

FY-2G 云导风资料同化在台风“天鸽”数值预报中的应用

许冬梅^{1,2,3}, 束艾青¹, 李泓⁴, 吴海英⁵, 何志新⁶, 沈菲菲^{1,2,4}, 庄雨馨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. 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 110000; 4. 中国气象局上海台风研究所, 上海 200030; 5. 江苏省气象台, 江苏 南京 210041; 6. 安徽省气象台, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 以2017年8月登陆我国的13号台风“天鸽”为例, 采用美国全球预报系统资料作为背景场, 利用WRF中尺度数值模式及天气研究和预报模式同化系统中的三维变分模块, 探究了新一代静止卫星FY-2G云导风资料同化对台风预报的影响。研究表明: 云导风资料同化模拟的台风路径、强度和最大风速与实况更加接近。与控制试验相比, 云导风资料同化能够为背景场提供丰富的风矢量信息, 增强台风周围对流云及其引导气流的强度, 从而较好地模拟台风的内部结构, 对其发展和维持的水汽条件与动力条件进行改进。

关键词: FY-2G云导风; WRF模式; 3DVAR; 数值预报

中图分类号: P457.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0056-11

1 引言

台风是发生在西北太平洋的热带气旋, 每年都会给沿海地区造成巨大灾害。台风预报受多种因素制约, 如大尺度环流、小尺度扰动、海气界面能量和物质交换等, 再加上台风理论认识的局限性和海洋大面积观测资料的缺乏, 台风预报的难度非常大。据统计, 即使在天气预报技术领先的美国, 2005年由热带气旋造成的经济损失就高达上千亿美元^[1]。有“暖池”之称的热带西太平洋及东印度洋广阔的洋面和较高的海温为台风的生成和发展提供了充足的能量和水汽。夏季, 台风受低纬大气环流特别是季风槽产生的弱垂直风切变和西太平洋副高西伸北跳产生的东风引导气流的影响, 生成后易于移向我国, 给我国广东、广西、浙江、上海和福建等沿海地区的人民生命和社会经济带来巨

大的损失。据相关统计, 2004—2013年, 台风给我国带来的年平均直接经济损失约为448亿元, 占气象灾害总损失的17.4%^[2-4], 因此提高台风预报的精度是气象预报和防灾减灾的重中之重。数值预报具有准确性高和时效长等优点, 是台风预报的主要手段。由于数值预报的效果与初始场的精度密切相关, 台风主要生成并活动于观测资料匮乏的洋面上, 所以台风预报对于数值预报来说始终是一个难点。随着气象探测技术的提高, 卫星和雷达等高分辨率的非常规气象观测手段已广泛地应用于数值预报, 利用这些资料修正模式背景场的信息, 可以使预报结果更加准确。在这些资料中, 卫星云导风(Atmospheric Motion Vectors, AMVs, 又称大气运动矢量)资料具有观测范围广、时效长和不易受下垫面影响等特点, 对陆面观测信息不足的地区, 如海洋和沙漠等的气象预报有重要参考价值, 因此,

收稿日期: 2021-07-10; 修回日期: 2021-10-15。

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(42192553); 国家自然科学基金项目(G41805016, G41805070); 江苏省自然科学基金项目(BK20201506); 上海市优秀学术/技术带头人计划(项目编号: 21XD1404500); 上海台风研究基金项目(TFJJ202107, TFJJ201909); 四川省重点实验室开放研究基金项目(SZKT201901, SZKT201904, SZKT202002); 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项目(2020SYIAE02, 2020SYIAE07)。

作者简介: 许冬梅(1984-), 女, 讲师, 博士, 主要从事卫星资料同化研究。E-mail: dmxu@nuist.edu.cn

通讯作者: 何志新(1984-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事资料同化研究。E-mail: 18156531161@163.com

在台风结构、发生发展过程和台风伴随的强降水分布等预报中,云导风资料的作用不可忽视^[5]。

从20世纪90年代开始,国内外学者已对AMVs资料同化在数值预报中的应用展开研究。在国外,Bhatia等^[6]在有限区域的模式中同化水汽通道的云导风数据,发现同化的云导风数据能更准确地预报热带气旋的路径。Soden等^[7]将云导风数据同化进飓风模式中,减小了飓风路径偏西的预报误差。Velden等^[8]通过对比传统风场和云导风资料同化风场,发现云导风资料的主要误差来源于高度匹配问题。Wu等^[9]研究发现通过集合卡尔曼滤波方法可以增强大气运动矢量的同化子集,从而提高热带气旋路径和强度的预报质量。我国自20世纪末风云二号地球静止卫星发射后才正式开始云导风资料在天气预报中的应用探索。周兵等^[10]发现同化云导风资料可以改善对流层高层风矢的分布,从而提高暴雨等强降水灾害天气预报的准确性。何斌等^[11]将同化了云导风的试验与未同化任何资料的控制试验的预报结果进行对比,发现云导风资料对对流层高层大气风场的调整作用明显,而对中低层大气无明显作用。何志新^[12]将FY-2C云导风资料同化后,发现其能很好地改进降水预报。马侠霖等^[13]将一个云导风计算方法运用在云导风资料同化中,极大地提高了云导风资料的利用率。万晓敏等^[14]选取台风“天鸽”个例进行试验,发现将FY-4A云导风资料同化后可以调整高度场和风场分析结果,对降水的预报也有所改善。

通过以上回顾可以发现,前人的研究大多集中在应用前几代气象卫星的云导风资料以提高数值预报水平。较新的FY-2G卫星自2015年6月1日起漂移至105°E取代超期服役的E星成为主业务卫星,它共有2个红外长波、1个红外中波、1个可见光和1个水汽共5个通道,所有通道分辨率均高于5 km×5 km,其中部分通道分辨率达1.25 km×1.25 km,可以加强我国汛期气象监测能力。因此,我们选取登陆我国的强台风个例以考察同化FY-2G云导风资料对台风预报的影响。2017年8月22—24日,我国广州、香港和澳门等沿海地区出现大范围的强降水和大风天气过程,该过程由强台风“天鸽”引起。本研究就此次天气过程,以美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction,

