中尺度模式的预报效果。刘青松等^[11]分别利用 T₁511L60 模式预报场和美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)预报场作为模式背景场资料,分析了不同背景场同化雷达资料对北京地区一次强对流天气过程预报效果的改善情况,研究结果表明同化前 T₁511L60

模式预报场的预报质量优于 NCEP 预报场的预报质量,使用 T₁511L60 模式预报场作为背景场同化雷达资料后能显著地改进对降水强度和位置的预报效果,且对预报时效的改进时间更长,能改进 12 h 内的预报,而 NCEP 预报场仅能改进 6 h 内的预报。公颖和李俊^[12]比较了 T213 分析场和 AVN(Aviation)分析场作为背景场对降水预报效果的影响,结果表明,AREM (Advanced Regional Eta Model)模式使用 AVN 分析场作为背景场对降水场的预报效果和风险评分均优于 T213 分析场作为背景场的预报效果。李得勤等^[13]利用 NCEP 预报场和 T639 预报场作为背景场,分析选取不同背景场进行雷达资料同化对辽宁省一次暴雨预报效果的改进情况,结果表明,同化雷达资料均能改善初始场的湿度场和风场,0~12 h 预报结果表明,两种预报场作为背景场的雷达资料同化均能报出同化前漏报的黑山地区的降水,NCEP 资料对降水强度和强降水中心的预报更接近实况,优于 T639 的预报效果。朱红芳等^[14]使用 T213 和 NCEP FNL(Final Operational Global Analysis)资料作为背景场,通过对淮河流域的一次暴雨进行模拟,研究了 GRAPES(Global/Regional Assimilation and Prediction Enhanced System)模式对不同初始场条件的敏感程度,结果表明,T213 和 NCEP FNL 资料作为初始场存在差异较大的次天气尺度的特征,并造成了 GRAPES 模式后期模拟结果的差异。以上研究显示,不同初始场由于资料本身特性会对强对流等降水系统带来一定的差别,而在进行雷达资料同化后不同初始场带来的差异仍然存在。

过去的绝大多数研究都是探究不同背景场条件对天气尺度系统的影响,但是针对不同背景场条件对中尺度台风系统的预报效果差异的研究还比较少,因此本文选取 2006 年 8 月 10 日登陆我国的超强台风“桑美”作为个例进行试验,对比分析选取美国国家环境预报中心的全球预报系统(Global Forecasting System, GFS)再分析资料和日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)区域客观再分析资料作为背景场来同化多普勒天气雷达资料,并进一步揭示其对台风结构、降水、强度及路径预报效果的影响。探讨不同背景场条件下的雷达资料同化对台风的分析和预报的改进效果。

2 个例选取、雷达资料控制及试验设计

2.1 台风“桑美”简介

2006 年第 7 个登陆我国的台风“桑美”是近几十年来登陆我国的最强台风,具备强台风的大部分特

点: 强度强且持续时间长, 结构紧密且台风眼清晰, 降水强度大^[15-16]。2006年8月4日18:00 UTC(世界时, 下同)西太平洋洋面上有热带低压生成并于5日12:00 UTC发展为热带风暴, 编号0608, 命名为“桑美”。随后该热带风暴不断发展加强并沿西北路径移动, 于8月7日06:00 UTC发展成为台风, 之后台风的中心气压持续下降, 由955 hPa下降到915 hPa, 实现了爆发性发展, 于9日10:00 UTC进一步加强为超强台风并继续向西北方向移动。8月10日09:25 UTC超强台风“桑美”在浙江苍南马站镇登陆, 登陆时中心附近最低气压达到920 hPa, 最大风力达到17级。登陆之后由于受到地形摩擦的作用, “桑美”强度逐渐减弱, 10日15:00 UTC减弱为热带风暴, 11日23:00 UTC减弱为热带低压并停止编号。受“桑美”影响, 东南沿海地区出现了8~10级大风以及集中性强降水, 强降水中心主要出现在浙江南部和福建北部。“桑美”极强的破坏力和毁灭性给浙江和福建两省带来了巨大的经济损失以及严重的人员伤亡, 其造成的直接经济损失高达196.58亿元, 死亡人数达483人。

2.2 雷达资料的质量控制

本次同化试验使用浙江省温州市的多普勒雷达径向风观测资料, 该雷达观测可以较好地捕捉到“桑美”整个登陆过程, 为了确保同化试验使用的雷达径向风资料的可靠性, 需要对雷达资料进行去除地物杂波、退速度模糊等质量控制。本文对雷达基数据的初步质量控制使用ARPS模式中的88D2ARPS模块进行^[17-18], 进一步使用美国国家大气研究中心的Solo软件进行质量控制^[19], 对其每个仰角的观测数据都进行检查, 以去除不必要的雷达观测资料。图1a为质量控制前0.5°仰角的雷达径向速度图, 由图可见正负的径向速度混合在一起, 风场较为混乱且不连续, 不能把台风的气旋性结构特征体现出来, 说明存在较强

的速度模糊问题。通过质量控制得到了图1b, 由图可见雷达径向速度图的风场变得更加连续, 并且形成了气旋性涡旋的风场结构特征, 更加接近于实际情况。

2.3 试验设计

本文使用中尺度天气预报模式WRF, 该模式由美国国家大气研究中心、美国国家环境预报中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)、俄克拉荷马大学的风暴分析预报中心(Center for Analysis and Prediction of Storms, CAPS)等多个部门联合研发, 可应用于数值天气预报和资料同化、物理过程参数化等数值模拟研究。本研究采用WRFV4.0及其三维变分同化系统WRFDA4.0(WRF Data Assimilation)进行数值模拟和多普勒雷达资料同化, 模拟区域如图2所示, 区域中心为27°N, 121.6°E, 能够覆盖台风“桑美”强度突然增强并向西北方向移动至登陆后的路径。模式的水平方向使用Arokawa-c网格, 水平格点数为501×501, 格距为4 km, 模式顶层气压50 hPa, 垂直方向分为43层。模式参数化方案: 微物理过程采用WDM6(WRF Double-Moment 6-Class)方案^[20]; 积云参数化方案采用Grell Dévényi方案^[21]; 长波和短波辐射方案分别使用RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)方案^[22]和Dudhia方案; 其他参数化方案还包括YSU(Yonsei University)边界层方案^[23]、Noah陆面方案。

为了能够对比研究不同背景场条件对多普勒雷达资料同化的影响, 本文选取了2种背景场资料。第一种是GFS资料, 该资料由美国国家环境预报中心和美国国家大气研究中心联合制作, 其采用了当今最先进的全球资料同化系统和完善的数据库, 对各种来源(地面、船舶、无线电探空、测风气球、飞机、卫星等)的观测资料进行质量控制和同化处理, 获得了一套完整的再分析资料集, 它不仅包含的要素多、范围

