

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.

FY-2E 云导风的算法改进及其在 GRAPES 中的同化应用研究^{*1}

万晓敏¹ 田伟红¹ 韩 威¹ 王瑞文¹ 张其松² 张晓虎²

¹ 中国气象局数值预报中心,北京 100081

² 国家卫星气象中心,北京 100081

提 要: 2014 年国家卫星气象中心全面改进了风云二号卫星云导风产品算法,为评估算法改进后 FY-2E 云导风资料对我国 GRAPES 数值模式同化和预报的影响,根据国家卫星气象中心提供的 2013 年 8 月算法改进前后的 FY-2E 红外通道云导风资料,对比分析了两者的观测分布及偏差特征,并利用 GRAPES 全球模式进行了一个月的连续试验。结果表明,改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风观测数量明显增加,观测误差在 600~200 hPa 有所减小,风的平均偏差在高层减少,更满足正态分布;连续试验结果表明北半球和东亚地区风场在 300~150 hPa 分析中改进显著,风的平均偏差和均方根误差明显减少;预报结果显示 500 hPa 高度场预报距平相关系数略提高,均方根误差略减小;说明改进算法后的 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。

关键词: FY-2E 红外云导风资料,GRAPES 数值模式,资料同化,影响试验

中图分类号: P413,P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.01.001

The Evaluation of FY-2E Reprocessed IR AMVs in GRAPES

WAN Xiaomin¹ TIAN Weihong¹ HAN Wei¹ WANG Ruiwen¹ ZHANG Qisong² ZHANG Xiaohu²

¹ CMA Numerical Prediction Centre, Beijing 100081

² National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Atmospheric Motion Vectors (AMVs) can supply plenty of useful information for numerical weather prediction. With the improvement in the image navigation, data calibration and derivation algorithm, the quality of FY-2E is expected to be improved. Therefore, it is necessary to evaluate the improvement of FY-2E AMVs for the analysis field and precipitation forecast in GRAPES (Global/Regional Assimilation and Prediction System) of China. In this study, the old and the reprocessed FY-2E AMVs are used to analyze the characteristics of their horizontal and vertical structures and applied to GRAPES-3Dvar Global Assimilation Prediction System to compare their differences on the assimilation and prediction. The experiments using the data collected in August 2013 show some encouraging results, which show neutral to positive impact on wind analysis field, especially in high levels. Furthermore, due to the improvement of the initial fields for the model prediction, the performance of the anomaly correlation coefficient (ACC) and root mean square error (RMSE) slightly improved. Especially the observation error of the reprocessed FY-2E is lower than the old from 600 hPa to 200 hPa, which needs a further investigation. Conclusively, the reprocessed FY-2E AMVs have more positive impact on wind assimilation and forecast improvement in GRAPES.

Key words: FY-2E IR AMVs, Global/Regional Assimilation and Prediction System (GRAPES), data assimilation, impact experiment

^{*} GRAPES 专项 (GRAPES-FZZX-2016-05)、公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506002 和 GYHY201406012) 共同资助

2016 年 8 月 9 日收稿; 2016 年 11 月 2 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

气象卫星云导风产品是指用连续的几幅静止卫星示踪图像块(简称示踪云)的位移,并计算示踪云所代表的云或水汽特征所在的高度层次,从而获得这些层次上的风的估计值(董超华,1999;许健民和张其松,2006)。研究表明,静止卫星云导风资料能有效地弥补海洋、高原等地区常规观测的不足,为天气分析(毕宝贵等,2004;任素玲等,2014;冯业荣,1999;文凯等,2007)和数值预报提供大量有用的观测资料。近年来,云导风资料在数值预报中的应用研究取得了一些成果,国内外研究均表明云导风资料是数值天气预报中使用效果较好的非常规观测资料之一,能有效解决常规观测信息不足的问题(王栋梁等,2005;许健民和张其松,2006;马昊等,2016;Baker et al,2012)。Tomassini et al(1999)指出同化云导风资料对 ECMWF 模式初始风场有所改进,对于热带和南半球的预报效果改善明显。Baker et al(2012)的研究也反映出同化云导风资料对美国海军全球数值模式预报有显著的改进效果。庄照荣和薛纪善(2004)基于 GRAPES-3Dvar 系统同化 GMS-5 云导风资料进行台风预报试验,结果表明云导风资料可以改善模式分析场及预报场,并可以更准确地预报台风的路径和降水。

虽然云导风资料在数值预报中是很重要的非常规观测,但由于反演技术的局限,云导风资料的误差较大,限制了其在数值预报当中的应用效果。许健民等(1997)和 Xu et al(2002)提出了用红外和水汽两个通道的测值来指定云导风高度的算法,从而使薄的卷云得到运用,提高了 FY-2E 云导风资料的分布均匀度。陈华等(1999)用高度调整法对云导风资料高度进行质量控制,调整后的风场与探空观测资料对比低层风有明显改进。李昊睿等(2012)则利用背景场信息对 FY-2E 云导风资料进行高度调整,通过数值对比试验指出重定高方法能有效地调整云导风资料的高度,合理地改善初始风场,进而有效改进台风路径预报。李华宏等(2008)利用探空观测资料对 FY-2C 云导风资料进行偏差订正和质量控制,并通过 GRAPES-Meso 模式进行数值对比试验,结果表明通过质量控制,可以进一步提高云导风资料的精度,进而很好地改善降水预报的强度和落区。薛湛彬等(2011;2013)对 FY-2E 云导风资料采用高度

