

万晓敏, 龚建东, 韩威, 等, 2019. FY-4A 云导风在 GRAPES_RAFS 中的同化应用评估[J]. 气象, 45(4): 458-468. Wan X M, Gong J D, Han W, et al, 2019. The evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 45(4): 458-468 (in Chinese).

FY-4A 云导风在 GRAPES_RAFS 中的同化应用评估^{*}

万晓敏 龚建东 韩 威 田伟红

国家气象中心, 北京 100081

提 要: 云导风资料具有较高的时空分辨率特性, 是数值天气预报中重要的非常规观测资料之一。2016 年 12 月我国第二代静止气象卫星风云四号首颗试验卫星(FY-4A)成功发射。依据国家卫星气象中心提供的 2017 年 8 月 FY-4A 卫星红外和高空、低空水汽通道云导风测试数据, 选用美国国家环境预报中心的 FNL 全球分析资料为参考场, 对比分析云导风资料观测分布及偏差特征。评估结果表明, FY-4A 云导风测试数据分布稳定, 水汽通道云导风资料观测数明显多于红外通道; 红外通道云导风资料偏差和均方根误差最小, 水汽通道云导风资料在高层偏差较大。基于 GRAPES_RAFS 系统, 选取 2017 年第 13 号台风天鸽做 24 h 预报试验。个例试验结果表明, 同化 FY-4A 云导风资料对模式高度场和风场分析有一定调整作用, 特别是同化 FY-4A 水汽通道云导风资料, 对强降水落区和强度预报有所改善。

关键词: FY-4A 云导风资料, GRAPES 数值模式, 质量评估, 资料同化

中图分类号: P456, P413

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.04.002

The Evaluation of FY-4A AMVs in GRAPES_RAFS

WAN Xiaomin GONG Jiandong HAN Wei TIAN Weihong

National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Atmospheric motion vectors (AMVs) can supply plenty of useful information for numerical weather prediction. With the launch of the Chinese next generation geostationary meteorological satellite FY-4A in December 2016, it is necessary to evaluate the quality of FY-4A AMVs for the analysis field and precipitation forecast by GRAPES of CMA. In this study, by comparing with the background field based on NCEP FNL data, the qualities of FY-4A AMVs were assessed, and the results suggested that the distribution of FY-4A is stable and the quality of FY-4A infrared AMVs is better than FY-4A water vapor AMVs. Based on GRAPES_RAFS, three numerical experiments were conducted to examine the impact on analysis and forecast for severe Typhoon Hato at 0000 UTC 23 August 2017. The findings showed that assimilating FY-4A AMVs, especially FY-4A water vapor AMVs, has certain adjusting effect on wind and height analysis fields. Furthermore, due to the improvement of the initial fields for the model prediction, the performance of the precipitation forecast was improved. Conclusively, the FY-4A AMVs have positive impact on analysis field and precipitation forecast of GRAPES.

Key words: FY-4A AMVs, GRAPES numerical model, data assessment, data assimilation

^{*} GRAPES 专项(GRAPES-FZZX-2018-05)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506002 和 GYHY201506022)及国家气象中心青年基金(Q201705)共同资助

2018 年 5 月 16 日收稿; 2018 年 9 月 3 日收修定稿

第一作者: 万晓敏, 主要从事观测资料质量控制研究. Email: wanxm@cma.gov.cn

引言

气象卫星云导风资料具有较高的时空分辨率特性,能有效解决海洋等地区常规观测信息不足的问题,较好地描述对流层高层大气运动规律,进而改善数值模式初始场分析,提高数值预报的准确性,因而是数值天气预报中重要的非常规观测资料之一(Tomassini et al, 1999; 方翔等, 2000; 毕宝贵等, 2004; 陈静等, 2005; 王栋梁等, 2005; 许健民和张其松, 2006; 何芬等, 2007; Baker et al, 2012; 任素玲等, 2014)。近年来,国内外研究均表明云导风资料在暴雨和热带气旋的数值天气分析和预报中显示出较好的应用前景。周兵等(2002)针对暴雨强降水过程进行云导风资料同化试验,指出同化云导风资料可以改善数值模式高空风场,提高降水预报质量。庄照荣和薛纪善(2004)和王栋梁等(2005)分别选取 GRAPES 三维变分同化系统和 MM5 四维变分同化系统化对日本静止气象卫星 GMS-5 反演的云导风资料进行数值试验,指出同化云导风资料可以提高模式分析场及预报场中风压场的质量,特别是对较强的热带气旋路径影响作用明显。李宁等(2008)把云导风资料引入 WRF 三维变分同化系统,对台风麦莎的登陆过程进行 48 h 数值模拟试验,结果表明引入云导风资料对台风路径、强度变化和降水分布都有所改善。Berger et al (2011) 和 Wu et al (2014) 也指出同化逐小时云导风资料可以改进台风路径和强度预报。

我国从 20 世纪 70 年代开始实施独立的气象卫星计划,现已自主发展了风云极轨与静止两个系列的气象卫星,实现了稳定的系列化发展及业务化运行(许健民等, 2010)。目前,风云气象卫星云导风资料在数值预报中起着重要的作用。李华宏等(2008)、冯文等(2008)指出同化 FY-2C 云导风资料后可以加强暴雨区初始风场中低层西南气流,提高风场分析质量,进而改善暴雨预报的强度和落区。刘瑞等(2012)针对 0505 号台风海棠进行数值模拟试验,结果表明同化 FY-2C 云导风资料,有利于补充初始场可能未包含的中尺度信息,提高数值预报能力。李昊睿等(2012)利用背景场信息对 FY-2E 云导风资料进行高度调整,通过数值对比试验指出同化重定高后的 FY-2E 云导风资料,尤其是同化水汽通道云导风资料,能合理地调整初始风场,有效改

进台风路径预报。国家卫星气象中心于 2014 年对风云二号气象卫星云导风的反演算法做了全面的调整和改进(张其松等, 2011; 许健民等, 2014), 万晓敏等(2017)指出改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风对 GRAPES 数值模式同化和预报均有一定改善。

2016 年 12 月,第二代静止气象卫星风云四号首颗试验卫星(FY-4A)成功发射。2017 年 2 月,我国获取 FY-4A 卫星首批图像和数据。相较于风云二号(FY-2)卫星, FY-4A 卫星的功能和性能实现了跨越式发展(董瑶海, 2016; 张鹏等, 2016)。FY-4A 卫星云导风资料质量如何,在数值模式中的适用性如何,同化后对模式预报是否有改善? 基于这些问题,本文选取 FNL(final operational global analysis)资料作为参考场,对 FY-4A 云导风资料进行质量评估,并选取 GRAPES 区域模式,针对 2017 年第 13 号台风天鸽进行数值试验,探讨其对 GRAPES 区域模式初始场和台风降水预报的影响。