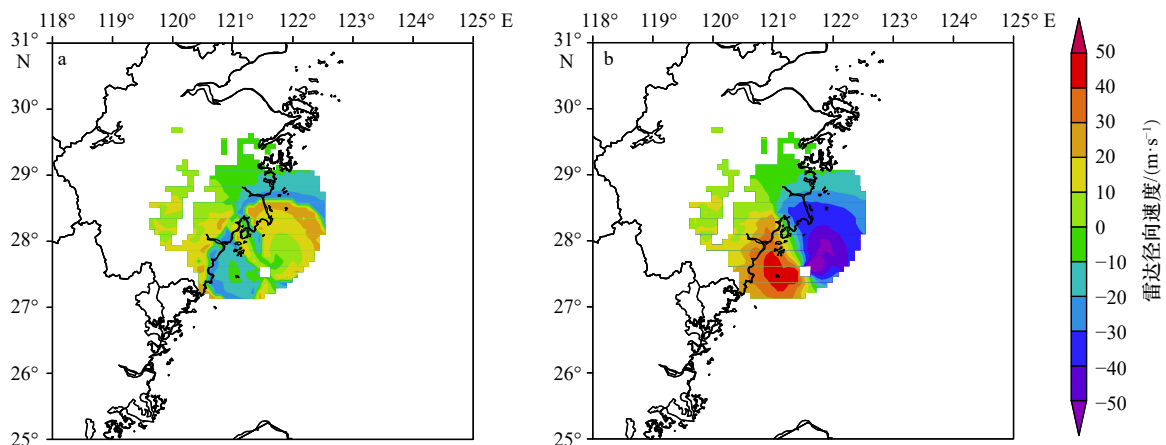


图1 质量控制前(a)和质量控制后(b)雷达径向速度对比

Fig. 1 Comparison of radar velocity before (a) and after (b) quality control

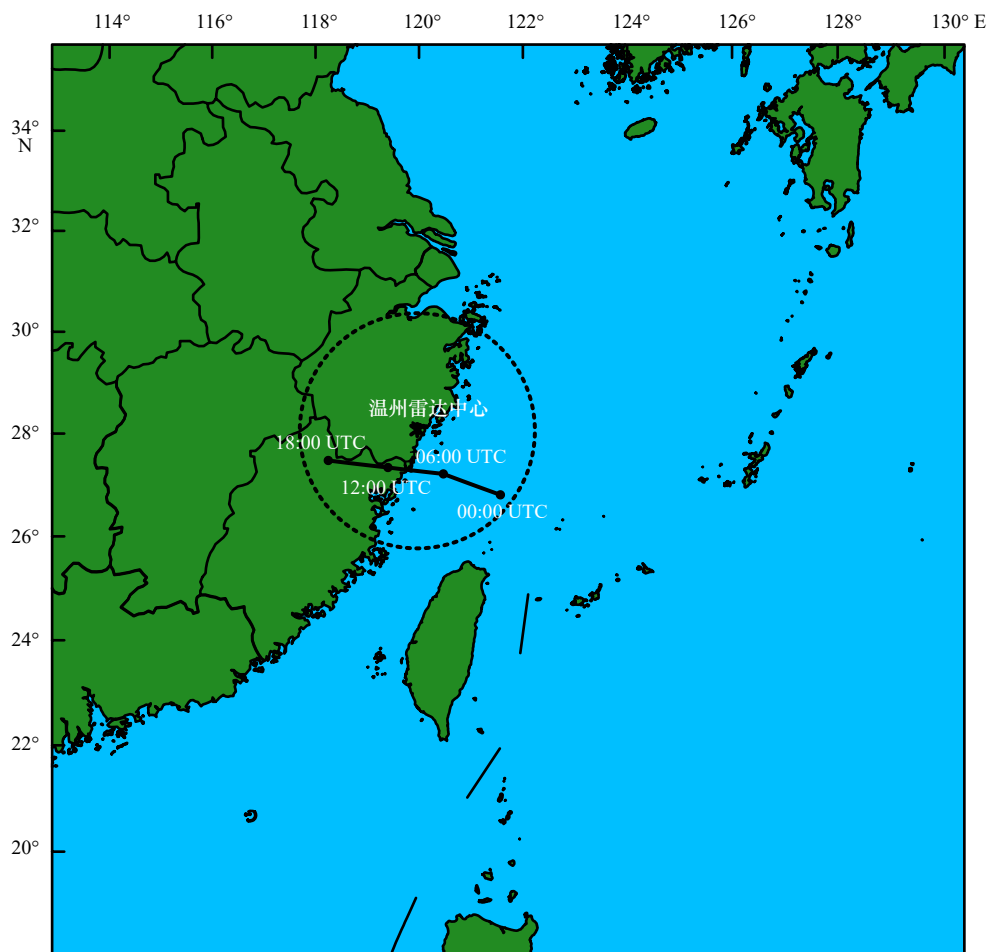


图2 WRF 模拟区域范围

Fig. 2 WRF simulation area

2006年8月10日00:00 UTC至18:00 UTC台风“桑美”观测最佳路径和温州雷达中心位置及其雷达径向风对应影响半径
The best track positions for Typhoon Saomai from China Meteorological Administration from 00:00 to 18:00 UTC on August 10, 2006. Also indicated the Wenzhou radar location and maximum range coverage circles

广,而且延伸的时段长,是一个综合的数据集。该数据资料是每隔6h一次的 $1^\circ \times 1^\circ$ 格点数据,来自全球资料同化系统(GDAS)。另外一种数据为JMA的客观再分析格点资料,始于1979年并一直更新至今,是日本气象厅区域谱模式RSM-RANAL所提供的一种水平分辨率为20 km的区域高分辨率再分析资料。该资料为grib2格式,同化了卫星、雷达等非常规资料,其覆盖区域($10^\circ \sim 60^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 160^\circ \text{E}$)顶层气压为10 hPa,每天提供00:00、06:00、12:00和18:00 UTC的4次分析数据。设计了两组同化试验,一组是GFS试验:选取美国全球预报系统的再分析资料作为背景场,该资料空间分辨率为28 km,提供初始和侧边界条件,进行雷达资料同化;二组是JMA试验:选取日本气象厅区域客观再分析资料作为背景场,该资料空间分辨率为20 km,提供初始和侧边界条件,进行雷达资料同化。两组试验均选取了从“桑美”强度突然

增强至登陆及登陆后的时段(8月10日00:00 UTC—18:00 UTC)作为模拟时段。试验流程如图3所示,首先选取8月10日00:00 UTC作为起始时间,作3 h的spin-up预报至8月10日03:00 UTC。从8月10日03:00 UTC开始,每30 min同化一次雷达径向风观测资料,同化3 h至8月10日06:00 UTC结束。然后用最后一个时刻(06:00 UTC)的分析场作为初始场,作12 h的确定性预报。

3 试验结果及分析

3.1 同化雷达资料前后风场和高度场分析

3.1.1 700 hPa 风场增量分析

图4为第一个同化时刻(2006年8月10日03:00 UTC)700 hPa风场增量场,即分析场减去初始场差值,这个差值代表雷达资料同化对背景场的修正作用。图4a为GFS试验700 hPa的风场增量场,图4b

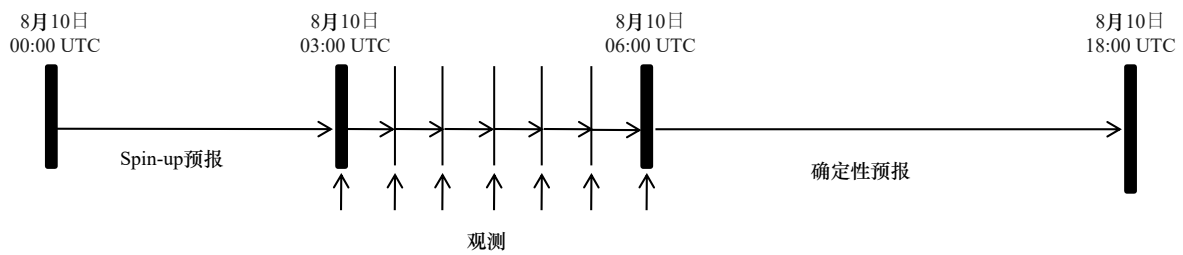


图3 GFS和JMA试验流程

Fig. 3 The flow charts for GFS experiment and JMA experiment

为JMA试验700 hPa的风场增量场。可以发现无论是GFS再分析资料还是JMA再分析资料作为初始场,在台风的中心位置(红色的台风标记)均产生了一个气旋性的风场增量,且越靠近台风中心增强的效果越强,台风的涡旋结构越明显。这表明两种背景场上模拟的台风强度均较实况偏弱,而在同化了雷达径向风资料之后,对背景场模拟的台风均有一个明显的增强作用。对比两组试验的风场增量场,不难看出GFS试验的气旋性增量更大一些,在台风内核区西南象限的风场增量相比于JMA试验的风场增量量级更大,说明GFS试验同化雷达资料之后的分析场与同化前的背景场的差值更大,也即表明GFS再分析资料作为初始场模拟的台风要比JMA再分析资料作为初始场的模拟台风强度更弱,故而增量也相对大一些。