变分调整和新的观测误差方案,数值试验结果表明,采用新的观测误差方案和经过高度调整后的 FY-2E 云导风资料能提高数值模式在北半球的短期预报能力。

尽管以上研究表明云导风对资料同化和预报有一定影响,对云导风资料采取订正调整技术能一定程度改进其质量,进一步提高同化预报效果,但是从资料生成源头出发才是改进云导风质量的最根本途径,也更能充分发挥其作用。因此,2014 年国家卫星气象中心对风云二号气象卫星云导风从反演算法做了全面的调整和改进,改进算法后的 FY-2E 云导风资料质量如何,有哪些仍需改进,对 GRAPES 数值模式的同化和预报效果是否有改善?基于这些问题,本文对比分析了改进算法前后 FY-2E 红外通道云导风资料的分布情况及误差特征,利用 GRAPES 全球模式进行连续数值试验,以探讨改进算法后的 FY-2E 云导风资料对 GRAPES 全球模式同化分析和预报的影响,为业务应用进行了预先影响试验,提供有价值的参考依据(Han et al,2016)。

1 FY-2E 云导风算法改进介绍

2012 年以前,FY-2E 云导风资料存在样本数较少、风速偏低、低层风不可用等问题(薛湛彬等,2011)。国家卫星气象中心从 2012 年开始对算法逐步改进,2014 年对风云二号气象卫星云导风算法做了全面调整和改进(张其松等,2011;许健民等,2014),其改进主要有:

(1) 在云导风计算中采用了新的月亮定标方法,来提高云导风资料的精度。

(2) 去除了非正常卫星图像对风云二号气象卫星云导风图像定位的影响。

(3) 剔除卫星图像中的噪音点,改善了风矢量的地域一致性问题。

(4) 对示踪云建立了二次追踪,提高平均风速。

(5) 在云导风资料高度指定时考虑了大气中可能存在的逆温层,找出真正的地面温度,避免低层逆温影响云导风资料的质量。

(6) 当追踪区全部被云覆盖时,通过扩大搜索区,找出附近的地面,从而避免利用双通道方法计算云高时,无法使用地面向上传输的辐射量。

(7) 针对数值预报场中的误差进行订正。在利用双通道法指定云高的过程中,需要由准确的数值

预报温度场来计算出透明云红外/水汽关系的理论曲线。而实际过程中数值预报理论曲线和卫星实测曲线存在不匹配的情况,造成风矢量高度误差较大。因此国家卫星气象中心通过订正数值预报场中的误差,来改善数值预报资料与卫星观测资料之间的匹配关系。

(8) 选择对运动做出最大贡献的像元做卫星云导风的高度指定。过去的卫星云导风算法通常把示踪图像作为整体处理。这种算法不仅使风速估计偏低,而且难以在高度指定中精细地考察对卫星云导风做出贡献的云所起的作用。通过选择对运动做出最大贡献的像元,使得风矢量的追踪及风的高度指定更精细。

(9) 云导风布点由原来的每隔一个地理经纬度计算一个点调整为每隔 8 个像元来划分布点位置以及加密计算的方式,提高了图像质量,增加了风矢量的数量,由此可以得到更好的矢量分布。

2 云导风资料的分布及误差特征

2.1 资料与质量控制

本文使用的资料为国家气象卫星中心提供的算法改进前后的两组 FY-2E 红外通道云导风资料,资料时间为 2013 年 8 月。选用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的 FNL 全球分析资料(Final Operational Global Analysis)作为研究的参考场,对比分析算法改进前后 FY-2E 红外通道云导风资料的偏差和均方根误差分布情况。垂直方向上分为三层:低层为 1000~700 hPa,中层为 700~400 hPa,高层为 400~100 hPa。

数值试验中所用的各种卫星云导风资料在进入同化系统前必须对其进行质量控制,包括进行风速气候极值检查、风向一致性检查和剔除错误资料;因为云导风资料观测相对密集,需要进行稀疏化处理,从而去除多余的观测信息,减小观测误差的空间相关性,本文采取按不同通道进行水平方向 200 km 为判据的稀疏化方案。

目前,国际上采用云导风的质量标识码 QI (Quality Indicator)作为衡量云导风资料质量的好坏的依据,取值范围 0~100, QI 值越大,其可信度越高(Velden et al, 1998)。有研究表明 QI 值对静

止云导风资料的质量有一定指示意义(薛谔彬等, 2013),在实际业务应用中,综合考虑观测资料本身偏差特征及数值模式对观测资料的误差要求,将云导风高层、中层和低层的标准差阈值设定为 5, 4 和 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (薛谔彬等, 2011)。田伟红和万晓敏(2015)选取 FNL 资料作为背景场,分析了各通道不同 QI 值的云导风资料与 FNL 的偏差和均方根误差情况,以标准差阈值设定为标准,选取了 $QI > 80$ 的云导风资料进入 GRAPES 同化系统。因此,本文也依照 $QI > 80$ 的标准选取资料。

2.2 改进算法后的 FY-2E 云导风数量分布特征

统计了 2013 年 8 月算法改进前后的 FY-2E 红外通道云导风资料的数量,结果表明采用新的布点方式加大计算密度后, FY-2E 红外通道云导风资料数量显著增多, $QI > 80$ 的观测数占总观测数量的 83%,说明质量标识对 FY-2E 红外通道云导风的质量是有一定指示意义的(图 1)。图 2 为新旧算法的 FY-2E 红外通道云导风资料数量在不同高度的分布情况。从图 2 可以看出,海上云导风密度增加明显, $QI > 80$ 的观测数在高层增幅最大。在云导风资料质量控制过程中,需要进行稀疏化处理,从图 3 可以看出,改进算法的 FY-2E 红外通道云导风观测数在稀疏化处理后仍明显多于旧算法,说明新算法的 FY-2E 红外通道云导风观测数在密度分布上有所增加。