NCEP)最终业务全球分析(FiNaL operational global analysis, FNL)资料作为参考场,对FY-2G地球静止卫星水汽通道云导风资料的分布进行评估和偏差订正。利用天气研究和预报模式同化系统(Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system, WRFDA)对卫星云导风资料进行三维变分(Three Dimensional VARIation, 3DVAR)同化,并使用3.9.1版本的天气研究和预报模式(Weather Research and Forecasting model, WRF)对此次天气过程进行30 h的确定性预报,与未同化FY-2G云导风资料的控制试验预报结果对比,以探讨云导风资料同化对台风预报的影响。

2 观测资料及同化系统

2.1 FY-2G云导风资料及质量控制方案

FY-2G气象卫星于2014年12月31日在西昌卫星发射中心成功发射。其上搭载的多通道扫描成像辐射计(Visible and Infrared Spin Scan Radiometer, VISSR)共有2个长波红外通道、1个中波红外通道、1个可见光通道和1个水汽通道。与FY-2F卫星相比,图像质量有了显著的提高。本研究使用水汽通道的云导风资料,图1为风矢数量随高度的分布,以及风矢的纬向风速均方根误差随高度的分布。从图1a中可以看出,风矢主要集中在400~100 hPa的中高层大气,高层300~200 hPa的风矢数量最多,可达280个,低层大气的风矢数量较少。由图1b可知,450 hPa以下低层风矢的误差很大;相较而言,中高层风矢的质量较好,均方根误差稳定在0.8 m/s左右,资料可用性强。

在同化云导风资料前,需要对资料进行高度订正。本文采用何志新^[12]的高度订正方案。为了更好地说明高度订正的作用,图2分别给出了2017年8月22日06时(世界时,下同)300 hPa的FNL再分析风场、高度订正前水汽通道云导风矢量和高度订正后水汽通道云导风矢量的分布。图2a为FNL资料得到的区域范围为100°~130°E, 10°~30°N的实况风场,可以看出18°~30°N, 124°~130°E的区域为副热带高压控制,风场顺时针旋转;位于20.5°N, 118.8°E台风中心附近的风场在强大的低压涡旋结