3.1.2 500 hPa 高度场分析

图5为GFS试验和JMA试验在同化雷达径向风资料前后500 hPa高度场。可以看到在同化之前GFS试验模拟出的台风涡旋结构明显比JMA试验模拟出的台风涡旋结构要弱,在500 hPa高度场上等值线比较稀疏,且台风眼相对较宽。而由于JMA区域客观分析资料的精度更高,JMA试验分析出的等值

线更加密集,台风眼也相对较小。总体而言,两种不同背景场资料在同化了雷达观测资料以后分析的台风强度均有所增强,但是JMA试验模拟出的涡旋强度明显要比GFS试验模拟出的涡旋强度更强,500 hPa高度场等值线也变得更多更密,台风眼更小且清晰,符合“桑美”小台风眼的特征。另一方面,在588 hPa等值线以内,JMA试验分析出的等值线比GFS试验更密集,也说明了JMA试验分析出的台风中心气压更低,更加接近观测实况。整体而言,通过对比两组试验同化前后的模拟结果,不难看出不同初始场条件对模拟台风500 hPa高度的环流形势有一定的影响,JMA再分析资料作初始场同化雷达观测资料后分析的台风强度要优于GFS再分析资料作为初始场同化雷达资料后分析的台风强度,具体表现在:涡旋结构更加紧密,台风眼小且清晰,500 hPa高度场等值线多且密集,中心气压更低。

3.2 同化区间均方根误差和强度分析

为了进一步检验采用GFS再分析资料和JMA再分析资料作为背景场对同化雷达资料效果的影响,图6分析了两组试验在3 h同化区间内每次同化雷达径向风前后的均方根误差(root mean square error,

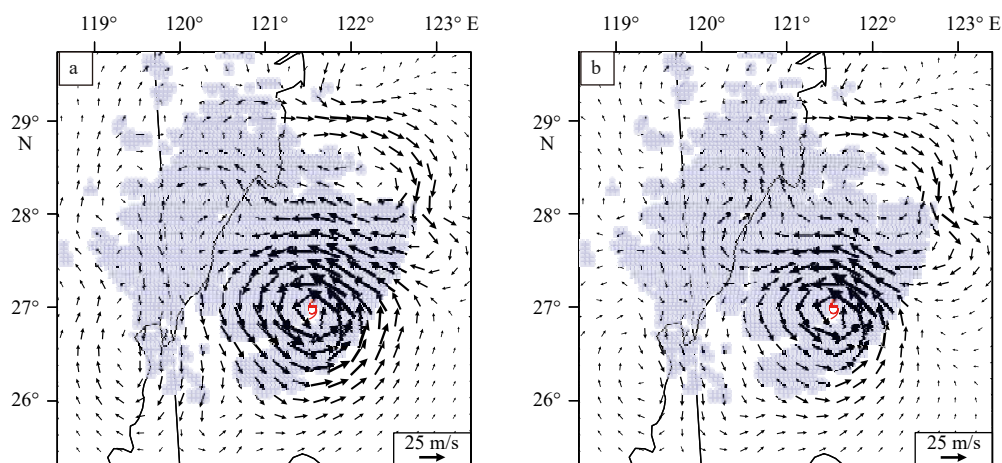


图4 2006年8月10日03:00 UTC GFS试验(a)和JMA试验(b)700 hPa风场增量(阴影区域为观测雷达资料覆盖区域)
Fig. 4 The analysis wind increment of 700 hPa for GFS (a) and JMA (b) experiments at 03:00 UTC on August 10, 2006 (the shaded is the radar observation data coverage area)

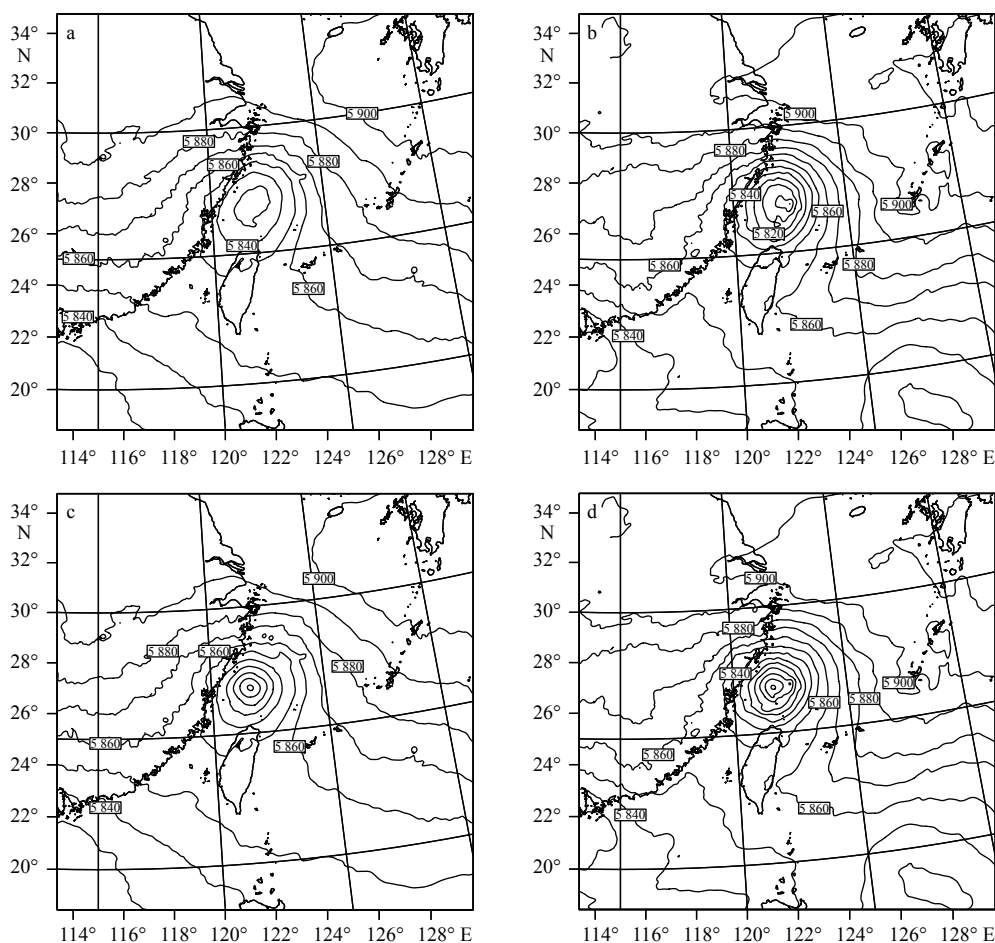


图5 同化雷达径向风资料前 GFS 试验(a)、JMA 试验(b)和同化雷达径向风资料后 GFS 试验(c)、JMA 试验(d) 500 hPa 高度场(等值线, 单位: m)

Fig. 5 The 500 hPa geopotential height filed analysis for GFS (a) and JMA (b) experiments before assimilating radar data, and the analysis for GFS (c) and JMA (d) after assimilating data (contour line, unit: m)