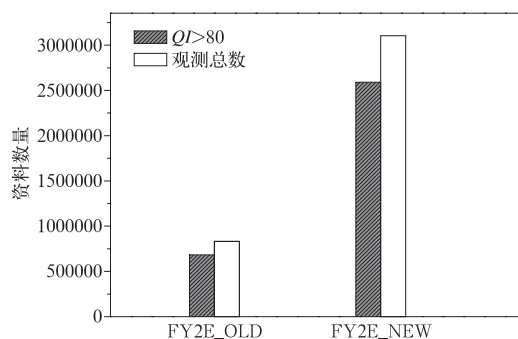


图 1 2013 年 8 月算法改进前(FY2E_OLD)与算法改进后(FY2E_NEW)FY-2E 红外通道云导风总观测数和 $QI > 80$ 的观测数对比

Fig. 1 Number of total and $QI > 80$ for old (FY2E_OLD) and reprocessed (FY2E_NEW) FY-2E IR AMVs during August 2013

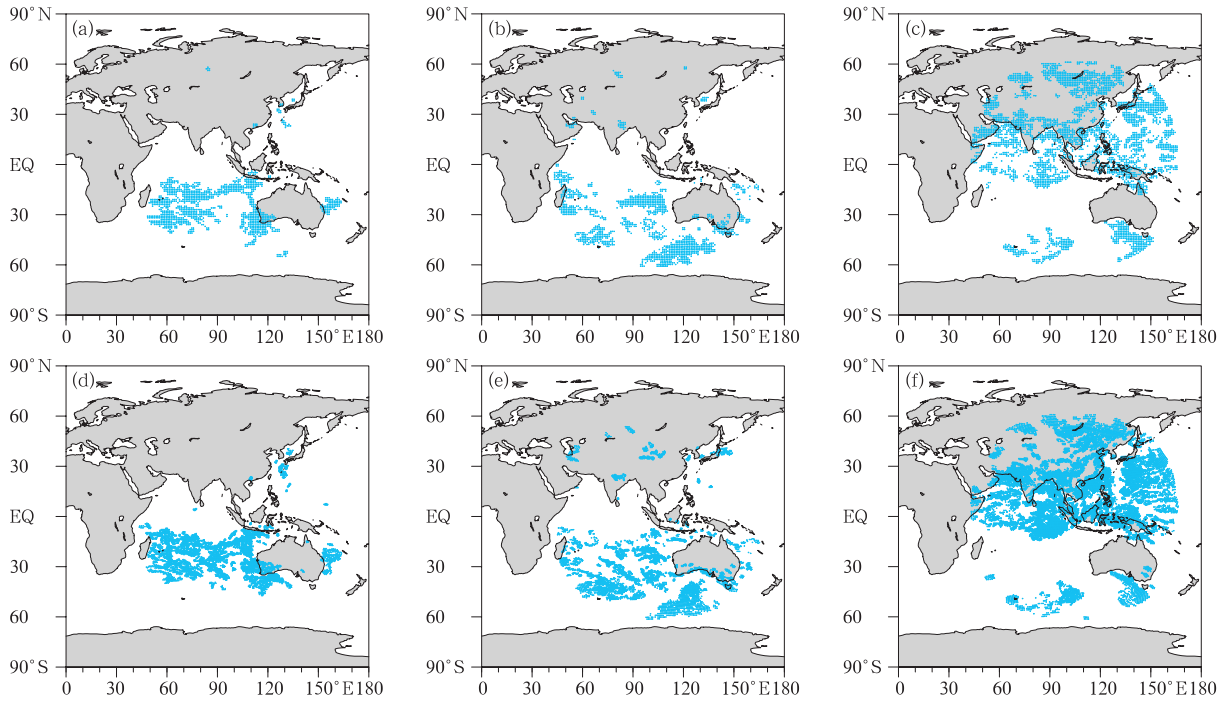


图 2 2013 年 8 月算法改进前(a,b,c)和改进后(d,e,f) $QI > 80$ 的 FY-2E 红外通道云导风在
低层(a,d: 1000~700 hPa)、中层(b,e: 700~400 hPa)和
高层(c,f: 400~100 hPa)的数量分布

Fig. 2 Distribution of FY-2E IR AMVs at different levels between
old FY-2E (a, b, c) and reprocessed (d, e, f) during August 2013
(a, d) 1000—700 hPa, (b, e) 700—400 hPa, (c, f) 400—100 hPa

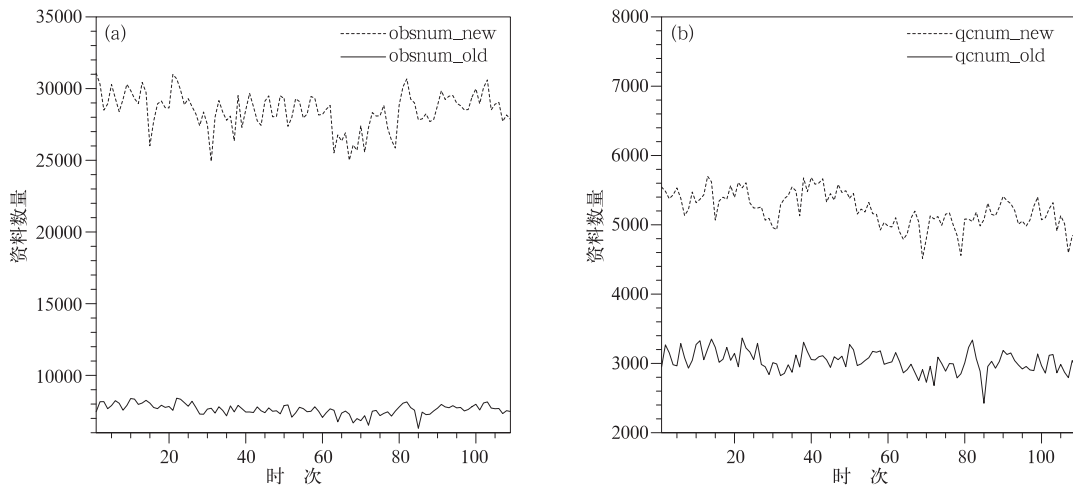


图 3 总观测数(a)和稀疏化后观测数(b)对比
(实线:旧算法,虚线:改进算法)