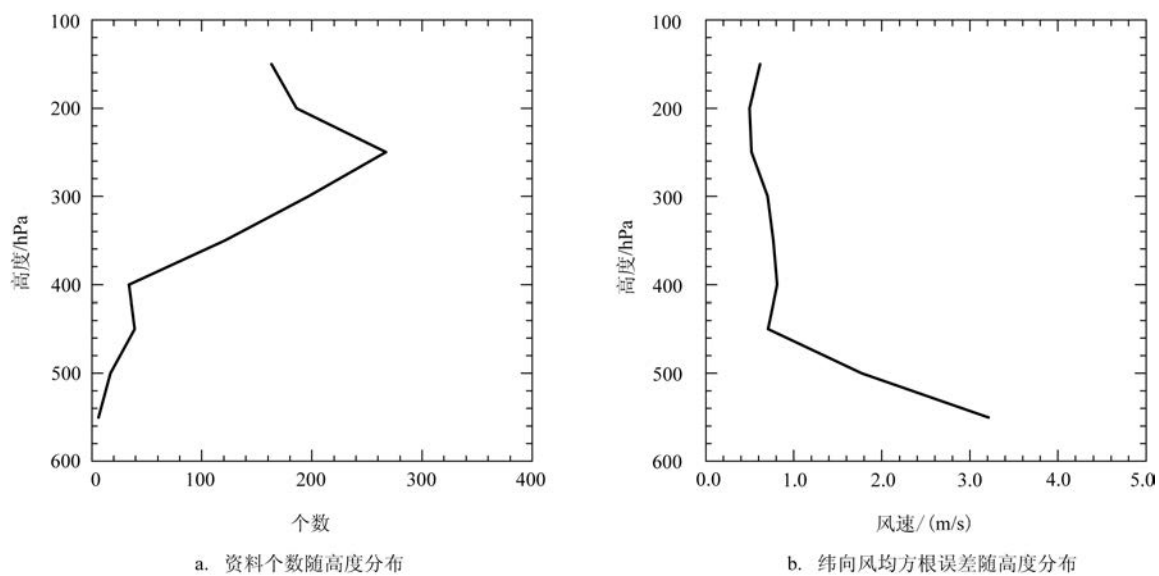


图1 2017年8月22日06时水汽通道云导风资料分布

Fig.1 Distribution of vapor channel AMVs at 0600 UTC on August 22, 2017

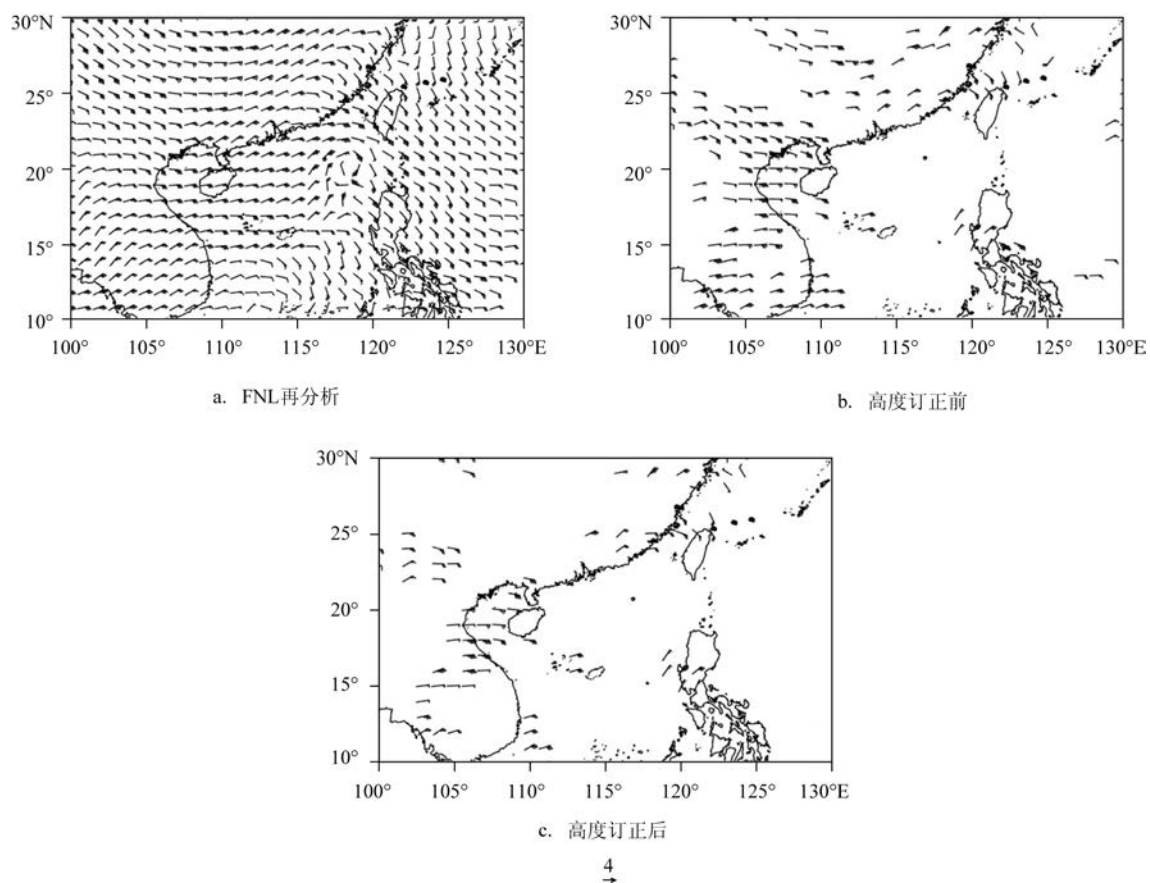


图2 2017年8月22日06时300 hPa上的风矢量分布(单位:m/s)

Fig.2 300 hPa wind vector distribution at 0600 UTC on August 22, 2017 (units: m/s)

构影响下出现逆时针旋转且风速很大。如图2b和2c所示,由于云导风资料剔除了台风云雨区的观测,仅保留晴空区观测,所以在台风中心周围分布的云导风矢量相对稀少且凌乱。对比高度订正前后的云导风资料可以发现,订正后的资料在剔除了选区内($10^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$, $126^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$; $10^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$)台风周围风向偏差较大的风矢量后,云导风资料在保留原环境场基本特征的同时变得更加集中。

2.2 WRFDA同化系统

WRFDA同化系统与WRF模式配套,可同化绝大部分常规和非常规的气象资料,包含3DVAR、四维变分(Four Dimensional VARIation, 4DVAR)以及混合同化等部分。本次试验采用3DVAR同化方法,通过代价函数J的极小化得到观测场、背景场和分析场之间平衡的最优解。代价函数表示为:

$$J = (x - x_b)^T B^{-1} (x - x_b) + (y^o - H(x))^T R^{-1} (y^o - H(x)) \quad (1)$$

式中, x 代表分析场; x_b 代表背景场; y^o 代表观测场; B 和 R 分别代表背景误差协方差矩阵和观测误差协方差矩阵; H 代表观测算子,是由模式到观测的一种映射关系;上标 T 和 -1 分别表示转置和求逆。实际情况模式变量之间的强相关性与观测数据的高分辨率,会使得 B 矩阵的维数巨大,导致 B 的逆矩阵为病态矩阵^[15]。通过对变量进行物理变换和空间变换,使变量之间相互独立且变为背景方差为1的控制变量,最终将 B 转换为对角矩阵以简化计算。WRFDA同化系统中动量控制变量有CV7(水平风场UV)和CV5(流函数 Ψ 和势函数 Φ)两组。根据Sun等^[16]的研究结果, CV5方案对大尺度资料同化的效果更好,故本试验使用流函数和势函数作为动量控制变量。

本研究采用美国国家气象中心(National Meteorological Center, NMC)方法统计背景误差协方差矩阵 B ^[17],以2017年8月1—31日期间每日00时和12时的24 h和12 h预报时效的预报差值作为预报误差的近似。基于大量的预报样本,根据样本之间的差异 B 矩阵表示如下:

$$B \approx \overline{(x^{24} - x^{12})(x^{24} - x^{12})^T} \quad (2)$$

式中, x^{24} 和 x^{12} 分别为24 h和12 h预报。需要注意的

是,这两个预报场都有误差,故可以表示为:

$$x^{24} = x^{\text{truth}} + \varepsilon^{24} + b^{24} \quad (3)$$

$$x^{12} = x^{\text{truth}} + \varepsilon^{12} + b^{12} \quad (4)$$

式中, x^{truth} 代表真实值; b^{24} 和 b^{12} 是每个预报中的偏差; ε^{24} 和 ε^{12} 是随机误差。假设24 h和12 h的预报无偏差,或者偏差在时间上是恒定的,即 $b^{24}=b^{12}$,预报场差异表示为:

$$x^{\text{diff}} = \varepsilon^{24} - \varepsilon^{12} \quad (5)$$

于是 B 矩阵可用式(6)表示:

$$B \approx \overline{(x^{\text{diff}})(x^{\text{diff}})^T} = \overline{(\varepsilon^{24} - \varepsilon^{12})(\varepsilon^{24} - \varepsilon^{12})^T} \quad (6)$$

3 个例介绍

台风“天鸽”是2017年第13号台风,于2017年8月20日14时开始编号,生成后向西移动(见图3)。由于高海温为此次台风提供了较高的能量,它于8月22日连跳两级,从热带风暴升级为台风。8月23日凌晨台风途经澳门,风力波及香港,在此过程中,其风力快速增加,并在23日台风以最强风力登陆我国沿海城市珠海;而后向广西移动,由于地表摩擦耗散逐渐填塞消亡,24日在我国境内消散。台风“天鸽”具有近海加强、短时间强度变化大、移速快和波及范围广等特点,以上这些特点使得预报难度较大。台风“天鸽”给我国华南地区造成巨大的经济损失和人员伤亡,尤其是广东珠海周边的城市受灾严重。

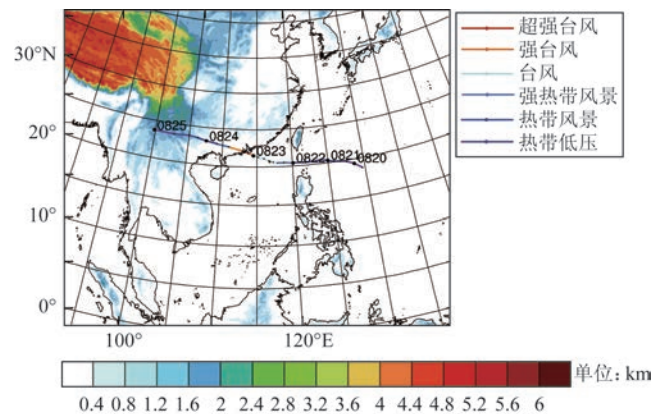


图3 WRF模拟区域叠加地形高度和台风“天鸽”的路径
Fig.3 WRF simulation domain covered by terrain height and typhoon "Hato" 's track