RMSE)(图 6a)和最小海平面气压(minimum sea level pressure, MSLP)(图 6b)的变化情况。均方根误差是指同化前后背景场(分析场)的雷达径向风与真实值的误差。从图 6a 可以看出, GFS 试验和 JMA 试验在同化窗内每次同化后均方根误差都有所下降, 且前 3 次同化雷达径向风后 RMSE 下降幅度更大, 每次大约下降 9 m/s, GFS 试验第一次同化时 RMSE 更是从 15.5 m/s 下降到 5.5 m/s。这是由于在第一次同化时, 模式背景场上的台风模拟偏弱所导致, 故而第一次同化的观测增量也是最大, 另一方面台风的中心气压也与观测更加接近, 强度有不同程度的加强。在后面几次同化过程中, 两组试验的 RMSE 都稳定在 4 m/s 左右, 但 JMA 试验的误差更小。总体而言, 虽然每次同化雷达观测资料后均方根误差都较同化前有所下降, 但在整个同化时段 JMA 试验的误差低于 GFS 试验的误差, 这表明 JMA 再分析资料作为背景场在同化中更具有优势, 与观测结果更为接近。

图 6b 显示了两组试验在同化区间每次同化前后的最小海平面气压。可以发现同化起始时刻两组试验分析出的最小海平面气压与观测的最佳海平面气压 915 hPa 相比, 偏差都比较大, GFS 试验高出最佳路径 85 hPa, JMA 试验高出最佳路径 75 hPa。通过模式预报的调整, 两组同化试验在同化区间后期几次分析的最小海平面气压与上一时刻相比均有所下降, 尤其是在第一次同化时, 海平面气压下降最为明显, GFS 试验由 997 hPa 下降到 967 hPa, JMA 试验由 990 hPa 下降到 962 hPa。整体来看, 不难看出在整个同化区间, JMA 试验分析出的台风强度都比 GFS 试验更加接近观测值, 进一步说明了 JMA 再分析资料作为背景场同化雷达资料的分析效果更佳。

3.3 同化末端台风结构场分析

3.3.1 近地面风场和海平面气压场

为了全面地评估两组同化试验在整个同化时段对台风“桑美”的预报效果, 本文分析了最后一个同化

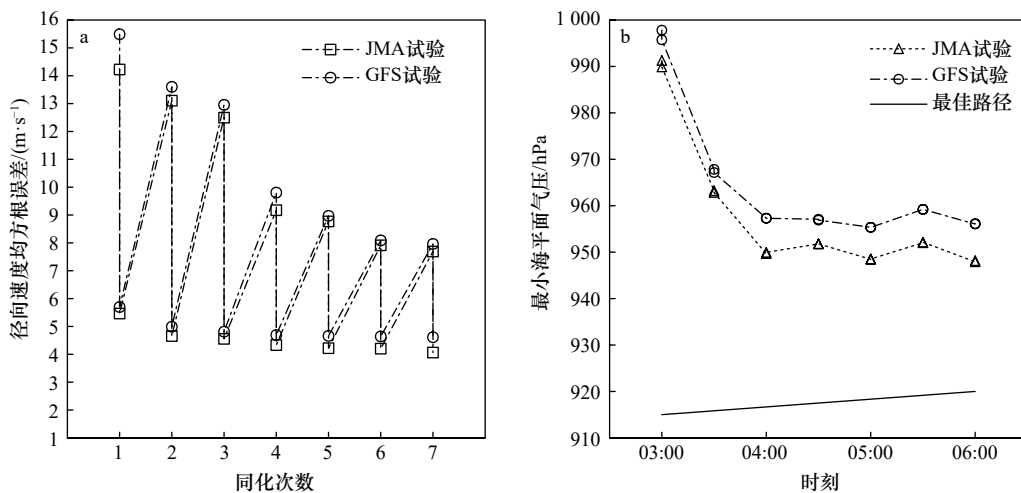


图6 2006年8月10日03:00 UTC至06:00 UTC每个同化时刻的同化前后径向速度均方根误差(a)和最小海平面气压(b)
 Fig. 6 The forecast and analysis (sawtooth pattern during the data assimilation cycling) for root mean square error of radial velocity (a) and the minimum sea level pressures (b) for GFS and JMA experiments from 03:00 UTC to 06:00 UTC on August 10, 2006

时刻(2006年8月10日06:00 UTC)的台风结构。图7显示了GFS试验(图7a)和JMA试验(图7b)在8月10日06:00 UTC同化了雷达径向风资料后近地面风场和最小海平面气压场的合成示意图,同时还显示了实际观测的台风中心(图中黑点)。由图可以发现两组试验都很好模拟出了台风的涡旋结构,但是与GFS试验相比,JMA试验分析出的台风涡旋强度更强,在台风内核区的风速也更大,且JMA试验分析出的台风眼区更小,更加接近“桑美”小台风眼的特征。同时,从图中可以看出JMA试验分析出的台风近地面气压场的等值线比GFS试验更密集,说明其最小海平面气压也更低,图中显示GFS试验的最小海平面气压为950 hPa,而JMA试验的最小海平面气压为940 hPa,更加接近观测值。另一方面,对比两组同化试验分析的台风中心位置,并与实际观测的台风中心作比较可以发现JMA试验分析出的台风中心位置与

观测实况更加接近,而GFS试验的台风中心则处于实际观测台风中心的东北方向,相比JMA试验偏离观测的台风中心位置较远。这些情况都进一步说明了JMA试验对台风桑美中心、结构和强度的预报效果改进更明显。

3.3.2 台风中心垂直剖面

本文进一步从台风中心风速和位温的垂直剖面结构考察了两组试验的预报效果。图8中两组试验台风中心的垂直剖面显示出的台风眼区高度均伸展到了400 hPa左右,且呈现非对称结构。但是GFS试验(图8a)的台风眼相对较宽,相比之下JMA试验(图8b)的台风眼更窄,涡旋强度更强,说明台风的结构也更完整。同时从图中可以观察到台风眼外围的云墙区也呈现出非对称结构,台风眼右侧的云墙强度要比左侧强很多。JMA试验的非对称结构更显著,云墙强度要强于GFS试验,在台风眼右侧的云墙区

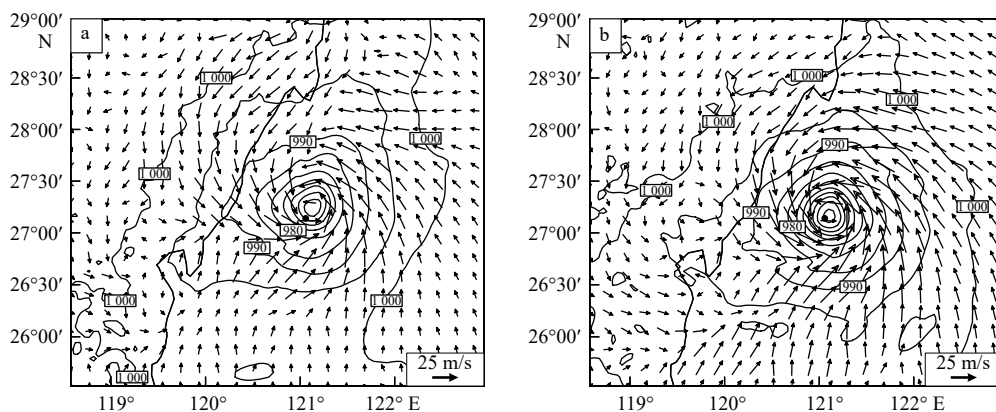


图7 2006年8月10日06:00 UTC GFS试验(a)和JMA试验(b)近地面风场和海平面气压场(等值线,单位:hPa)合成示意图
 Fig. 7 The sea level pressure (solid contours, unit: hPa) and the surface wind vectors for GFS (a) and JMA (b) experiments at 06:00 UTC on August 10, 2006