1 资料介绍

本文采用国家卫星气象中心提供的 2017 年 8 月 FY-4A 卫星红外和高空、低空水汽通道云导风测试数据,资料时间间隔为 3 h。

从观测数和分布情况来看,除个别时次, FY-4A 卫星云导风资料数量比较稳定,水汽通道云导风资料观测数明显多于红外通道(图 1)。FY-4A 卫星红外和高空、低空水汽通道云导风资料观测数的垂直分布反映出红外通道云导风观测主要集中在对流层中层;水汽通道云导风主要集中在对流层中高层,高空水汽通道云导风资料观测数在 300~200 hPa 附近达到峰值,低空水汽通道云导风资料观测数在 500~300 hPa 附近达到峰值(图略)。以 FY-4A 卫星云导风资料在 2017 年 8 月 23 日 0000 UTC 不同高度的水平分布来看(图 2),红外通道云导风资料主要集中在云系区域,水汽通道云导风分布更密集均匀,观测目标主要是对流层中高层的水汽分布特征,极大地丰富了海洋上的观测信息。就观测数而言,红外通道云导风资料在低层分布较少,观测数为 4761 份,中层观测数为 14054 份,在高层达到 16076 份;低空水汽通道云导风资料在中层观测数为 11322 份,在高层为 31611 份;高空水汽通道云导风资料在中层观测数为 6426 份,高层为 33274 份。

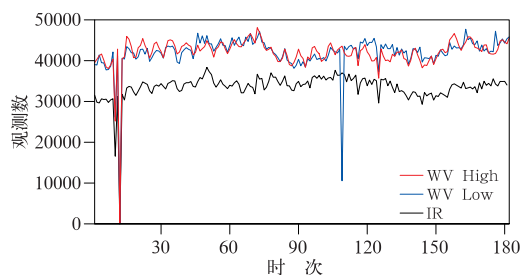


图 1 2017 年 8 月 FY-4A 卫星红外和
高空、低空水汽通道云导风资料
观测数时间序列

(黑色:红外通道,蓝色:低空水汽通道,
红色:高空水汽通道)

Fig. 1 Time series of the number of
FY-4A AMVs during August 2017

(black line: IR channel, blue line: WV channel
at low level, red line: WV channel at high level)

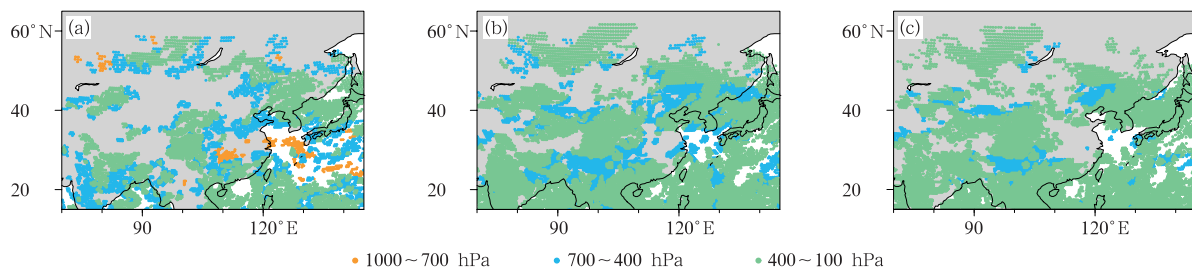


图 2 2017 年 8 月 23 日 0000 UTC FY-4A 卫星红外和高空、
低空水汽通道云导风资料观测数分布

(a)红外通道,(b)低空水汽通道,(c)高空水汽通道

Fig. 2 Data coverage plots for FY-4A AMVs at 0000 UTC 23 August 2017

(a) IR channel, (b) WV channel at low level, (c) WV channel at high level

目前国际上普遍采用云导风的质量标识码 QI (quality indicator) 作为衡量其质量好坏的依据,取值范围 $0 \sim 100$, QI 值越大,其可信度越高 (Velden et al, 1998)。由于本次评估的 FY-4A 云导风资料未提供质量标识码,因此对参与评估的云导风资料不进行 QI 值判断。在进行质量控制前对云导风资料进行高度限制,只保留 $975 \sim 150$ hPa 的数据,在此基础上进行风速气候极值检查、风速风向一致性检查及错误资料剔除。考虑到云导风资料观测相对密集,需要进行稀疏化处理去除多余的观测信息,减小观测误差的空间相关性,在这里采取按不同通道进行水平方向 200 km 为判据的稀疏化方案。

2.1 FY-4A 云导风资料误差分布

图 3 为经过质量控制后的 FY-4A 卫星红外和

2 FY-4A 云导风资料质量评估

选用美国国家环境预报中心的 FNL 全球分析资料作为评估的参考场,其空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,时间间隔为 6 h。为对比分析 FY-4A 云导风测试数据与现有业务风云卫星云导风资料之间的差别,选取同期 FY-2G 云导风资料进行对比,资料的时间间隔为 6 h (0000 UTC、 0600 UTC、 1200 UTC、 1800 UTC)。由于 FY-4A 测试数据时间间隔为 3 h,因此在统计分析中,以 FY-4A 云导风资料正点为基准,前后 3 h 同化窗内进行数据截断;垂直方向上分为三层:低层为 $1000 \sim 700$ hPa,中层为 $700 \sim 400$ hPa,高层为 $400 \sim 100$ hPa。

高空、低空水汽通道云导风资料偏差和均方根误差的垂直分布。可以看出,红外通道云导风资料质量最好,偏差维持在 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差维持在 $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;水汽通道云导风在对流层中层偏差维持在 $-2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 300 hPa 后逐渐增大到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均方根误差在高层增大到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

从概率密度分布反映出,经过质量控制, FY-4A 卫星红外通道和低空水汽通道云导风在低层较接近正态分布;在中层, FY-4A 卫星云导风整体为负偏差;在高层, FY-4A 卫星红外通道云导风表现为负偏差,水汽通道云导风为正偏差 (图 4)。