4 试验设计

本试验选用3.9.1版本WRF模式和WRFDA同化系统,模式的网格分辨率大小为15 km,网格数为 401×329 ,中心在 20°N , 115°E ,模拟的区域如图3所示。模式采用的物理参数化方案主要包括:WSM6(WRF Single-Moment 6-class)微物理方案^[18]、KF(Kain-Fritsch)积云对流方案^[19]、RRTM(Rapid Radiative Transfer Model)长波辐射方案^[20]、Dudhia短波辐射方案^[21]和YSU(Yonsei University)边界层方案^[22]。共设置两组试验,一组是控制试验,另一组是同化FY-2G云导风试验(见图4)。控制试验先在2017年8月22日00时进行6 h的“spin-up”过程至06时,然后连续积分42 h至24日00时。同化试验采用循环同化方式,背景场来自控制试验6 h“spin-up”后输出的2017年8月22日06时的预报场,从22日06—18时每间隔6 h同化一次,共同化3次,同化的资料是FY-2G水汽通道的云导风资料,最后再进行30 h的确定性预报至24日00时。

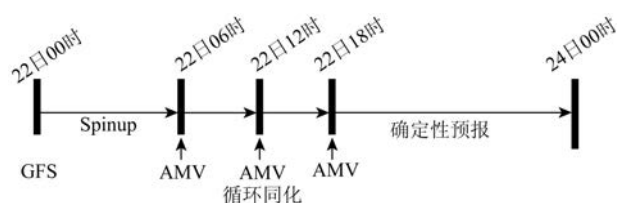


图4 试验流程图

Fig.4 Experimental flow chart

5 试验结果分析

5.1 确定性预报分析

图5a为台风“天鸽”的观测路径和模式模拟路径的对比图。台风观测资料取自中国气象局热带气旋资料中心(网址:https://tcdata.typhoon.org.cn/zjljsjj_zlhq.html)。从图中可以看出,台风“天鸽”的实况路径(实心圆点线)为西北偏西行路径,在广东省珠海市登陆后,继续向广西移动,最后在广西境内减弱为热低压。控制试验(空心圆点线)开始的模拟效果与实际路径基本一致,但在模式积分开始

约12 h台风登陆后,其模拟的台风路径较同化试验(三角线)逐渐向南偏移,误差逐渐增大,在进入广西逐渐填塞消亡的过程中,与实际观测路径相差约1个纬度,同化了云导风资料的试验模拟路径比控制试验路径更偏北。图5b是各试验模拟路径的误差。从图中可以看出,两组试验在前6 h路径误差较小,随后误差随时间增加,同化试验的路径误差明显小于控制试验,整个过程的最大误差约为70 km,而控制试验的最大误差达到了约90 km。

图5c为控制试验和同化试验模拟的台风“天鸽”强度。从图中可以看出,在预报前期,两组试验对台风强度的模拟结果接近,没有明显改进;台风登陆后,控制试验模拟的台风强度开始减弱,导致其强度误差随时间呈现增长的趋势,两组试验误差的差距开始变大,控制试验最终超过同化试验,而同化试验模拟的强度误差始终维持在约12 hPa,可以更准确地反映实际的台风强度特征。图5d是两组试验对台风“天鸽”模拟的最大海平面风速随时间的变化图。图中可见,同化了云导风资料的试验模拟的台风最大海平面风速误差较小,最大误差约为5.5 m/s,这与隋新秀等^[23]研究中的量级相当。同化云导风资料的试验在整个30 h的确定性预报中的模拟结果与实况更加接近。

5.2 风场增量分析

图6分别是同化了云导风资料后2017年8月22日06时850 hPa、700 hPa、500 hPa和300 hPa的风场增量,此时台风中心位置位于 20.5°N , 118.8°E 。由于云导风资料主要集中在对流层中高层,所以从图6a和6b可以看出,在850 hPa和700 hPa的高度上,台风附近的风速增量很小。在500 hPa上台风南侧有西南方向的风场增量,台风的移动主要受该层引导气流的影响,因此,西南方向的风场增量对于台风南侧的引导气流有加强作用,使得台风较控制试验更易向北移动。300 hPa是云导风密集分布的高度,因此,同化了云导风资料后在华南地区产生了强的西南方向的风场增量。在500 hPa上,台风中心的西南侧有较强的偏南风增量,台风中心的西北侧有较强的偏北风增量,使台风西侧的辐合有所增强;而在300 hPa高度层,台风中心的西南侧有偏北风增量,台风中心的西北侧有偏南风增量,使台风