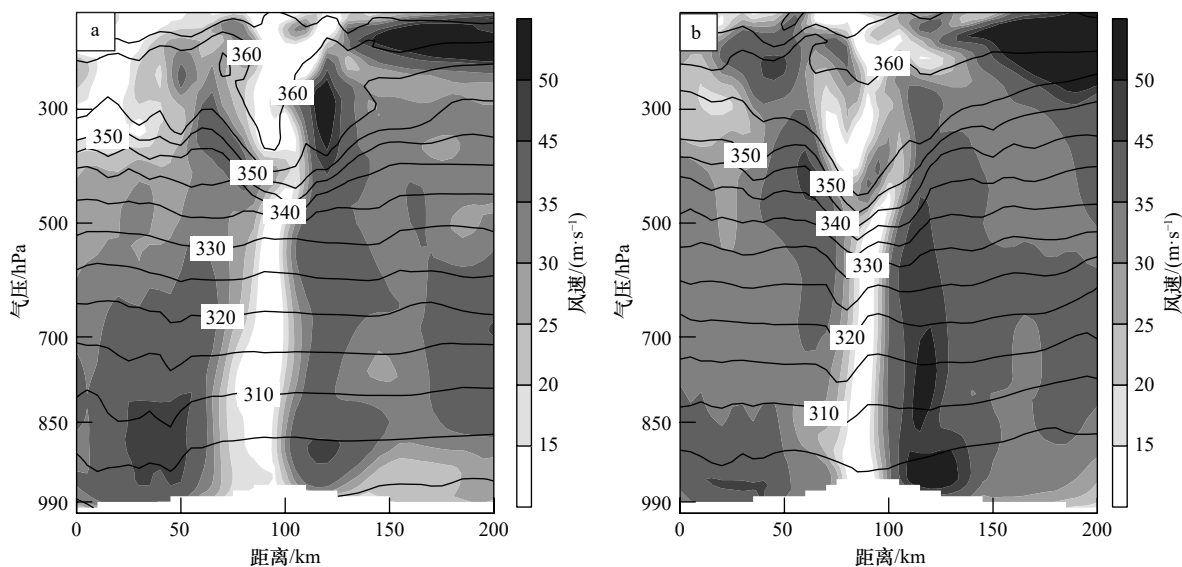


图 8 2006 年 8 月 10 日 06:00 UTC GFS 试验(a)和 JMA 试验(b)经过台风中心风速和位温(等值线, 单位: K)的垂直剖面
Fig. 8 Vertical cross sections of analyzed horizontal wind speed and potential temperature (contour line, unit: K) for GFS (a) and JMA (b) experiments at 06:00 UTC on August 10, 2006

出现了最大风速区, 风速达到了 50 m/s 以上, 最大风速区的云强高度一直延伸到 500 hPa, 而 GFS 的最大风速只达到了 35 m/s。值得指出的是, GFS 试验的等位温线在台风眼区没有出现明显的下凹趋势, 而 JMA 试验在整个台风内核区的等位温线都是下凹的, 表明了 JMA 试验在台风中心的暖心结构也更强。总体来说, JMA 试验在台风垂直结构上对台风风速和位温的修正效果都优于 GFS 试验, 进一步说明采用 JMA 再分析资料作为初始场更有优势。

3.3.3 温度距平

台风的暖心结构可以通过温度距平的垂直截面图来分析^[24], 从图 9 中可以发现两组试验都分析出了台风的暖心结构, 但 JMA 试验的暖心结构更强。GFS 试验台风暖心结构的最大温度距平为 4 K, 出现在 400 hPa 左右, 且正的温度距平只存在于 500 hPa 以上。而 JMA 试验台风暖心结构的暖核最大值达到了 6 K, 最大值出现在 400 hPa 左右, 值得注意的是 JMA 试验正的温度距平一直延伸到地面, 贯穿整个对流层。总体来看, JMA 试验分析出的暖心结构更强一些, 更利于台风的发展加强。

3.3.4 轴对称切向风和水平温度距平

为了进一步评估台风中心的垂直结构, 本文分析了 GFS 试验(图 10a)和 JMA 试验(图 10b)的轴对称切向风和水平温度距平。从图中可以看到, GFS 试验的环流结构较弱, 最大风速达到了 40 m/s, 位于距台风中心 30 km 处, 台风的最大温度距平值为 10 K, 其中心位于距台风中心 8 km 处, 暖心结构相对较弱。相比之下, JMA 试验的环流结构更强, 最大风速区位于

距台风中心 15 km 处, 最大风速达到了 50 m/s, 远大于 GFS 试验的最大风速。同时 JMA 试验分析出的最大温度距平达到了 12 K, 位于距台风中心 7 km 处。表明同化雷达径向风资料可以改进台风结构, 但对 JMA 试验的改进效果更好一些, 进一步说明 JMA 再分析资料作为背景场更具优势。

3.4 确定性预报效果分析

3.4.1 近地面风场和组合反射率因子分析

本文对比分析了预报时段 GFS 和 JMA 两组试验的近地面风场和雷达组合反射率因子与实际观测资料的雷达反射率因子(图 11)。从观测实况图中可以看出, 在初始两个时刻台风的螺旋结构都很清晰, 随着台风靠近陆地, 涡旋强度减弱, 并且台风前沿陆地上的雷达反射率资料部分缺失。两组试验的预报图中都显示出了较好的台风的涡旋环流结构, JMA 试验能够分析出清晰的台风眼, 与观测资料有较好的一致性, 并且在 8 月 10 日 07:00 UTC 台风眼变得更加清晰。而 GFS 试验在整个预报时段都未能分析出清晰的台风眼。在预报的初始时刻(8 月 10 日 06:00 UTC), GFS 试验仅在台风中心的南侧显示出了回波强度为 50 dBZ 的强回波中心, JMA 试验在台风中心的南侧和西北侧都分析出了强回波, 回波强度达到 50 dB, 强回波范围比 GFS 试验的要大得多。值得指出的是, JMA 试验预报出了台风前沿陆地上的降水(位于 27.5°N, 119.8°E 的强回波中心), 但 GFS 试验未能报出。到了下一个预报时刻(8 月 10 日 07:00 UTC), 两组试验的涡旋环流强度均有所加强, JMA 试验分析出了更完整紧密的台风螺旋结构, 且最大风速中心出现在台风

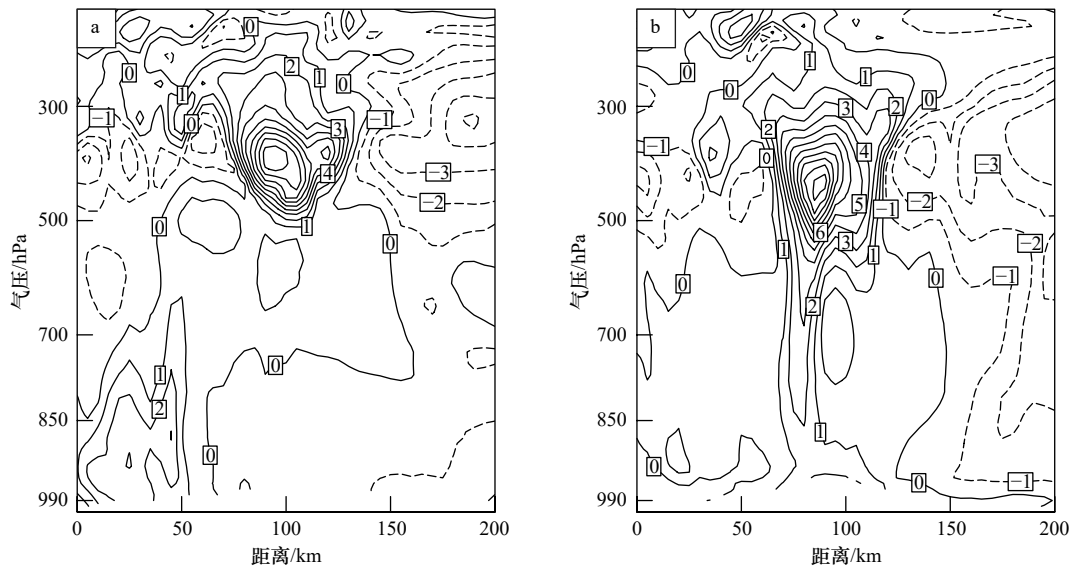


图9 2006年8月10日06:00 UTC GFS试验(a)和JMA试验(b)温度距平(等值线,单位:K)