2.2 FY-4A 云导风与 FY-2G 云导风资料对比

相较于 FY-2G 星, FY-4A 星提升了观测性能,全圆盘图像观测时间从 30 min 缩短到 15 min,最高

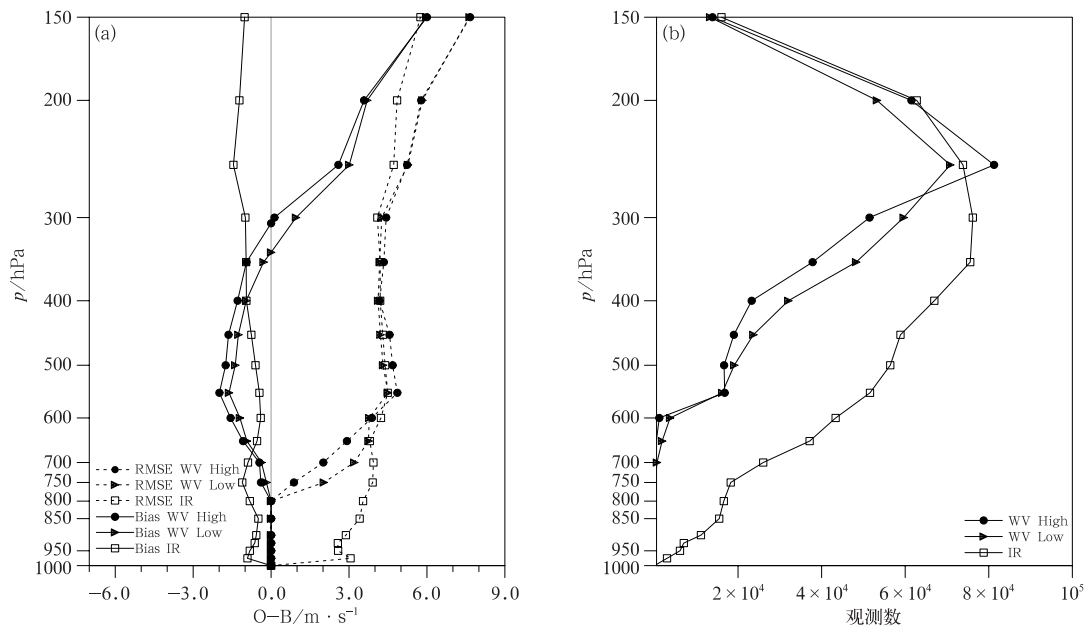


图3 2017年8月FY-4A卫星红外和高空、低空水汽通道云导风资料与FNL资料的偏差和均方根误差(a;实线:偏差,虚线:均方根误差)及对应观测数的垂直分布(b)

(图注同图1)

Fig. 3 Statistics for FY-4A AMVs in August 2017

(a) Bias (solid lines) and RMSE (dashed lines) distribution of U winds at vertical profile,

(b) the number after data quality control

(note same as Fig. 1)

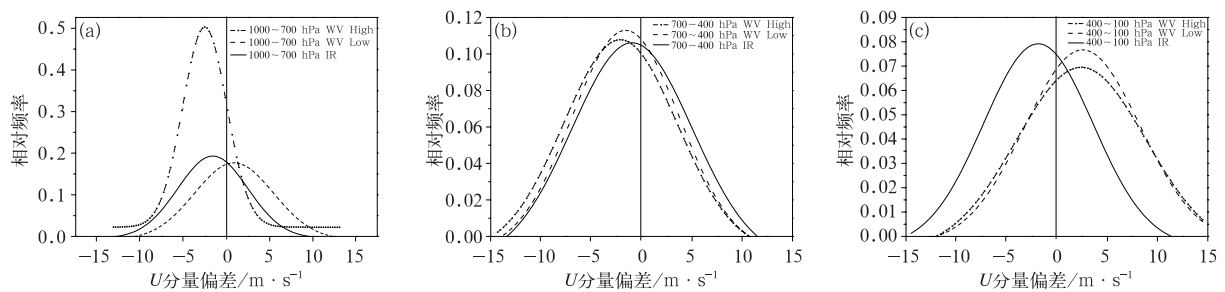


图4 2017年8月FY-4A卫星红外和高空、低空水汽通道云导风 U 分量偏差在不同高度的概率密度分布

(a)1000~700 hPa,(b)700~400 hPa,(c)400~100 hPa

(图注同图1)

Fig. 4 Probability density function distribution of FY-4A U wind bias at different levels in August 2017

(a) 1000—700 hPa, (b) 700—400 hPa, (c) 400—100 hPa

(note same as Fig. 1)

空间分辨率从1.25 km提高到0.5 km(张志清等, 2017),因此有必要对比分析这两颗卫星云导风资料的质量情况。

图5为FY-2G和FY-4A卫星红外通道云导风资料偏差和均方根误差的垂直分布。FY-2G红外

通道云导风资料在850 hPa以下为正偏差,在对流层中层负偏差可以达到 $-2.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,400 hPa以上逐渐为正偏差,风速偏差可达到 $2.46 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。FY-4A红外通道云导风资料偏差整体在 $-1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,相较于FY-2G在对流层中层偏差减小。从均

方根误差垂直分布来看, FY-4A 红外通道云导风资料在低层和高层的均方根误差略增大, 对流层中层均方根误差减小。就观测数而言, FY-4A 红外通道云导风资料数量约是 FY-2G 数量的 1~2 倍, FY-2G 红外通道云导风资料最大观测数位于 200 hPa, 而 FY-4A 在 300 hPa。

图 6 为 FY-2G 和 FY-4A 卫星水汽通道云导风资料偏差和均方根误差的垂直分布。两颗卫星水汽通道云导风资料偏差垂直分布特征基本一致, 在对流层中层为负偏差, 300 hPa 以上逐渐为正偏差。

随着高度升高, FY-4A 水汽通道云导风资料偏差逐渐增大, 偏差在高层可增大到 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 均方根误差可达到 $8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。对比观测数的垂直分布, FY-4A 水汽通道云导风资料数量约是 FY-2G 数量的 1~2 倍, 最大观测数高度均在 250 hPa。

整体而言, FY-4A 卫星云导风资料数量明显多于 FY-2G; 红外通道云导风资料质量在对流层中层有明显提高; 水汽通道云导风资料质量变差, 高层偏差较大。

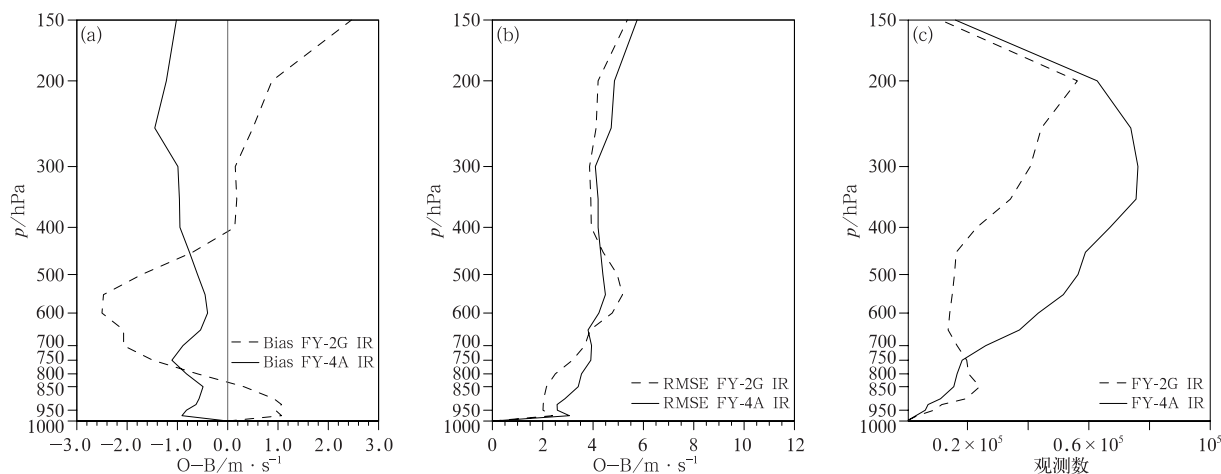


图 5 2017 年 8 月 FY-4A、FY-2G 卫星红外通道云导风资料与 FNL 资料的偏差 (a)

和均方根误差 (b) 及对应观测数 (c) 的垂直分布

Fig. 5 U wind Bias (a), RMSE (b) and the number (c) of FY-4A and FY-2G IR AMVs in vertical profiles in August 2017