Fig. 3 Variation tendency of FY-2E IR total number (a) and the number after thinning (b)
(solid line: FYOLD, dotted line: FYNEW)

2.3 改进算法后的 FY-2E 云导风误差分布特征

选取 FNL 资料作为参考场,分别进行偏差、均

方根误差和概率密度分布统计,以此分析算法改进后 FY-2E 红外通道云导风资料的质量和其偏差特征。因质量控制只选取了 $QI > 80$ 的云导风资料,

本文的相关统计仅给出 $QI > 80$ 的统计结果。图 4 为 FY-2E 红外通道云导风在不同高度与 FNL 资料的偏差分布。从图 4 中可以看出 FY-2E 红外通道云导风在高层(图 4c)改进最明显,质量优于旧算

法,但中低层改进效果不显著。从概率密度分布(图 5)也反映出,改进算法后高层云导风的标准差减小,相较于旧算法也更接近正态分布。

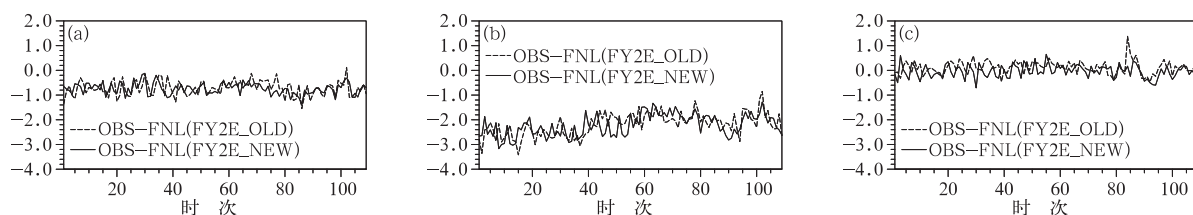


图 4 算法改进前(虚线)和改进后(实线)的 FY-2E 红外通道云导风 U 分量在不同高度的偏差时间演变趋势

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

Fig. 4 Variation tendency of FY-2E IR U wind ($QI > 80$) bias at different levels

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

(old FY-2E: dotted, reprocessed FY-2E: solid)

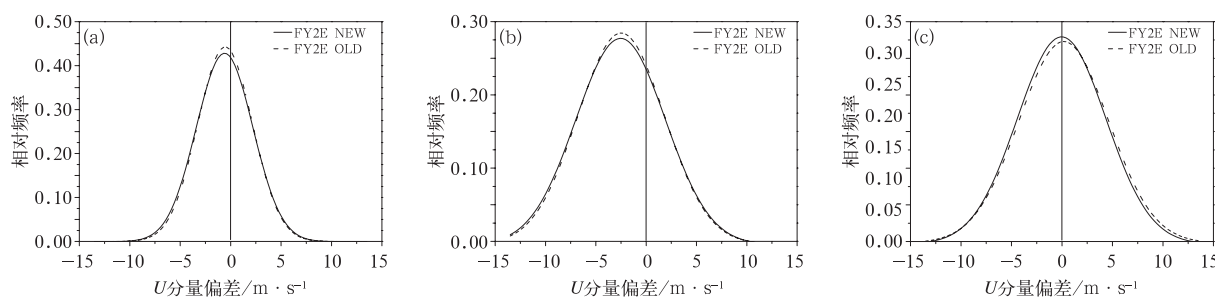


图 5 算法改进前(虚线)和改进后(实线)FY-2E 红外通道云导风 U 分量偏差在不同高度的概率密度分布

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

Fig. 5 Probability density function distribution of FY-2E IR U wind ($QI > 80$) bias at different levels

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

(old FY-2E: dotted, reprocessed FY-2E: solid)

图 6 是 FY-2E 红外通道云导风观测与 GRAPES 模式背景场差值(O-B)的平均偏差在不同高度的水平分布情况(均方根误差分布图略)。就观测数来看,北半球低层和赤道地区中层观测有明显增加,高层整体观测增加。就平均偏差和均方根误差分布来看,算法改进前,高层风速在南北半球出现显著负偏差,出现这种情况多在于高度指定时,很多低层云的云导风被错误指定到了高层,而实际中低层风速要小于高层,造成风速偏低(薛湛彬等,2011)。国家卫星气象中心通过建立二次追踪及对云导风高度指定进行调整后,FY-2E 红外通道云导风的风速在该区域有所增加,南北半球风速负偏差减小,特别是南半球大部分地区云导风 U 分量偏差减小到 $1.5 \text{ m} \cdot$

s^{-1} 以内,对应均方根误差也有所减小,反映出南北半球高层风速质量提高。同时,赤道地区高层在算法改进前存在的风速显著正偏差也明显减小。相较于高层,各区域中低层风场改进不明显,其中南半球在中层风场均方根误差略有增加,这与以 FNL 资料为参考得到的风场平均偏差和均方根误差垂直分布结果一致。