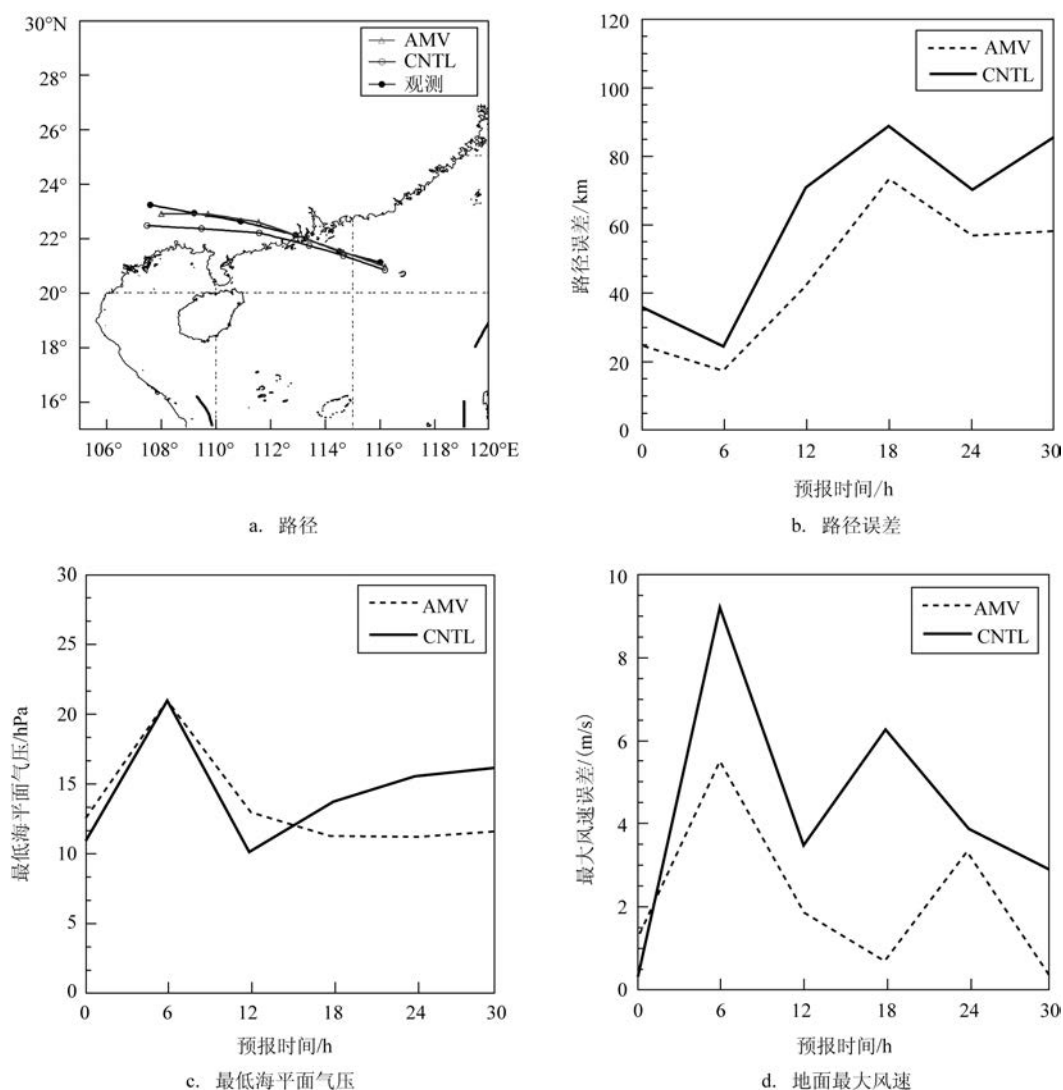


图5 2017年8月22日18时—24日00时预报结果

Fig.5 Forecasts from 1800 UTC on August 22, 2017 to 0000 UTC on August 24, 2017

西侧的辐散有所增强。由于低层气流辐合和高层辐散可以产生垂直的气流,因此高层300 hPa的西南风场增量通过中层与高层之间的垂直动量输送影响到中层500 hPa的风场,使500 hPa的西南风加强。台风“天鸽”在登陆华南后的路径较控制试验向北调整,这与实际观测更接近。在300 hPa高度增量场上还可以看出,在台风位置,分析增量可以近似形成完整的气旋式环流,由此可以判断,云导风资料同化增强了台风的强度。中高层大气在同化云导风资料后与控制试验相比可以更有效调节台风风场,最终改进台风的路径和强度预报。

5.3 相对湿度增量分析

相对湿度可以反映大气中的水汽状况,台风的维持和降水都需要大气湿度达到一定的数值,相对湿度数值越大,水汽条件越好,系统维持时间更长。图7是2017年8月22日06时低层925 hPa和850 hPa同化了云导风资料后的相对湿度增量,在副热带高压控制的区域相对湿度增量为负,反映出该地区空气中水汽含量较少,以下沉气流为主。台风中心位置位于20.5°N, 118.8°E,同化了云导风资料后,台风中心的相对湿度增量基本为0,台风中心以外的地