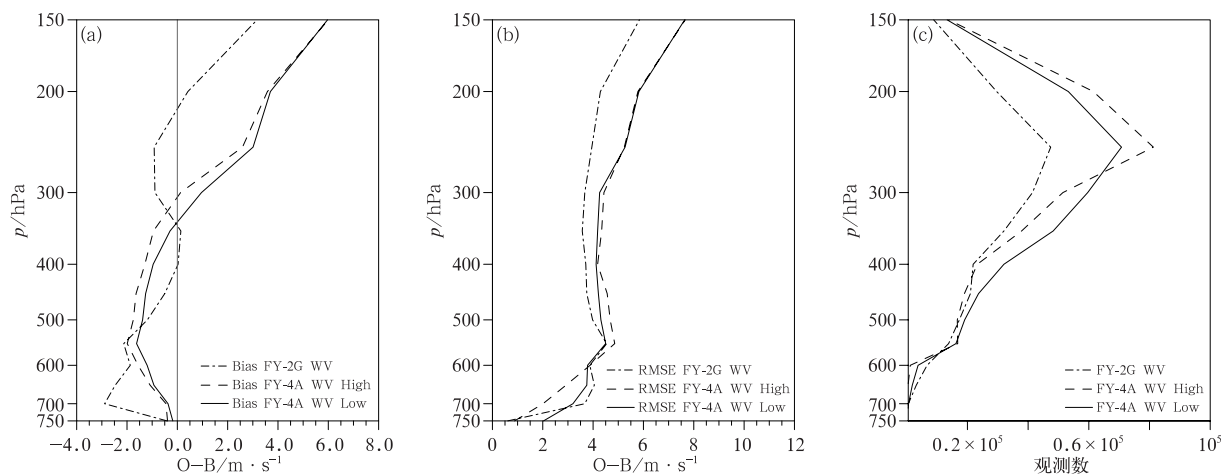


图 6 同图 5, 但实线为 FY-4A 高空水汽, 虚线为 FY-4A 低空水汽, 点划线为 FY-2G 水汽

Fig. 6 Same as Fig. 5, but solid lines for FY-4A WV channel at low level, dash lines for FY-4A WV channel at high level, and dot dash lines for FY-2G WV channel

3 数值试验

3.1 台风个例介绍

本文选取 2017 年第 13 号台风天鸽过程进行个例试验。2017 年 8 月 20 日,“天鸽”在西太平洋洋面上生成,之后不断增强,8 月 22 日 08 时(北京时)加强为强热带风暴,15 时加强为台风,8 月 23 日 07 时加强为强台风,并于 12:50 前后在我国广东省珠海南部沿海登陆,登陆时中心附近最大风力 14 级($45\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$),中心最低气压 950 hPa,8 月 24 日 14 时减弱为热带低压。在“天鸽”登陆前后,广东珠三角地区及沿海地区出现 11~14 级大风和严重风暴潮,造成严重灾害。8 月 22—25 日,华南地区南部、西南地区东部普遍出现 25 mm 以上降水,其中广东东部沿海和西南部、广西南部、云南东南部、贵州西部和四川西南部累计降水量普遍在 50 mm 以上,广东西南部、广西东南部达 100~250 mm,局地超过 250 mm(谢超和马学款,2017)。

3.2 数值模式及试验方案介绍

本文采用中国气象局数值预报中心研发的 GRAPES_RAFS(Global/Regional Assimilation Prediction System_Rapid Analysis and Forecast System),该系统主要包括观测资料预处理(包括资料检索及预处理、质量控制)、三维变分同化系统(GRAPES_3DVar)、以及云分析、数字滤波初始化、中尺度数值模式(GRAPES_Meso)等模块,可同化探空、飞机报、地面资料、船舶资料、雷达 VAD 风、GPS/PW、FY-2G 云导风,基于雷达、GNSS/RO(掩星)反演资料、卫星及地面观测云信息等资料进行三维云分析。GRAPES 全球模式资料主要提供冷启动三维变分同化背景场及冷暖启动模式积分所需的侧边界条件,GRAPES_Meso 系统提供暖启动三维变分同化背景场。GRAPES_RAFS 实时业务系统每

天 08 时(北京时)一次冷启动(冷启动做 48 h 预报),每 3 h 做一次同化分析和 24 h 预报,一天 8 次提供快速更新中尺度数值预报的预报产品(徐枝芳等,2013)。本次评估采用最新版本的 GRAPES_RAFS 系统,模式水平分辨率 $0.1^\circ\times 0.1^\circ$,预报范围($15^\circ\sim 65^\circ\text{N}$ 、 $70^\circ\sim 145^\circ\text{E}$),覆盖了整个中国区域,水平格点数为 751×501 。垂直方向为基于高度的地形追随坐标,取不等距 31 层。

选取 8 月 23 日 0000 UTC 作为初始时刻,积分 24 h 进行数值试验,为更好地了解 FY-4A 不同通道云导风资料对 GRAPES_RAFS 系统的影响,试验方案设置为三组:

试验一:同化探空(气压、湿度)、飞机报(温度、 u/v 风场)、地面资料(气压、湿度)、船舶资料(气压、 u/v 风场、湿度)、雷达 VAD 风、GPS/PW 资料。

试验二:同化 FY-4A 红外通道云导风资料,其他观测资料与试验一相同。

试验三:同化 FY-4A 红外和水汽通道云导风资料,其他观测资料与试验一相同。

3.3 试验结果分析

表 1 为 2017 年 8 月 23 日 0000 UTC 的 FY-4A 卫星云导风有效观测(去除缺省后)、经过质量控制后及三组试验同化所使用的云导风资料数量情况对比。其中,质量控制包括进行风速气候极值检查、风速风向一致性检查、剔除错误观测及进行稀疏化。经过质量控制后保留的红外通道云导风资料占有效观测的 22%;水汽通道云导风剔除较多,保留的水汽通道云导风观测数占有效观测的 7%。经过同化系统背景场检查后,同化系统使用红外通道云导风资料 8460 份,水汽通道云导风资料 7444 份,相较于质量控制后保留的观测数,红外通道云导风资料保留率为 28%,水汽通道云导风资料保留率为 31%。

图 7 为三组试验在 500 hPa 的风压场。试验一:台风低压中心为 5723 gpm,东侧外围风速可达 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$;试验二:台风低压中心为 5718 gpm,东

表 1 FY-4A 卫星云导风观测数对比
Table 1 Comparison of FY-4A AMVs statistics

	有效观测	质量控制	试验一	试验二	试验三
红外通道云导风	134917	30281	0	8460	8460
高空水汽通道云导风	164462	11580	0	0	7444
低空水汽通道云导风	171204	12071			

侧外围风速可达 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; 试验三: 台风低压中心为 5714 gpm, 东侧外围风场可达 $32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 所分析的风台强度和东侧外围风场均有一定增强, 与实况(图略)最为接近。陈联寿等(2002)指出当台风流场表现为东北密、西南疏的非对称结构时, 有利于促进台风向西加速移动。对比三组试验 500 hPa 高度场和风场分析之间的差异, 同化 FY-4A 红外通道云导风资料后, 台风中心高度场分析降低 4 gpm, 台风东