3 同化试验

3.1 试验方案介绍

本文使用 GRAPES 全球模式,该模式采用半隐

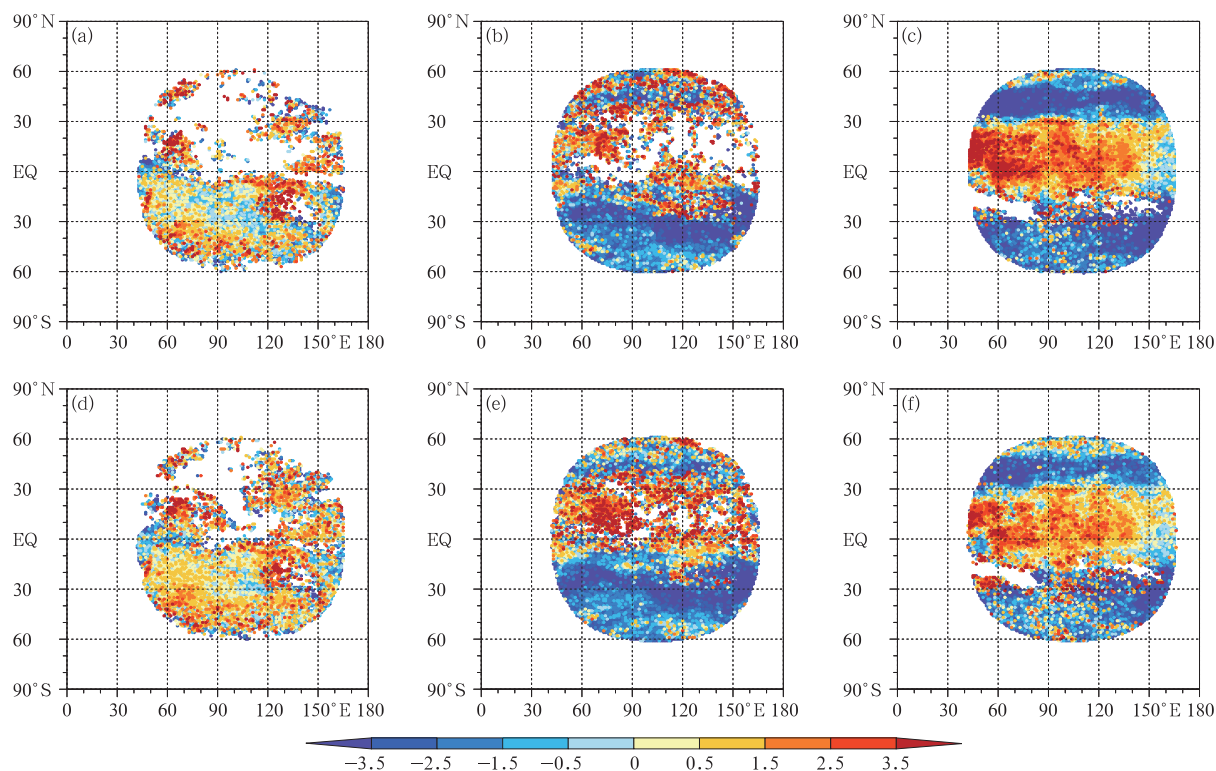


图 6 算法改进前(a,b,c)和改进后(d,e,f)FY-2E 红外通道云导风与 GRAPES 背景场差值的平均偏差(O-B)在低层(a,d: 1000~700 hPa)、中层(b,e: 700~400 hPa)和高层(c,f: 400~100 hPa)的水平分布

Fig. 6 Distribution of observation innovations (observation minus GRAPES) at different levels for control (a, b, c) and the reprocessed FY-2E IR experiment (d, e, f) for August 2013 (a, d) 1000—700 hPa, (b, e) 700—400 hPa, (c, f) 400—100 hPa

式-半拉格朗日差分方案和全可压非静力平衡动力框架,水平方向离散采用 Arakawa-C 跳点格式,垂直方向离散采取 Charney-Phillips 跳层设计的地形高度追随坐标,垂直坐标选取高度地形追随坐标,垂直层次 36 层,标准大气情况下模式层顶大约为 8.7 hPa,模式变量是温度、风和比湿。同化系统是 GRAPES 三维变分同化系统等压面分析,分析的垂直层次为 29 层,水平分辨率为 0.5° 。分析变量是高度、风和相对湿度,同化时间窗是 6 h,同化系统得到的分析场要经过垂直插值和变量转换提供给模式作为初始场(薛纪善,2008;陈德辉等,2008)。

为分析算法改进前后 FY-2E 红外通道云导风资料对 GRAPES 全球模式同化及预报效果的影响,设计了两组试验。两组试验均使用 FNL 资料作为 GRAPES 全球模式初始场,模式积分 6 h 预报作为同化系统第一个时刻的背景场。共进行了 2013 年 8 月一个月的连续试验,每天 12 时做预报,预报时效为 7 d。试验 1:作为控制试验,同化系统所用的

基本观测资料为经过预处理的探空、地面、飞机报、船舶、无线电掩星(GNSS)、NOAA-15 AMSUA, NOAA16 AMSUA, AMSUB, NOAA18 AMSUA, NOAA19 AMSUA, METOP-A AMSUA 和旧算法 FY-2E 红外通道云导风,其他红外和可见光云导风资料。试验 2:作为对比试验,同化改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风资料,其他观测资料与试验 1 相同。

3.2 同化结果分析

将全球划分为 4 个地理区域进行效果检验:赤道外北半球地区($20^\circ \sim 90^\circ \text{N}$),赤道地区($20^\circ \text{S} \sim 20^\circ \text{N}$),赤道外南半球地区($20^\circ \sim 90^\circ \text{S}$),东亚地区($15^\circ \sim 65^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$)。选取 NCEP 的 FNL 资料作为参照场,计算试验 1 和试验 2 同化分析结果与 NCEP 分析的风场偏差和均方根误差等。从图 7 和图 8 可以看出,北半球和东亚地区风场有所改进,东亚地区 U 风的均方根误差在 300~150 hPa 附近

减少了 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 8a 和 8d); 南半球风场平均偏差虽然在 $700 \sim 300 \text{ hPa}$ 有所减少 (图 7b), 但均方根误差在对应高度略增加 (图 8b)。热带地区在