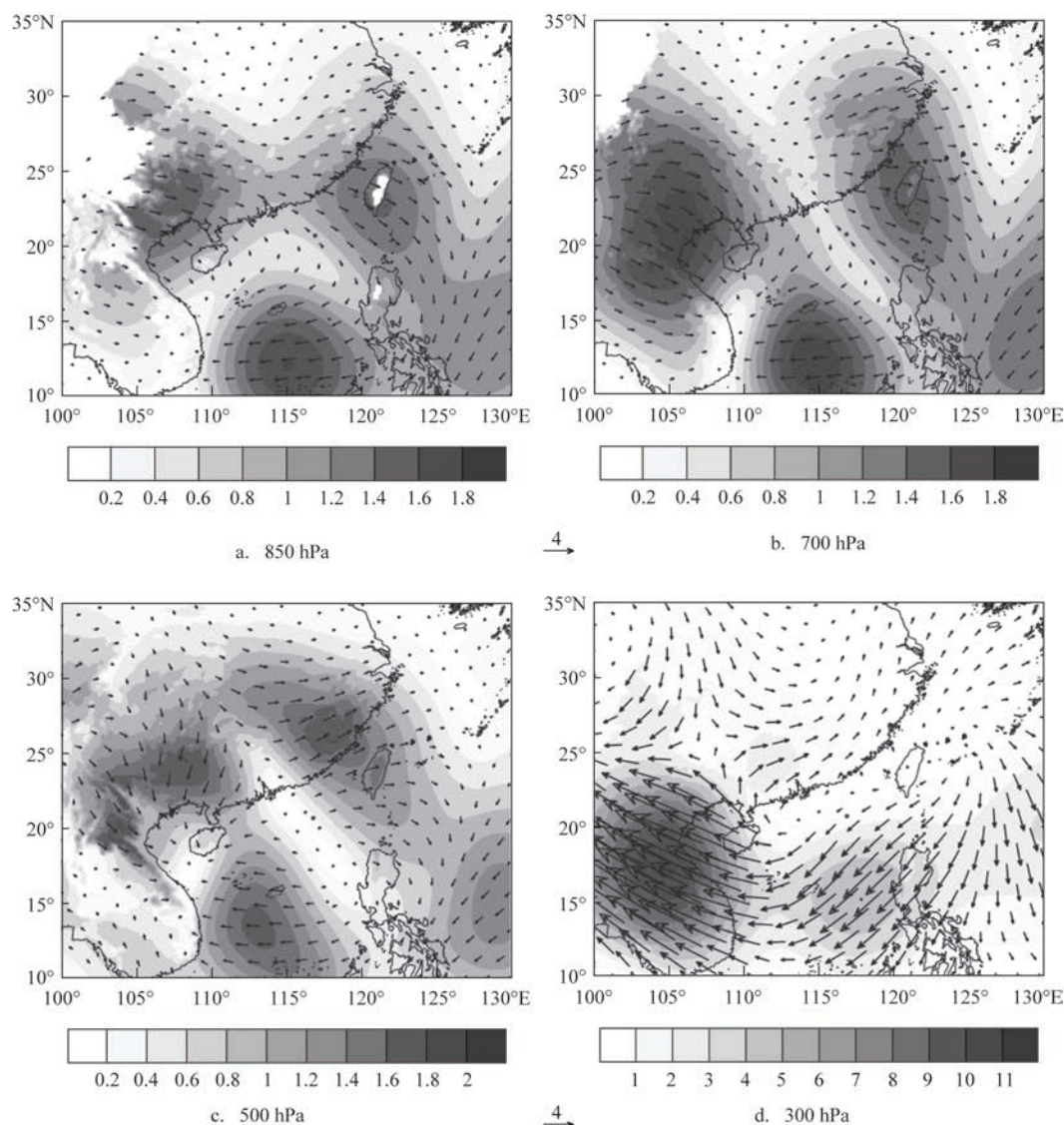


图6 2017年8月22日06时水平风场增量(单位:m/s)

Fig.6 Horizontal wind increment at 0600 UTC on August 22, 2017 (unit: m/s)

区相对湿度增量主要为正。850 hPa相对湿度增量的绝对值普遍大于925 hPa。由于台风的移动和发展需要充足的水汽供应,同化了云导风资料后台风附近出现正的相对湿度增量,意味着在台风附近水汽量比控制试验大,有利于台风的发展和维持。

5.4 500 hPa 引导气流分析

台风的移动主要受500 hPa引导气流的控制。图8是控制试验和同化了云导风资料后2017年8月22日18时500 hPa引导气流的模拟结果。由图所

示,500 hPa台风受东南引导气流的影响沿西北路径移动。在台风中心东北部,云导风同化加强了东南气流强度,并且使台风外围的大风区域加大。在台风尺度足够大时,可以近似认为其满足地转平衡关系,即气压梯度越大,地转风越强。同化了云导风资料后台风会更快地向西北方向移动,与实际情况接近。

5.3 T-logP 图分析

图9是基于探空资料绘制的香港站(站号:

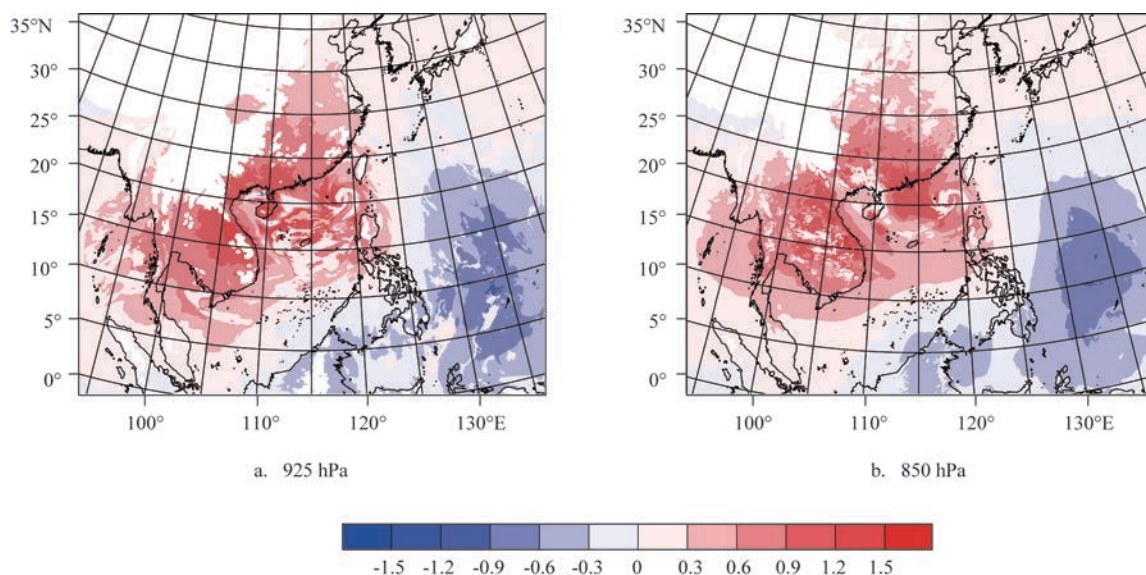


图7 2017年08月22日06时相对湿度增量(单位:%)

Fig.7 Relative humidity increment at 0600 UTC on August 22, 2017 (unit: %)

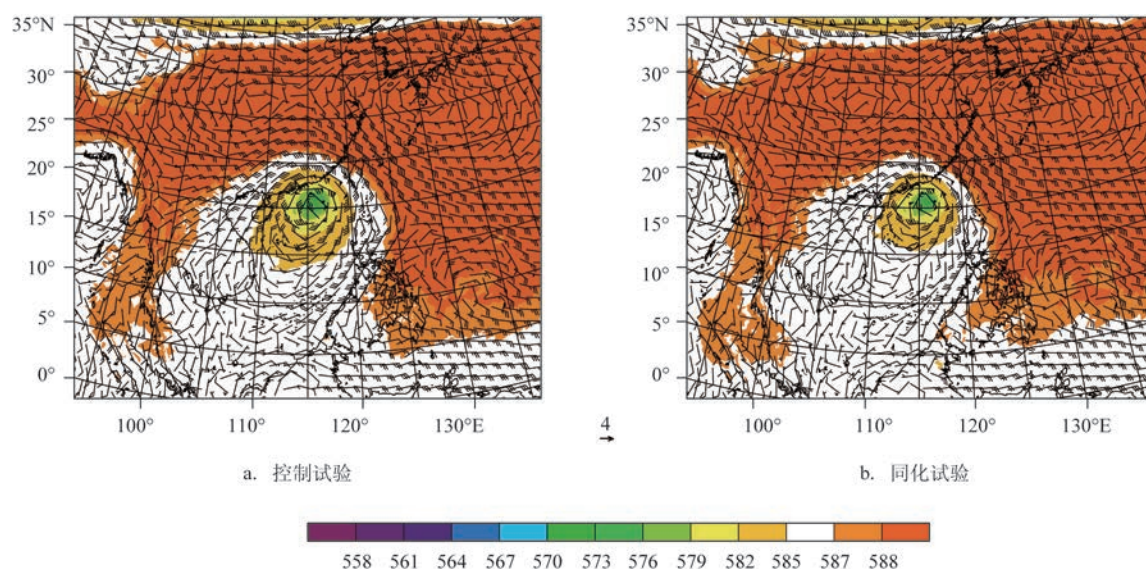


图8 2017年8月22日18时500 hPa 风速(单位:m/s)和位势高度(单位:10 gpm)