Fig. 9 Vertical cross sections of analyzed temperature anomalies (contour line, unit: K) for GFS (a) and JMA (b) experiments at 06:00 UTC on August 10, 2006

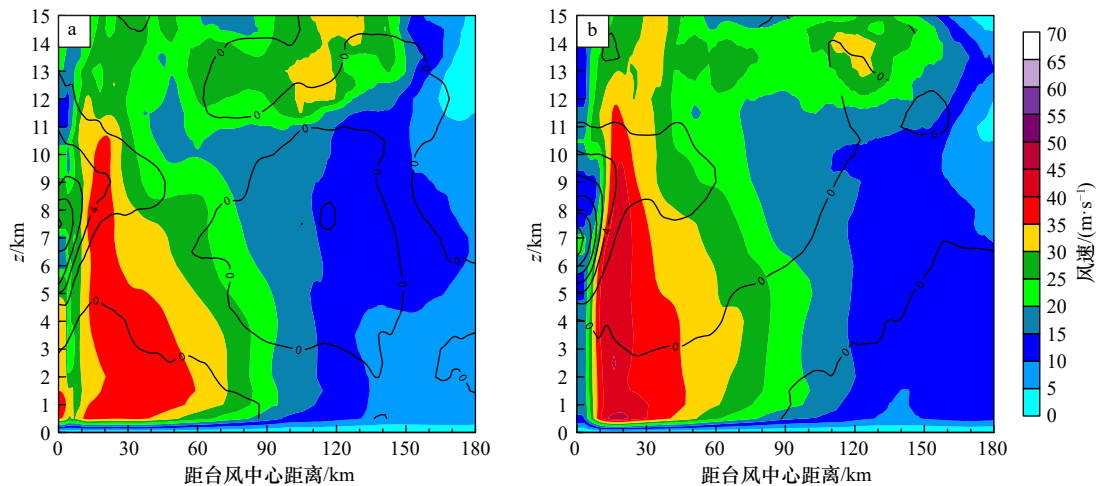


图10 2006年8月10日06:00 UTC GFS试验(a)和JMA试验(b)台风轴对称切向风和温度距平(等值线,单位:K)

Fig. 10 Contour plot of azimuthally-averaged tangential wind and temperature deviated from the horizontal mean (contour line, unit: K) for GFS (a) and JMA (b) experiments at 06:00 UTC on August 10, 2006

眼附近,台风中心南侧的强回波和台风前沿的强回波连成了一片,更加接近实际观测资料。而GFS试验依旧未能预报出台风前沿的降水。随着预报时间的推后,台风的环流结构有所减弱,这是因为台风登陆地形摩擦填充削弱了台风强度,但JMA试验的台风环流结构仍然优于GFS试验。两组试验都在台风中心分析出了最大风速中心,但是GFS的最大风速要比JMA弱,并且随着预报时刻的推后在逐渐减小。JMA试验分析出的最大风速中心在整个预报时段与台风中心都配合得比较好,并且在8月10日07:00 UTC风场变得更强大。总的来说,JMA试验在整个预报时段分析出的台风环流结构、最大风速都要优于GFS

试验,同时JMA试验预报出了台风前沿的降水,而GFS试验未能预报出台风前沿的降水,因此选取JMA区域客观再分析资料对台风预报的改进效果更加明显。

3.4.2 台风路径和强度分析

为了进一步评估选取不同的背景场同化多普勒雷达资料对台风“桑美”预报效果的影响,本文选取了最后一个同化时刻(8月10日06:00 UTC)的分析场作为初始场对台风的路径和强度进行了12 h的确定性预报,直至8月10日18:00 UTC结束。本节对GFS试验和JMA试验的预报路径、路径误差、最小海平面气压和近地面最大风速(Maximum Surface Wind,

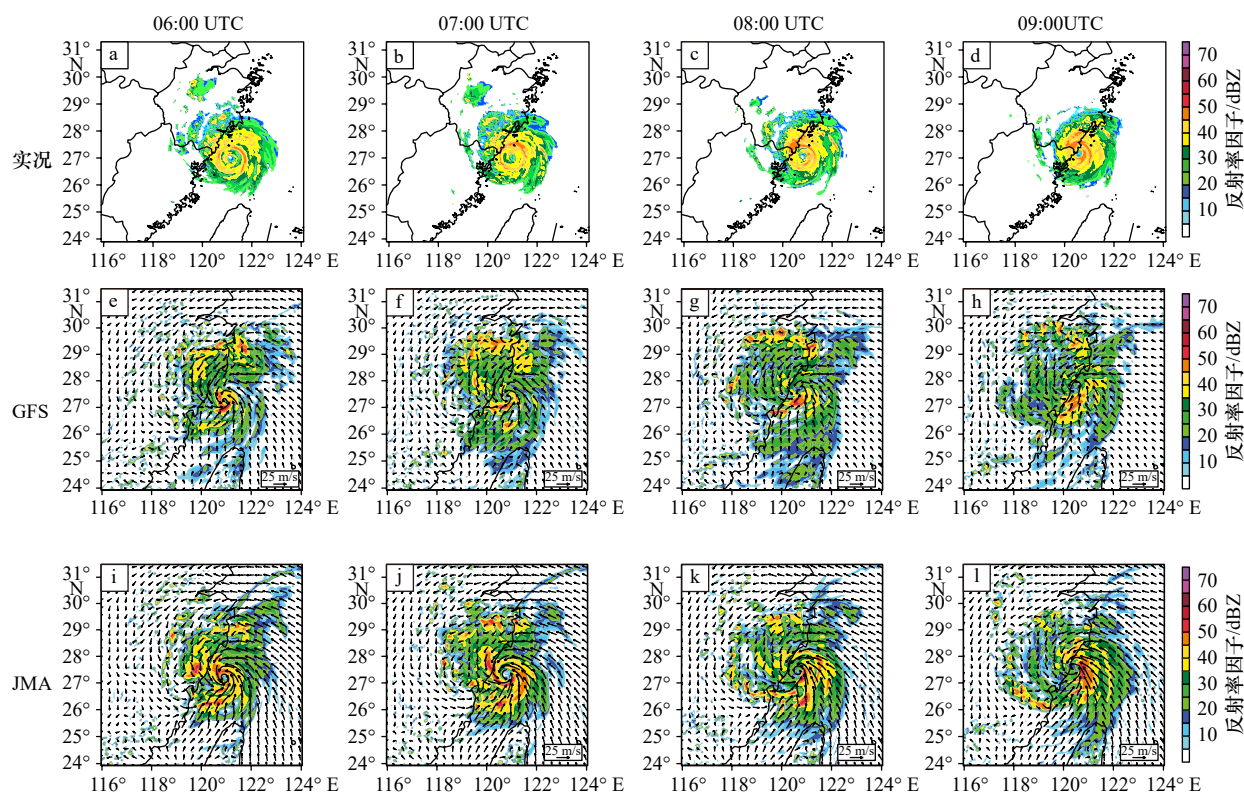


图 11 2006 年 8 月 10 日 06:00 UTC 至 09:00 UTC, 观测实况、GFS 试验和 JMA 试验雷达组合反射率因子

Fig. 11 The radar combination reflectivity factor for observation, GFS, and JMA experiments from 06:00 UTC to 18:00 UTC on August 10, 2006