侧外围东南风增强了约 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 副热带高压有明显西伸调整, 非对称结构突出, 更有利于台风偏西移动。试验三同化了 FY-4A 水汽通道云导风资料后, 相较于试验一台风中心高度场分析降低 9 gpm, 台风东侧东南风增强超过 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 西北侧高度场分析降低了 6 gpm; 相较于试验二台风西北侧外围风场略增强, 高度场降低 5 gpm(图 8)。

在低层 850 hPa 分析场, 试验一的台风低压中

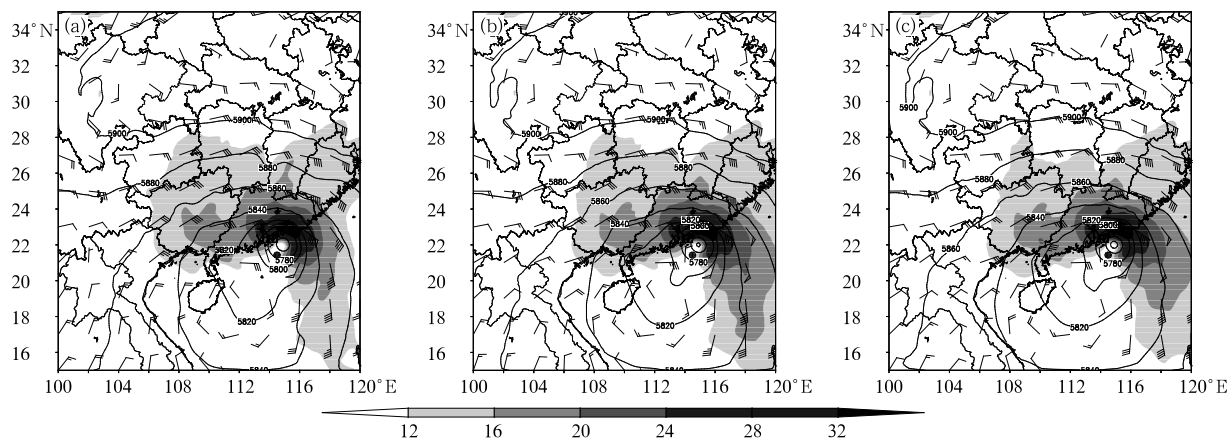


图 7 2017 年 8 月 23 日 0000 UTC 500 hPa 高度场(等值线, 单位: gpm)、
风场(矢量)及风速(阴影, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 试验一, (b) 试验二, (c) 试验三
(黑色实心圆点表示台风位置)

Fig. 7 500 hPa geopotential height field (contour, unit: gpm), wind field (vector) and
wind velocity analysis field (shadow, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 0000 UTC 23 August 2017
(a) Experiment 1, (b) Experiment 2, (c) Experiment 3
(Black dot represents the position of typhoon)

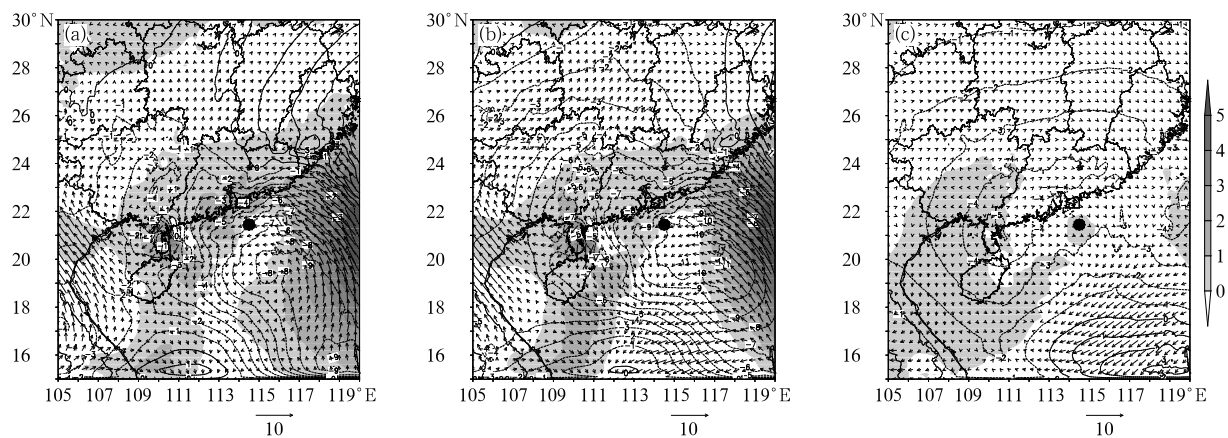


图 8 同图 7, 但为三组试验的偏差场
(a) 试验二与试验一的偏差, (b) 试验三与试验一的偏差, (c) 试验三与试验二的偏差
Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the analysis filed of three group experiments
(a) Bias of Experiment 2 and Experiment 1, (b) Bias of Experiment 3 and
Experiment 1, (c) Bias of Experiment 3 and Experiment 2

心为 1292 gpm。同化 FY-4A 云导风资料后, 试验二的台风低压中心为 1283 gpm, 试验三的台风低压中心为 1279 gpm, 台风外围东侧风场增强, 水汽输送明显, 试验二和试验三对台风中心强度和风场的分析更接近实况。同时台风西侧外围螺旋雨带区域有明显辐合, 促使了对流云系的发展, 水汽在此处辐合抬升, 这种动力结构有利于强降水的维持(图 9)。由于在大气低层基本没有水汽通道云导风资料, 所以试验二和试验三间的风场差异很小。相较于试验一和试验二, 试验三台风西侧外围高度场可分别降

低 16 和 4 gpm, 反映出高层同化 FY-4A 水汽通道云导风资料对低层高度场会有所影响(图略)。

选取 FNL 资料作为参照场, 计算三组试验高度场分析结果与 NCEP 分析的均方根误差(图 10)。在 300 hPa 以下, 试验一高度场均方根误差为 3 gpm, 试验二可达到 5 gpm, 试验三可达到 4 gpm; 300 hPa 以上, 试验一高度场均方根误差逐渐增大, 在 100 hPa 可以达到 12 gpm, 而试验二保持在 3~6 gpm, 试验三保持在 3~4 gpm, 反映出同化 FY-4A 云导风资料后模式高层高度场的均方根误差有