$850 \sim 300 \text{ hPa}$ 、 70 hPa 以上均方根误差有所增加, 改进不明显 (图 7c 和 8c)。

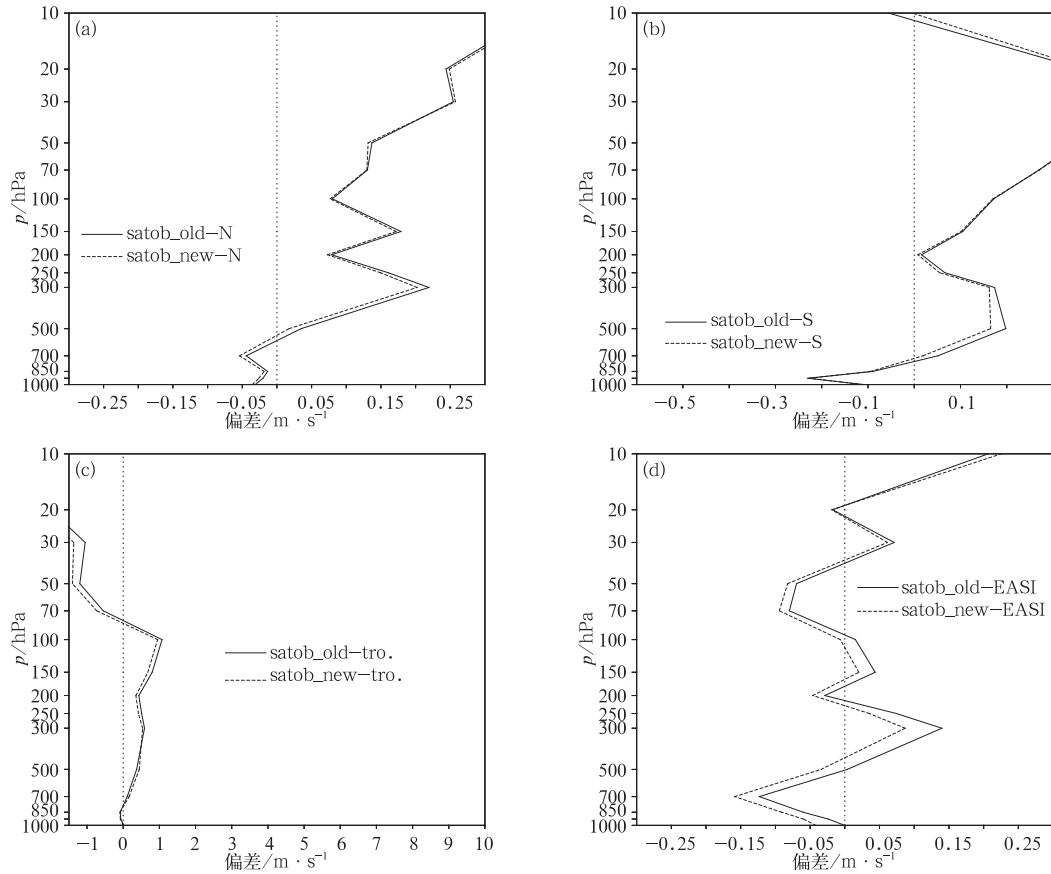


图 7 U 风分量与 FNL 资料的偏差垂直分布

(实线: 旧算法, 虚线: 改进算法)

(a) 北半球, (b) 南半球, (c) 热带, (d) 东亚

Fig. 7 Bias of U winds analysis between GRAPES and NCEP (GRAPES

minus NCEP) for control (solid line) and the reprocessed

FY-2E IR experiment (dotted line) for August 2013

(a) Northern Hemisphere, (b) Southern Hemisphere, (c) Tropics, (d) East Asia

3.3 观测误差分析

Desroziers et al(2005)提出观测误差可根据观测与背景场的差($O-B$)和观测与分析场的差($O-A$)乘积求出。观测误差计算公式如下:

$$(\epsilon^{\text{obs}})^2 = d_A^O \cdot d_B^O \quad (1)$$

$$d_A^O: O-A$$

$$d_B^O: O-B$$

利用式(1)计算得到算法改进前后 FY-2E 红外通道云导风观测误差, 从其垂直分布可以看出 (图 9): 在 850 hPa 以下, 改进后的观测误差略增加

了 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $850 \sim 600 \text{ hPa}$, 新旧算法观测误差相当; 但在 $600 \sim 200 \text{ hPa}$ 的观测误差由旧算法的 $4.3 \sim 3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 降至 $4.1 \sim 3.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 平均减少约 $0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 这也解释了为什么中、低层风场同化效果改进不明显, 而模式高层风场有一定改善。

3.4 模式预报效果分析

对模式预报效果进行了检验, 检验内容包括模式 7 d 预报的 500 hPa 高度场与 FNL 资料的距平相关系数和均方根误差。由 500 hPa 高度场距平相关系数结果可见, 试验 2 的距平相关系数略高于试

验 1, 在预报前 6 d 基本都通过了 0.05 显著性水平检验(图 10a)。从 500 hPa 高度场均方根误差来看, 48 h 后, 试验 2 的 500 hPa 高度场均方根误差均小于试验 1, 且在 48~144 h 通过了 0.05 显著性水平检验(图 10b)。东亚地区的 500 hPa 高度场距平相

关系数的预报检验结果也反映出试验 2 的距平相关系数略高, 500 hPa 均方根误差减小(图 11)。预报检验结果说明, 算法改进后的 FY-2E 红外通道云导风对 GRAPES 全球模式高度场预报有正的贡献。