MSW)进行讨论。图 12a 和图 12b 给出了两组试验和观测资料的台风路径和路径误差,从图中可以看出在起始时刻(8月10日 06:00 UTC)JMA 试验预报效果更佳, JMA 试验预报的台风中心位置与最佳路径的台风中心基本重合,路径误差为 3 km,而 GFS 试验预报的中心位置相比最佳路径略微偏东偏北,路径误差为 8 km。在预报前 3 h 两组试验的预报路径与观测实况相比都更加偏东偏北,但 JMA 试验预报结果与实况更加接近,且将路径误差控制在了 20 km 以下,而 GFS 试验预报的路径误差达到了 50 km。在 3 h 之后,两组试验预报的路径误差也逐渐增大,中心位置越向北偏,在结束时刻 GFS 试验和 JMA 试验的误差分别达到了 92 km 和 80 km,这可能是因为登陆后由于地形摩擦作用削弱了台风强度,但依旧是 JMA 试验更接近实况。总体来看,采用 JMA 再分析资料作为背景场同化雷达观测资料对台风路径预报效果改进更具优势,分析出的台风路径更加接近观测实况。

图 12c 和图 12d 分析了两组试验和观测资料在预报时段的最小海平面气压和最大风速随时间的变化情况。从图 12c 中可以看到起始时刻 JMA 试验预报出的 MSLP 为 948 hPa,相比 GFS 试验预报出的 957 hPa 更加接近观测实况。在预报的前 9 h, JMA 试验预报

出的 MSLP 都比 GFS 试验更加接近观测实况。在最后 3 h 误差逐渐减小,但 JMA 试验预报的 MSLP 误差约为 5 hPa,低于 GFS 的预报误差。总体而言,在整个预报时段, JMA 试验的预报效果都优于 GFS 试验的预报效果。从图 12d 中可以发现在预报的前 9 h, GFS 试验预报的最大风速与实际观测的误差都比较大,最大误差达到了 40 m/s,严重低估了台风的最大风速。而 JMA 试验预报出的最大风速与实况的误差在整个预报时段都控制在 10 m/s 左右,预报效果更佳。在最后一个时刻 GFS 试验预报出的最大风速超过了 JMA 试验,更接近实况,但总体从趋势上来, JMA 试验在 12 h 的预报过程中预报效果更佳,与实况更接近。

4 结论

本文使用中尺度数值模式 WRFV4.0 及其三维变分同化系统,对 2006 年 8 月 10 日登陆我国的超强台风“桑美”进行雷达径向风资料同化,并做了 12 h 的确定性预报。考察分别选取美国 GFS 再分析资料和日本 JMA 区域客观再分析资料作为背景场进行多普勒雷达资料同化对台风结构、强度、路径、降水预报效果的影响,具体结论如下:

(1)对比分析两组试验同化雷达观测资料后 700 hPa

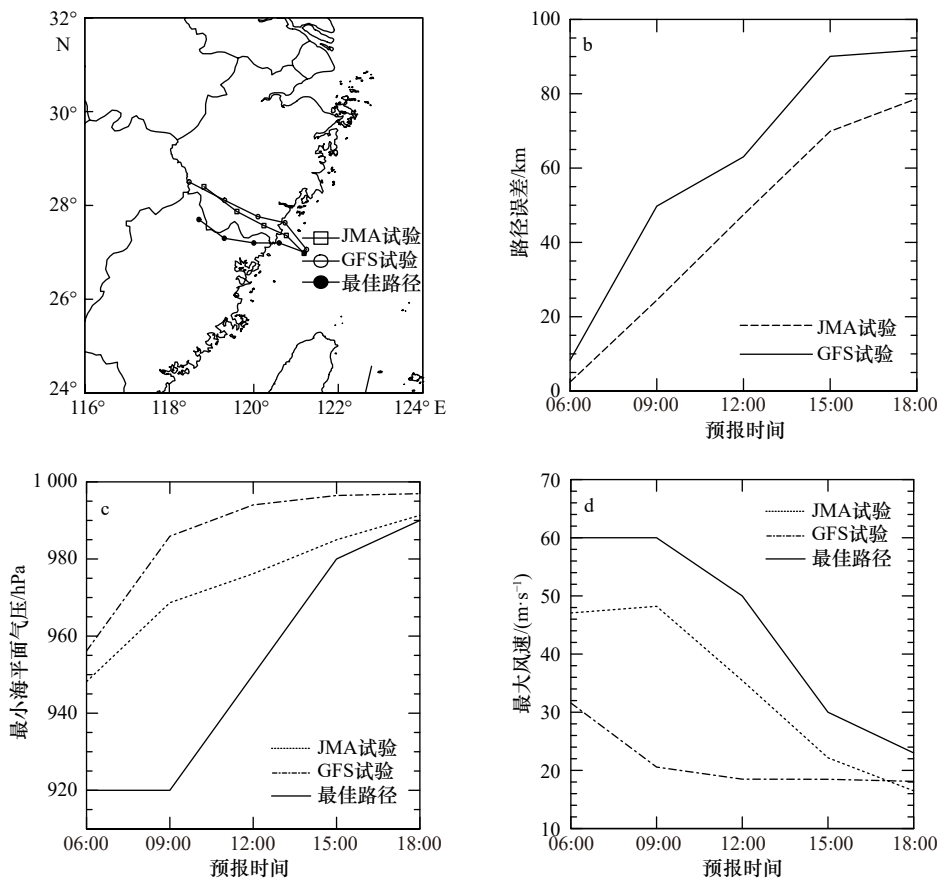


图 12 预报时段(2006年8月10日06:00 UTC至18:00 UTC)的台风路径(a)、路径误差(b)、最小海平面气压(c)和最大风速(d)预报结果

Fig. 12 The 12 hour predicted tracks (a), track errors (b), minimum sea level pressure (c) and maximum surface wind speed (d) from 06:00 UTC to 18:00 UTC on August 10, 2006

风场增量场和同化前后 500 hPa 高度场,可以看出 GFS 再分析资料作为背景场模拟的台风强度比 JMA 再分析资料模拟的台风要弱得多,同化雷达径向风资料对背景场上的台风有很好的调整和增强作用,但对 JMA 试验的改进效果更佳,同化雷达资料后 JMA 试验模拟出的台风强度更强。

(2)分析同化窗内 RMSE 和 MSLP 随时间的变化情况,发现同化雷达资料均能使两组试验的 RMSE 和 MSLP 下降,且同化前期下降更明显。但总体来说 JMA 试验的 RMSE 和 MSLP 都更小,更加接近观测实况,表明使用 JMA 区域客观再分析资料作为背景场更具有优势。

(3)从同化末端台风结构来看,采用 JMA 区域客观再分析资料作为背景场分析的台风在涡旋强度、台风眼大小、最大风速区和暖心结构等方面都要优于 GFS 再分析资料,更加接近实况。说明 JMA 客观

再分析资料对台风动力和热力结构的调整更具优势。

(4)使用 JMA 再分析资料预报出的台风组合反射率因子、路径、最小海平面气压、最大风速都更接近观测实况,且能够预报出位于台风前沿的降水。说明 JMA 再分析资料作为背景场同化雷达资料的预报效果的更佳。

本文选取 GFS 再分析资料和 JMA 再分析资料作为两种不同的背景场条件,对登陆台风“桑美”进行数值模拟研究,发现不同背景场条件会造成台风内核结构以及对其路径和强度预报效果的差异。同时,应当指出本文的结论都是针对台风“桑美”的研究得到的,只适用于这一个例,对于其他个例是否成立还需要进行进一步的研究。

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] 康斌. 我国台风灾害统计分析[J]. 中国防汛抗旱, 2016, 26(2): 36-40.