Fig.8 500 hPa wind speed (unit: m/s) and geopotential height (unit: 10 gpm) at 1800 UTC on August 22, 2017

45004)的温度-对数压力(Temperature-log Pressure, T-logP)图,其中,灰虚线代表湿绝热线,黑粗线代表层结曲线,灰粗线代表露点曲线。由图9a观测可知从低层到高层有弱的垂直风切变,100 hPa为西风;由湿绝热线和层结曲线的相对位置可以看出,有正的不稳定能量;在300 hPa高度以下层结曲线和湿绝热线比较贴近,说明大气300 hPa高度以下的饱

和度较高,水汽含量大,有利于台风的发展。由图9b可以看出,控制试验的不稳定能量比观测小,垂直风切比观测大,抑制了台风的发展。此外,控制试验的层结曲线和湿绝热线仅在700 hPa以下比较贴近,水汽条件与观测相差较大。由图9c可以看出,同化试验的不稳定能量增加,层结曲线和湿绝热线在300 hPa以下贴近,与观测相近。

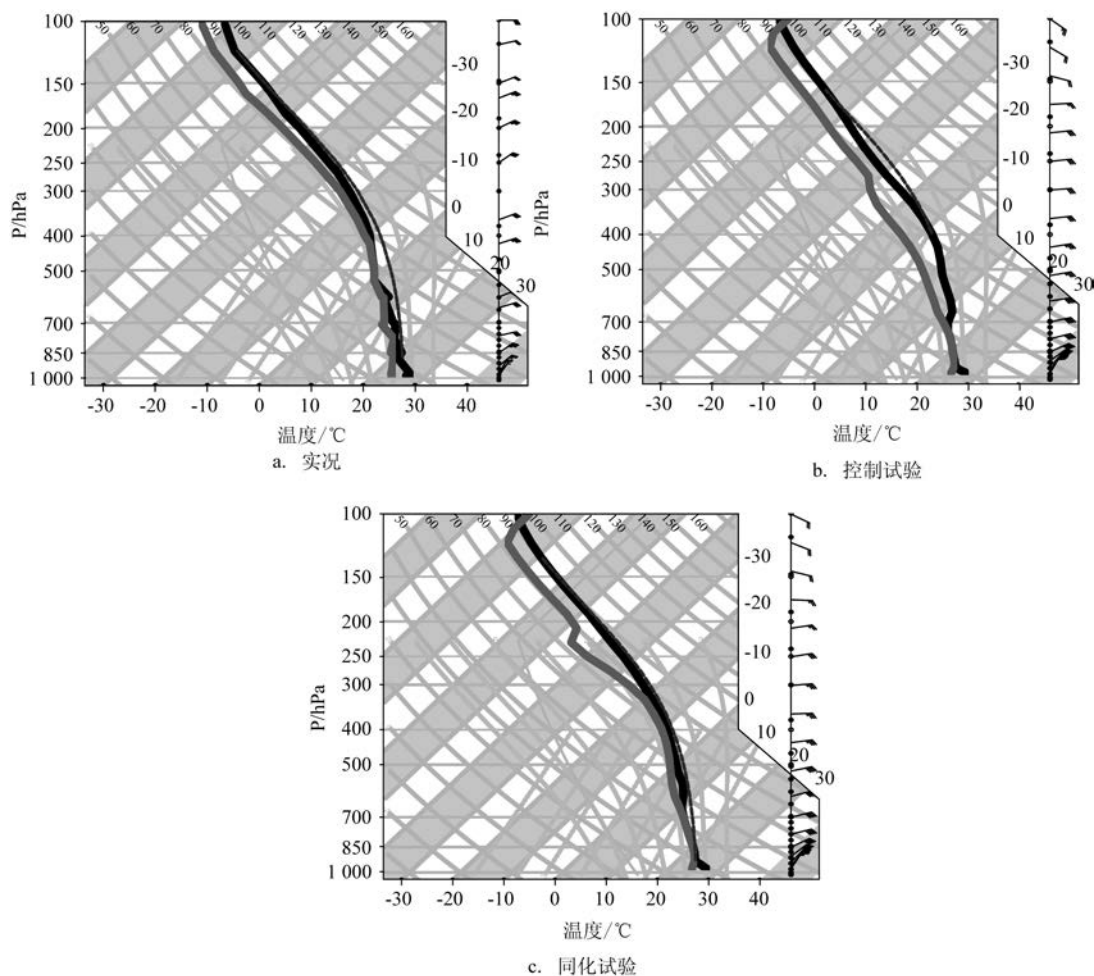


图9 温度-对数压力探空

Fig.9 Temperature-log pressure sounding

6 结论

本文选取了2017年8月22日登陆我国的强台风“天鸽”,使用3.9.1版本的WRF模式及其同化系统,考察FY-2G卫星云导风资料同化对台风数值预报的影响,并进行了30 h的确定性预报,同时对影响台风发展移动的多个要素进行考察分析。结论如下:

(1)同化试验模拟的台风路径预报误差更小。由于云导风资料集中在中高层大气,模拟出的台风强度不会因为台风登陆后受到地面的摩擦而产生较大误差。

(2)同化卫星云导风资料能够增加模式初始场中台风周围的风矢量信息,并且为中高层台风周围的大气增加正的风矢量。中高层之间的垂直动量

输送使得台风向北移动的引导气流加强,台风路径也随之得到准确调整。

(3)卫星云导风资料同化能够使模式更好地模拟台风结构。同化试验在台风中心附近模拟出了正的相对湿度增量,有利于台风的维持;同时,同化试验模拟的T-logP探空图也更接近观测。

本研究实现了FY-2G云导风资料的三维变分同化试验,个例的总体效果表明,云导风资料的同化能够有效改进台风“天鸽”的数值预报效果。需要指出的是,本研究是基于一个台风个例展开的,为了充分检验FY-2G云导风的效果应增加更多的台风个例进行测试。在同化方法上,本研究采用的是3DVAR方法,在今后的研究中应考虑更高级的同化方法,如混合同化方法,以进一步改进预报效果。在资料的使用上,本研究仅采用了含有高层风