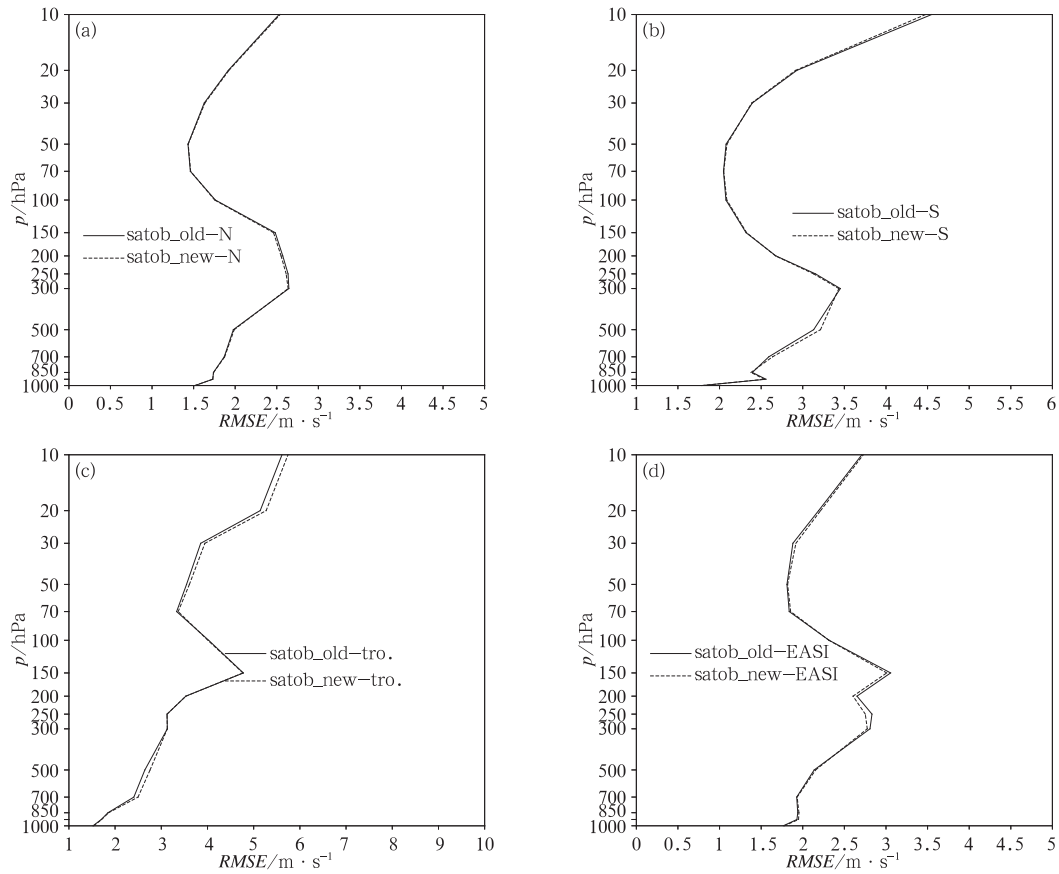


图 8 同图 7, 但为均方根误差

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for RMSE

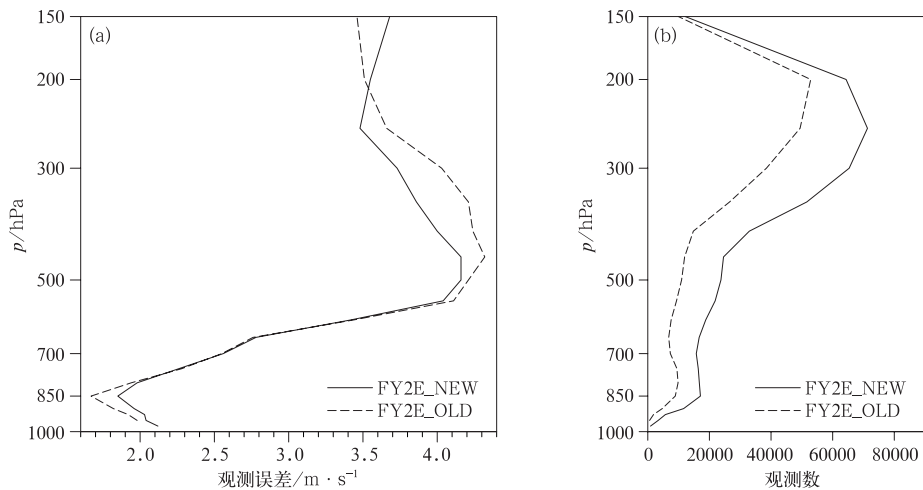


图 9 FY-2E 红外通道云导风观测误差(a)和观测数(b)垂直分布

Fig. 9 Vertical profile of observation error (a) and number (b) of FY-2E IR AMVs

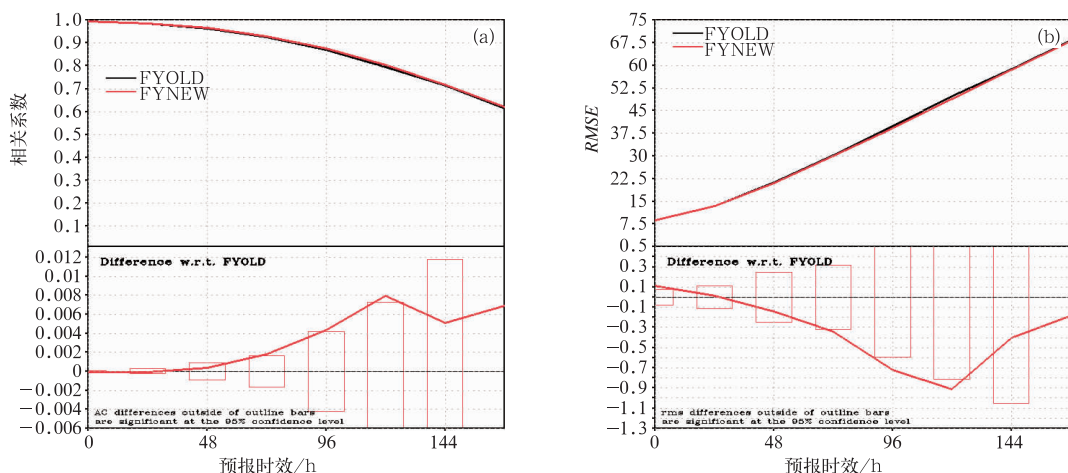


图 10 500 hPa 高度场 7 d 预报的相关系数(a)和均方根误差(b)
(FYOLD 代表试验 1, FYNEW 代表试验 2)