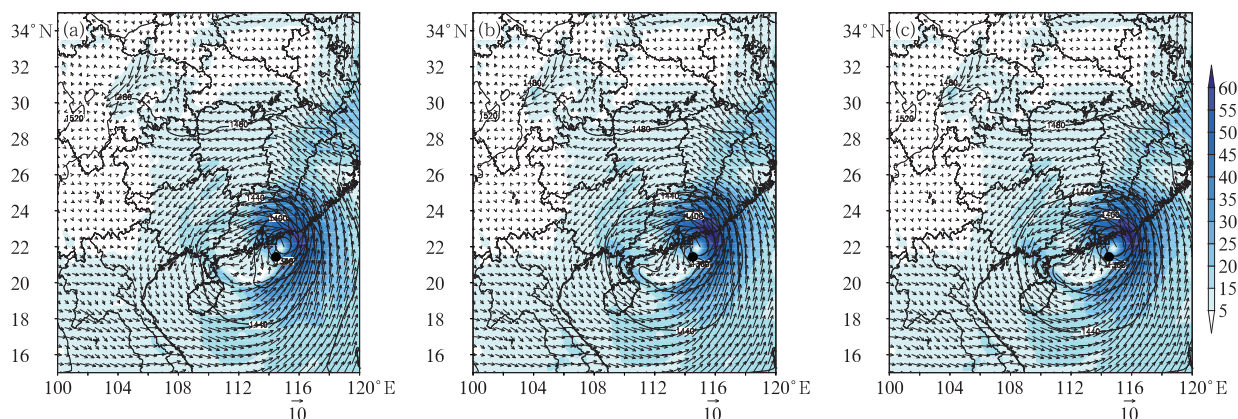


图 9 同图 7, 但为 850 hPa 高度场(等值线, 单位: gpm)、风场(矢量, 单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和水汽通量(阴影, 单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for 850 hPa geopotential height (contour, unit: gpm), wind analysis (vector, unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and vapor transportation (shadow, unit: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

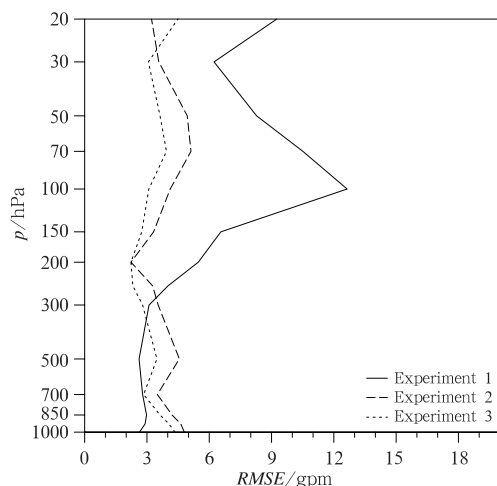


图 10 三组高度场与 NCEP 的分析场资料的均方根误差垂直分布

Fig. 10 RMSE of height analysis between GRAPES and NCEP (GRAPES minus NCEP) for three experiments

所减小, 特别是同化 FY-4A 水汽通道云导风资料对高度场高层分析效果改进明显。

8 月 23 日 0000 UTC 至 24 日 0000 UTC, 受台风影响, 我国广西东南部、广东西南部及海南岛东北部有大暴雨, 局部特大暴雨。对比降水实况(图 11a), 三组试验均较准确地描述了降水落区的大致位置。相较而言, 试验一预报的广西地区降水强度偏弱, 试验二和试验三对降水落区和强度预报有一定改善, 特别是试验三较好地预报出了位于广东雷州半岛的强降水落区(图 11)。华南地区 24 h 降水检验评分也反映出, 试验二和试验三的 ETS 评分高于试验一, 其中试验三从中雨到特大暴雨等级的 ETS 评分要明显高于试验一和试验二; 试验二的预报偏差 Bias 值在中雨到暴雨等级要低于试验一和试验三, 在特大暴雨级别稍高; 试验三的预报偏差 Bias 值在特大暴雨等级低于试验一和试验二(图 12)。

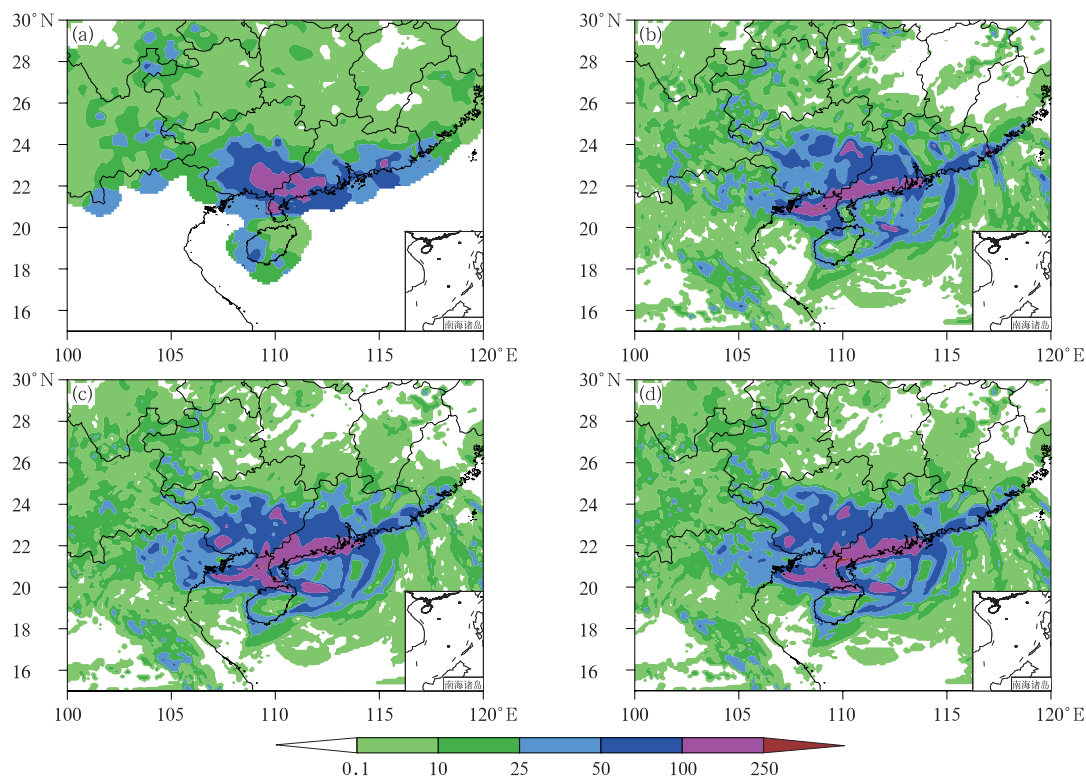


图 11 2017 年 8 月 23 日 0000 UTC 起报三组试验 24 h 降水预报和实况比较(单位:mm)

(a)降水实况,(b)试验一,(c)试验二,(d)试验三

Fig. 11 The 24 h precipitation at 0000 UTC 23 August 2017 (unit: mm)