- Kang Bin. Statistical analysis of typhoon disaster in China[J]. *China Flood & Drought Management*, 2016, 26(2): 36–40.
- [2] 陈锋, 冀春晓, 董美莹, 等. 雷达径向风速同化对台风麦莎模拟的影响[J]. *气象*, 2012, 38(10): 1170–1181.
Chen Feng, Ji Chunxiao, Dong Meiyong, et al. The effects of radar radial velocity data assimilation on the simulation of Typhoon Matsa[J]. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(10): 1170–1181.
- [3] 李新峰. 雷达资料循环同化在台风“莫兰蒂”短时预报中的应用研究[D]. 南京: 南京大学, 2012.
Li Xinfeng. Short-term forecasting through cycling assimilation of China coastal radar data for Typhoon Meranti at landfall[D]. Nanjing: Nanjing University, 2012.
- [4] 王明筠. 雷达反演同化对台风蔷薇(2008)强度和路径预报影响及其机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2014.
Wang Mingjun. The impacts of assimilating retrieved winds from Doppler radar observation on the intensity and track forecasts of Typhoon Jangmi (2008) and its mechanisms[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014.
- [5] 沈菲菲, 闵锦忠, 许冬梅, 等. 双多普勒雷达资料同化在飓风“艾克”预报中的应用研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(11): 60–72.
Shen Feifei, Min Jinzhong, Xu Dongmei, et al. Application of assimilating dual Doppler radar data in forecast of hurricane Ike[J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(11): 60–72.
- [6] 李昕, 王元, 明杰, 等. 雷达径向风和反演风联合同化在台风灿都(2010)数值预报中的研究[J]. *气象*, 2016, 42(6): 649–663.
Li Xin, Wang Yuan, Ming Jie, et al. A combined radar data assimilation strategy of radial velocity and retrieved wind and its impact on the forecasting of tropical cyclone Chanthu (2010)[J]. *Meteorological Monthly*, 2016, 42(6): 649–663.
- [7] 冯佳宁, 端义宏, 徐晶, 等. 雷达资料同化对2015年台风彩虹数值模拟改进[J]. *应用气象学报*, 2017, 28(4): 399–413.
Feng Jianing, Duan Yihong, Xu Jing, et al. Improving the simulation of Typhoon Mujigae (2015) based on radar data assimilation[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2017, 28(4): 399–413.
- [8] 沈菲菲, 许冬梅, 闵锦忠, 等. 云尺度雷达资料的混合同化对台风“桑美”的数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2018, 40(5): 48–61.
Shen Feifei, Xu Dongmei, Min Jinzhong, et al. Assimilation of radar observations with En3DVAR at cloud-resolving scale for the prediction of Typhoon Saomai[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(5): 48–61.
- [9] Shen F F, Xue M, Min J Z. A comparison of limited-area 3DVAR and ETKF-En3DVAR data assimilation using radar observations at convective scale for the prediction of Typhoon Saomai (2006)[J]. *Meteorological Applications*, 2017, 24(4): 628–641.
- [10] 戚佩霓, 沈菲菲, 寇蕾蕾, 等. 多普勒雷达资料同化在台风“灿都”(2010)预报中的应用研究[J]. *热带海洋学报*, 2019, 38(2): 20–31.
Qi Peini, Shen Feifei, Kou Leilei, et al. Experiments of assimilating Doppler radar data in forecast of Typhoon Chanthu[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2019, 38(2): 20–31.
- [11] 刘青松, 董海萍, 郭卫东, 等. 不同背景场条件对同化多普勒雷达资料效果的影响[C]//创新驱动发展 提高气象灾害防御能力——S12航空与航天气象技术研究与应用. 北京: 中国气象学会, 2013: 8.
Liu Qingsong, Dong Haiping, Guo Weidong, et al. Effects of different background field on assimilation of Doppler radar data[C]//Innovation-Driven Development, Improving the Defense Capability of Meteorological Disasters -- S12 Aerospace and Meteorological Technology Research and Application. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2013: 8.
- [12] 公颖, 李俊. 不同背景场条件下AREM模式预报效果评估分析[J]. *气象科技*, 2009, 37(1): 1–8.
Gong Ying, Li Jun. Evaluation and analysis of AREM prediction under different background fields[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2009, 37(1): 1–8.
- [13] 李得勤, 段云霞, 周晓珊, 等. 两种背景场同化雷达资料对辽宁省一次暴雨预报的影响[J]. *高原气象*, 2015, 34(4): 1107–1118.
Li Deqin, Duan Yunxia, Zhou Xiaoshan, et al. Numerical forecasting study of a rainstorm at Liaoning by assimilating radar data of two kinds of background fields[J]. *Plateau Meteorological*, 2015, 34(4): 1107–1118.
- [14] 朱红芳, 王东勇, 管兆勇, 等. 不同初始场条件对GRAPES模式数值预报的影响[J]. *气象学报*, 2007, 65(4): 493–502.
Zhu Hongfang, Wang Dongyong, Guan Zhaoyong, et al. Effects of different initial fields on GRAPES numerical prediction[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2007, 65(4): 493–502.
- [15] 吕校华, 谭德权, 冉祥辉, 等. 超强台风“桑美”的特点及其成因分析[J]. *气象研究与应用*, 2007, 28(S2): 70–73.
Lü Xiaohua, Tan Dequan, Rang Xianghui, et al. Characteristics and analysis of cause of super typhoon “Saomai”[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2007, 28(S2): 70–73.
- [16] 余贞寿, 闵锦忠, 钟建锋, 等. 超强台风“桑美”(0608)近海观测特征研究[J]. *科技通报*, 2012, 28(3): 21–27, 48.
Yu Zhenshou, Min Jinzhong, Zhong Jianfeng, et al. Observational features of super Typhoon Saomai (2006) over coastal water of China[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2012, 28(3): 21–27, 48.
- [17] Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation[J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2003, 82(1): 139–170.
- [18] Brewster K, Hu M, Xue M, et al. Efficient assimilation of radar data at high resolution for short-range numerical weather prediction[C]//World Weather Research Program Symposium on Nowcasting and Very Short-Range Forecasting. New York: John Wiley and Sons, 2005.
- [19] Oye R, Mueller C, Smith S. Software for radar translation, visualization, editing, and interpolation[C]//Proceedings of the 27th Conference on Radar Meteorology. Vail, CO: American Meteorological Society, 1995: 359–361.
- [20] Lim K S S, Hong S Y. Development of an effective double-moment cloud microphysics scheme with prognostic cloud condensation nuc-

- lei (CCN) for weather and climate models[J]. *Monthly Weather Review*, 2010, 138(5): 1587–1612.
- [21] Grell G A, Dévényi D. A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(14): 38-1–38-4.
- [22] 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.
- [23] Noh Y, Cheon W G, Hong S Y, et al. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107(2): 401–427.
- [24] Li Y Z, Wang X G, Xue M. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble-3DVAR system for the prediction of hurricane Ike (2008)[J]. *Monthly Weather Review*, 2012, 140(11): 3507–3524.

Experiment of assimilating Doppler radar data in Typhoon Saomai based on the different initial conditions

Shen Feifei^{1,2,3}, Tang Chao^{1,4}, Xu Dongmei^{1,2,3}, Li Hong⁵, Liu Ruixia⁶

(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. Heavy Rain and Drought-Flood Disasters in Plateau and Basin Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China; 3. The Institute of Atmospheric Environment, China Meteorological Administration, Shenyang 110166, China; 4. Weixi Meteorological Bureau, Weixi 674600, China; 5. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030, China; 6. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract: Based on the WRF (Weather Research and Forecasting Model) and its three-dimensional variational data assimilation system, the numerical simulation and Doppler radar data assimilation are conducted with the data of GFS (Global Forecasting System) and JMA (Japan Meteorological Agency) reanalyses as the initial conditions respectively. The impact of assimilation radar data in different background fields on the initial typhoon field, internal structure and forecast were investigated based on the super typhoon case Saomai in 2006. The results show that, both experiments with GFS and JMA data are able to enhance the typhoon initial winds field at 700 hPa and geopotential height field at 500 hPa after assimilating radar observations. The improvements in terms of the root-mean-square error during the 3 h during the data assimilation cycling, the minimum sea level pressure, and the thermal and dynamic structure from the JMA tests are more significant than that with GFS data. The forecast skills for the precipitation, the typhoon track, and the intensity are also noticeable with JMA data by correctly predicting the precipitation location in the front of typhoon.

Key words: initial conditions; data assimilation; WRF model; radar radial velocity