场信息的卫星云导风资料,缺失了低层风场信息,未来将进一步尝试基于云导风资料和微波辐射计资料的多源资料联合同化试验,以进一步提高台风数值预报的准确度。

致谢:本论文的数值计算得到了南京信息工程大学高性能计算中心的计算支持和帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- [1] Pielke Jr R A, Gratz J, Landsea C W, et al. Normalized hurricane damage in the United States: 1900-2005[J]. *Natural Hazards Review*, 2008, 9(1): 29-42.
- [2] 赵珊珊, 任福民, 高歌, 等. 近十年我国热带气旋灾害的特征研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(3): 424-432.
Zhao S S, Ren F M, Gao G, et al. Characteristics of Chinese tropical cyclone disaster in the past 10 years[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(3): 424-432.
- [3] 李泽椿, 张玲, 钱奇峰, 等. 中央气象台台风预报业务的发展及思考[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(1): 10-19.
Li Z C, Zhang L, Qian Q F, et al. The development and consideration of typhoon forecast operation of National Meteorological Center[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(1): 10-19.
- [4] 高元勇, 邢建勇, 陈耀登. MPAS-A 模式中不同积云对流参数化方案对西北太平洋台风模拟效果的影响[J]. *海洋预报*, 2019, 36(5): 10-18.
Gao Y Y, Xing J Y, Chen Y D. Influence of different cumulus convection parameterization schemes on the simulation of typhoon in the Northwest Pacific in MPAS-A[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(5): 10-18.
- [5] 薛纪善. 气象卫星资料同化的科学问题与前景[J]. *气象学报*, 2009, 67(6): 903-911.
Xue J S. Scientific issues and perspective of assimilation of meteorological satellite data[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, 67(6): 903-911.
- [6] Bhatia R C, Khanna P N, Prasad K, et al. Use of meteosat-5 derived winds for analysis of two tropical cyclones affecting Gujarat coast on 20 may, 1999 and Orissa coast on 29 October, 1999[C]// *Proceedings of the 5th International Winds Workshop*. Lorne: European Organisation, 2000: 135-142.
- [7] Soden B J, Velden C S, Tuleya R E. The impact of satellite winds on experimental GFDL hurricane model forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(4): 835-852.
- [8] Velden C S, Bedka K M. Identifying the uncertainty in determining satellite-derived atmospheric motion vector height attribution[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2009, 48(3): 450-463.
- [9] Wu T C, Velden C S, Majumdar S J, et al. Understanding the influence of assimilating subsets of enhanced atmospheric motion vectors on numerical analyses and forecasts of tropical cyclone track and intensity with an ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2015, 143(7): 2506-2531.
- [10] 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟[J]. *气象学报*, 2002, 60(3): 309-317.
Zhou B, Xu H M, Wu G X, et al. Numerical simulation of CMWDA with it's impacting on torrential rain forecast[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2002, 60(3): 309-317.
- [11] 何斌, 翟国庆, 高坤, 等. 云迹风资料同化对东亚海域风场数值模拟的影响[J]. *海洋学报*, 2007, 29(6): 23-32.
He B, Zhai G Q, Gao K, et al. The impact of cloud motion wind data on numerical simulation of wind field in the sea area of Eastern Asia[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(6): 23-32.
- [12] 何志新. 云迹风资料在台风数值模拟中的应用[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
He Z X. Application of cloud motion wind data in numerical simulation of typhoon[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2009.
- [13] 马侠霖, 罗鹏, 陈志斌, 等. 基于尺度不变特征变换的云导风计算方法[J]. *气象科技*, 2014, 42(3): 391-396.
Ma X L, Luo P, Chen Z B, et al. A method for cloud motion wind vector prediction based on scale-invariant feature transform[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2014, 42(3): 391-396.
- [14] 万晓敏, 龚建东, 韩威, 等. FY-4A 云导风在 GRAPES_RAFS 中的同化应用评估[J]. *气象*, 2019, 45(4): 458-468.
Wan X M, Gong J D, Han W, et al. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS[J]. *Meteorological Monthly*, 2019, 45(4): 458-468.
- [15] 束艾青, 许冬梅, 沈菲菲, 等. 不同控制变量的 AMSR2 资料同化方法对台风“山神”预报的影响研究[J]. *海洋预报*, 2019, 36(5): 19-29.
Shu A Q, Xu D M, Shen F F, et al. Different background fields and covariance schemes in AMSR2 radiance data assimilation and their impacts on the forecast and analysis of Typhoon Son-tinh[J]. *Marine Forecasts*, 2019, 36(5): 19-29.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice micro-physical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(1): 103-120.
- [19] Kain J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update [J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2004, 43

- (1): 170-181.
- [20] Chen F, 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 隋新秀, 王振会, 鲍艳松, 等. FY-2E晴空风矢同化对台风分析和预报的影响研究[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6): 819-831.
- Sui X X, Wang Z H, Bao Y S, et al. Study on the application of AMVs in cloud-free regions based on FY-2E satellite in typhoon analysis and forecast[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(6): 819-831.

Application of FY-2G AMVs data assimilation in typhoon "Hato" numerical forecasting

XU Dongmei^{1,2,3}, SHU Aiqing¹, LI Hong⁴, WU Haiying⁵, HE Zhixin⁶, SHEN Feifei^{1,2,4}, ZHUANG Yuxin¹

(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 110000 China; 4. Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai 200030 China; 5. Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210041 China; 6. Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031 China)

Abstract: In order to explore the influence of FY-2G AMVs data assimilation on typhoon forecast, FY-2G AMVs data assimilation and numerical simulation experiments are conducted in this paper by taking typhoon Hato (No.1713) as an example that landed in China in August 2017. The Global Forecasting System data are used as background, and the mesoscale numerical model and data assimilation method are the WRF and 3DVAR data assimilation module of the Weather Research and Forecasting model Data Assimilation system, respectively. The results show that the typhoon track, intensity, and maximum wind speed simulated with AMVs data assimilation match better with the observation. Compared with the control experiment, AMVs data assimilation can provide abundant wind vector information in the background field and enhance the strength of convective clouds around the typhoon and its steering flow. Therefore, the internal structure of typhoon can be well simulated, and the water vapor condition and dynamic condition that affect the development and maintenance of the typhoon can be improved.

Key words: FY-2G AMVs; WRF model; 3DVAR; numerical prediction