(a) observed precipitation, (b) Experiment 1, (c) Experiment 2, (d) Experiment 3

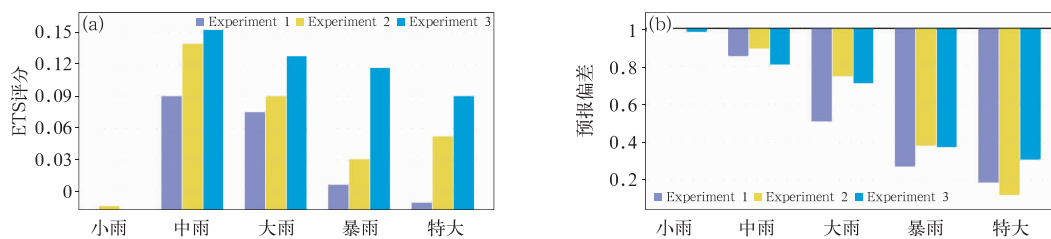


图 12 2017 年 8 月 23 日三组试验华南地区 24 h 降水预报检验评分比较

(a)ETS 评分,(b)预报偏差

Fig. 12 Verification of 24 h rainfall forecast in South China on 23 August 2017

(a) ETS, (b) Bias of model forecast

4 结论与讨论

本文首先分析了 2017 年 8 月 FY-4A 卫星红外通道和高低空水汽通道云导风测试数据的观测数和分布特征,并以 FNL 资料为参考场进行偏差和均方根误差统计,评估了 FY-4A 卫星云导风测试数据质量情况。采用 GRAPES_RAFS 区域数值模式,选

取 2017 年第 13 号台风天鸽过程进行个例试验,分析了 FY-4A 卫星云导风资料对 GRAPES 区域数值模式风场和高度场同化及对降水预报效果的影响。得到主要结论如下:

(1) 就 2017 年 8 月 FY-4A 卫星云导风测试数据而言,资料观测数有明显增加,其中水汽通道云导风资料观测数明显多于红外通道,有效补充了海洋观测信息。红外通道云导风观测主要集中在对流层

中低层,水汽通道云导风观测主要集中在对流层中高层。水平分布上, FY-4A 水汽通道云导风资料在对流层中高层分布更密集均匀,可以较好地描述高层大气中热带气旋的环流特征。

(2) FY-4A 卫星云导风测试数据偏差和均方根误差的垂直分布反映出,红外通道云导风资料质量最好,水汽通道云导风资料的偏差和均方根误差随着高度升高逐渐增大。对比 FY-2G 云导风资料, FY-4A 测试数据的红外通道云导风资料在对流层中层质量有所改善,水汽通道云导风资料偏差和均方根误差在高层变大。

(3) 针对台风天鸽过程,选取 2017 年 8 月 23 日进行个例试验。同化结果表明:试验一对台风中心的位置和强度预报均有明显偏差,同化 FY-4A 云导风资料对模式高度场和风场分析有一定调整作用。在 500 hPa,试验二和试验三副热带高压西伸加强,有利于台风加速偏西移动。特别是加入 FY-4A 水汽通道云导风资料后,试验三台风外围东南气流增强明显,台风强度分析更接近实况。在 850 hPa,同化 FY-4A 红外通道云导风资料后,试验二台风外围东侧水汽输送增强,西侧螺旋雨带区有明显辐合,有利于强降水的维持。尽管低层基本没有水汽云导风资料分布,但高层对 FY-4A 水汽通道云导风资料的同化仍会影响 850 hPa 高度场分析。GRAPES 区域模式高度场均方根误差的垂直分布表明同化 FY-4A 云导风资料对高层高度场同化有改善,试验二和试验三的高度场均方根误差在 300 hPa 以上有明显减小。对比 24 h 降水预报结果,虽然三组试验均能预报出降水落区的大致位置,但试验一预报的降水强度偏弱;试验二和试验三对降水强度预报有所改善,特别是试验三较好地预报了位于广东雷州半岛的强降水落区。华南地区 24 h 降水检验评分表明试验三从中雨到特大暴雨等级的 ETS 评分要明显高于试验一和试验二,对应预报偏差也有所减小。

通过个例试验结果表明:在台风为主要影响系统情况下,同化 FY-4A 卫星云导风资料有利于丰富大气观测信息,特别是同化水汽通道云导风资料对高层环流结构描述更为细致,合理利用这些观测可以进一步改进数值模式初始场,提高数值模式降水预报效果。当然,在本次评估中,因数据未提供质量标识码, FY-4A 水汽通道云导风资料偏差较大,部分质量较差的观测也会对模式同化分析和预报结果

产生影响。因此,针对不同质量标识码的 FY-4A 云导风资料进行评估并开展数值试验是十分必要的。同时,本文仅针对一个时次的个例进行研究分析,对于 FY-4A 卫星云导风资料在数值模式业务应用中的稳定性及不同降水个例的适用性还需要更深层次的研究。

致谢:衷心感谢国家卫星气象中心张晓虎博士提供的测试数据。

参考文献

- 毕宝贵,林建,徐晶,2004. 气象卫星资料在天气预报分析业务中的应用[J]. 气象,30(11):19-23. Bi B G, Lin J, Xu J, 2004. Application of satellite data in operational weather forecast[J]. Meteor Mon, 30(11):19-23(in Chinese).
- 陈静,薛纪善,颜宏,2005. 一种新型的中尺度暴雨集合预报初值扰动方法研究[J]. 大气科学,29(5):717-726. Chen J, Xue J S, Yan H, 2005. A new initial perturbation method of ensemble meso-scale heavy rain prediction[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5):717-726 (in Chinese).
- 陈联寿,徐祥德,罗哲贤,等,2002. 热带气旋动力学引论[M]. 北京:气象出版社:39-41,92-99. Chen L S, Xu X D, Luo Z X, et al, 2002. An Introduction to Tropical Cyclone Dynamics[M]. Beijing, China Meteorological Press:39-41,92-99(in Chinese).
- 董瑶海,2016. 风云四号气象卫星及其应用展望[J]. 上海航天,33(2):1-8. Dong Y H, 2016. FY-4 Meteorological Satellite and its application prospect[J]. Aerospace Shanghai, 33(2):1-8(in Chinese).
- 方翔,许健民,张其松,2000. 高密度云导风资料所揭示的发展和不断发展热带气旋的对流层上部环流特征[J]. 热带气象学报,16(3):218-224. Fang X, Xu J M, Zhang Q S, 2000. Developing and non-developing tropical cyclones as revealed by high density cloud motion winds[J]. J Trop Meteor, 16(3):218-224(in Chinese).
- 冯文,万齐林,陈子通,等,2008. 逐时云迹风资料同化对暴雨预报的模拟试验[J]. 气象学报,66(4):500-512. Feng W, Wan Q L, Chen Z T, et al, 2008. Hourly assimilation of cloud motion winds and its impact on torrential rain forecast[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):500-512(in Chinese).
- 何芬,沈桐立,贺哲,等,2007. 伴随同化系统中用云导风修正模式地形的试验[J]. 高原气象,26(2):300-308. He F, Shen T L, He Z, et al, 2007. Study on model terrain parameter modification using cloud-derived wind in the MM5 adjoint-model assimilation system[J]. Plateau Meteor, 26(2):300-308(in Chinese).
- 李昊睿,丁伟钰,薛纪善,等,2012. FY-2E 云迹风资料的高度调整对“灿都”(1003)台风路径数值预报影响的研究[J]. 热带气象学报,28(3):348-356. Li H R, Ding W Y, Xue J S, et al, 2012. A study on the application of FY-2E cloud drift wind height reassignment in numerical forecast of Typhoon Chanthu (1003) track[J]. J Trop Meteor, 28(3):348-356(in Chinese).
- 李华宏,王曼,薛纪善,等,2008. FY-2C 云迹风资料在中尺度数值模

- 式中的应用研究[J]. 气象学报, 66(1): 50-58. Li H H, Wang M, Xue J S, et al, 2008. A study on the application of FY-2C cloud drift wind in a mesoscale numerical model[J]. Acta Meteor Sin, 66(1): 50-58(in Chinese).
- 李宁, 沈桐立, 闵锦忠, 2008. 一次台风登陆过程的变分同化模拟试验[J]. 气象科学, 28(3): 244-250. Li N, Shen T L, Min J Z, 2008. Variational assimilation experiment on landfall of typhoon[J]. Sci Meteor Sin, 28(3): 244-250(in Chinese).
- 刘瑞, 翟国庆, 王彰贵, 等, 2012. FY-2C 云迹风资料同化应用对台风预报的影响试验研究[J]. 大气科学, 36(2): 350-360. Liu R, Zhai G Q, Wang Z G, et al, 2012. Impact of application of cloud motion wind data from FY-2C satellite of typhoon case[J]. Chin J Atmos Sci, 36(2): 350-360(in Chinese).
- 任素玲, 蒋建莹, 许健民, 2014. 卫星水汽通道探测所揭示的高空流场在南亚高压东侧强降水分析中的应用[J]. 气象, 40(6): 697-705. Ren S L, Jiang J Y, Xu J M, 2014. Application of upper troposphere circulation revealed by the satellite IR3 channel to heavy rainfall events analysis in the east side of South Asia high[J]. Meteor Mon, 40(6): 697-705(in Chinese).
- 万晓敏, 田伟红, 韩威, 等, 2017. FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究[J]. 气象, 43(1): 1-10. Wan X M, Tian W H, Han W, et al, 2017. The evaluation of FY-2E reprocessed IR AMVs in GRAPES[J]. Meteor Mon, 43(1): 1-10(in Chinese).
- 王栋梁, 梁旭东, 端义宏, 2005. 云迹风在热带气旋路径数值预报中的应用研究[J]. 气象学报, 63(3): 351-358. Wang D L, Liang X D, Duan Y H, 2005. Impact of four dimensional variational data assimilation of the cloud drift wind data on tropical cyclone track numerical forecast[J]. Acta Meteor Sin, 63(3): 351-358(in Chinese).
- 谢超, 马学款, 2017. 2017 年 8 月大气环流和天气分析[J]. 气象, 43(11): 1446-1452. Xie C, Ma X K, 2017. Analysis of the August 2017 atmospheric circulation and weather[J]. Meteor Mon, 43(11): 1446-1452(in Chinese).
- 许健民, 郭强, 陆其峰, 等, 2014. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新[J]. 气象学报, 72(5): 1023-1038. Xu J M, Guo Q, Lu Q F, et al, 2014. Innovations in the data processing algorithm for Chinese FY meteorological satellites[J]. Acta Meteor Sin, 72(5): 1023-1038(in Chinese).
- 许健民, 杨军, 张志清, 等, 2010. 我国气象卫星的发展与应用[J]. 气象, 36(7): 94-100. Xu J M, Yang J, Zhang Z Q, et al, 2010. Chinese meteorological satellites, achievements and applications[J]. Meteor Mon, 36(7): 94-100(in Chinese).
- 许健民, 张其松, 2006. 卫星风推导和应用综述[J]. 应用气象学报, 17(5): 574-582. Xu J M, Zhang Q S, 2006. Status review on atmospheric motion vectors-derivation and application[J]. J Appl Meteor Sci, 17(5): 574-582(in Chinese).
- 徐枝芳, 郝民, 朱立娟, 等, 2013. GRAPES_RAFS 系统研发[J]. 气象, 39(4): 466-477. Xu Z F, Hao M, Zhu L J, et al, 2013. On the research and development of GRAPES_RAFS[J]. Meteor Mon, 39(4): 466-477(in Chinese).
- 张鹏, 郭强, 陈博洋, 等, 2016. 我国风云四号气象卫星与日本 Himawari-8/9 卫星比较分析[J]. 气象科技进展, 6(1): 72-75. Zhang P, Guo Q, Chen B Y, et al, 2016. The Chinese next-generation geostationary meteorological satellite FY-4A compared with the Japanese Himawari-8/9 satellite[J]. Adv Meteor Sci Technol, 6(1): 72-75(in Chinese).
- 张其松, 许健民, 张晓虎, 2011. 风云二号卫星红外通道风高度指定改进研究[C]//2011 年第二十八届中国气象学会年会论文集. 厦门: 中国气象学会. Zhang Q S, Xu J M, Zhang X H, 2011. A study of improving height assignment of FY-2 infrared channel satellite[C]//28th Conference of Chinese Meteorological Society. Xiamen: Chinese Meteorological Society(in Chinese).
- 张志清, 陆风, 方翔, 等, 2017. FY-4 卫星应用和发展[J]. 上海航天, 34(4): 8-19. Zhang Z Q, Lu F, Fang X, et al, 2017. Application and development of FY-4 meteorological satellite[J]. Aerospace Shanghai, 34(4): 8-19(in Chinese).
- 周兵, 徐海明, 吴国雄, 等, 2002. 云迹风资料同化对暴雨预报影响的数值模拟[J]. 气象学报, 60(3): 309-317. Zhou B, Xu H M, Wu G X, et al, 2002. Numerical simulation of CMWDA with its impacting on torrential rain forecast[J]. Acta Meteor Sin, 60(3): 309-317(in Chinese).
- 庄照荣, 薛纪善, 2004. 云迹风资料的三维变分同化及对台风预报的影响试验[J]. 热带气象学报, 20(3): 225-236. Zhuang Z R, Xue J S, 2004. Assimilation of cloud-derived winds and its impact on typhoon forecast[J]. J Trop Meteor, 20(3): 225-236(in Chinese).
- Baker N L, Langland R, Pauley P M, et al, 2012. The impact of satellite atmospheric motion vectors in the U. S. Navy global data assimilation system-NWP results. Extended abstract[C]//11th International Winds Workshop. New Zealand: University of Auckland.
- Berger H, Langland R, Velden C S, et al, 2011. Impact of enhanced satellite-derived atmospheric motion vector observations on numerical tropical cyclone track forecasts in the western North Pacific during TPARC/TCS-08[J]. J Appl Meteor Climatol, 50(11): 2309-2318.
- Tomassini M, Kelly G, Saunders R, 1999. Use and impact of satellite atmospheric motion winds on ECMWF analyses and forecasts[J]. Mon Wea Rev, 127(6): 971-986.
- Velden C S, Olander T L, Wanzong S, 1998. The impact of multispectral GOES-8 wind information on Atlantic tropical cyclone track forecasts in 1995. Part I: dataset methodology, description, and case analysis[J]. Mon Wea Rev, 126(5): 1202-1218.
- Wu T C, Liu H, Majumdar S J, et al, 2014. Influence of assimilating satellite-derived atmospheric motion vector observations on numerical analyses and forecasts of tropical cyclone track and intensity[J]. Mon Wea Rev, 142(1): 49-71.