Fig. 10 ACC and RMSE of the 500 hPa height for the 7 d forecast
(Test 1: FYOLD, Test 2: FYNEW)

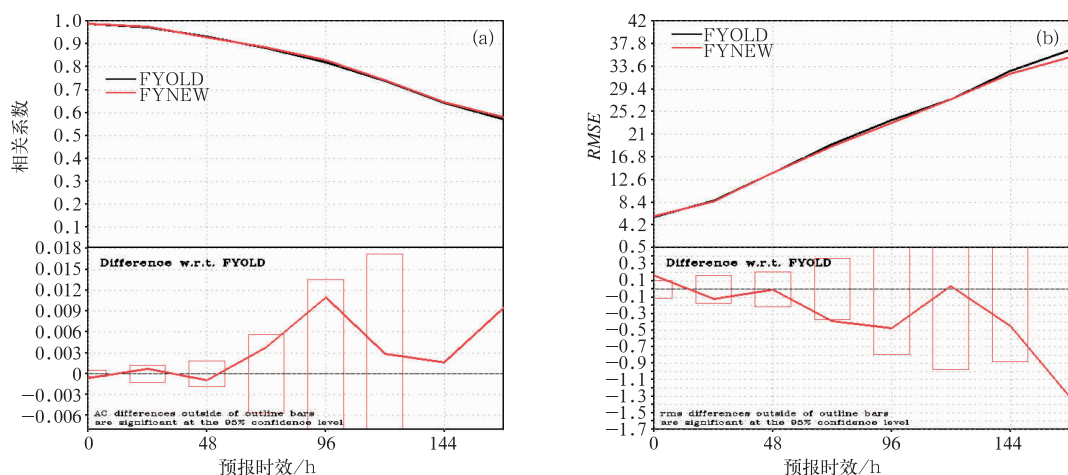


图 11 同图 10, 但为东亚地区

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for East Asia

4 结论与讨论

通过分析算法改进前后的 FY-2E 红外通道云导风资料观测数和分布特征, 并与 FNL 资料进行比较, 评估了改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风资料质量情况; 并利用 GRAPES 全球数值模式, 进行了一个月的连续试验, 分析了改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风对 GRAPES 全球模式风场同化和预报效果的影响。得到主要结论如下:

(1) 改进算法后, FY-2E 红外通道云导风资料的观测数明显增加, 其中 $QI > 80$ 的观测数占整体

观测的 83%, 反映出质量标识对 FY-2E 红外通道云导风的质量有一定的指示意义。从水平分布来看, 海上云导风密度增加。从垂直分布来看, 改进算法后, FY-2E 红外通道云导风资料在中高层观测增幅明显。

(2) 对比 FNL 资料表明, 改进算法后 FY-2E 红外通道云导风在高层质量提高, 也更满足正态分布, 但中低层改进效果不明显。

(3) 连续试验表明, 改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风对 GRAPES 全球数值模式的高层风场同化有改善。北半球和东亚地区风场与 FNL 资料的均方根误差在 300~150 hPa 均有所减少, 南半球

同化的风场和 FNL 资料的平均偏差虽然在 700~300 hPa 有一定减少,但均方根误差在对应高度略增加。

(4) 对比分析 FY-2E 红外通道云导风观测误差的垂直分布发现,改进算法后观测误差在 600~200 hPa 要小于旧算法,很好地解释为什么风场同化在高层有一定改进。

(5) 同化 $QI>80$ 的改进算法后的 FY-2E 红外通道云导风对 GRAPES 全球模式预报有一定正贡献。相较于旧算法,7 d 预报的 500 hPa 高度场的距平相关系数略提高,500 hPa 高度场的均方根误差略减小。

国家卫星气象中心对风云卫星云导风算法做出的一系列改进,使得 FY-2E 红外云导风资料的数量和高层风场质量有所改善,但中、低层风场质量还需要进一步提高。在资料业务应用方面,还需要详细分析算法改进对风云 2 号云导风资料观测误差的影响,更明确其误差特征,完善基于 GRAPES 数值模式的云导风资料质量控制,从而更有效地利用风云 2 号云导风资料,使其在 GRAPES 数值模式业务应用中发挥更大的作用。

致谢:衷心感谢许建民院士对本研究工作的指导。

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.
- 陈德辉,薛纪善,杨学胜,等,2008. GRAPES 新一代全球/区域多尺度统一数值预报模式总体设计研究[J]. 科学通报,53(20):2396-2407.
- 陈华,许健民,张其松,等,1999. 用高度调整法进行云迹风高度的质量控制[J]. 气象科学,19(1):20-25.
- 董超华,1999. 气象卫星业务产品释用手册[M]. 北京:气象出版社.
- 冯业荣,1999. 云迹风资料在热带气旋移向预报中的应用[J]. 气象,25(12):11-16.
- 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.
- 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.
- 马昊,梁旭东,罗义,等,2016. GRAPES_3Dvar 中雷达径向风同化改进观测算子的应用[J]. 气象,42(1):34-43.
- 任素玲,蒋建堂,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.
- 田伟红,万晓敏,2015. 水汽导风在 GRAPES 模式中的同化应用[J]. 气象科技,43(3):469-473.
- 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.
- 文凯,白洁,严卫,等,2007. 云迹风反演中高密度示踪云选取技术的研究[J]. 气象,33(4):35-39.
- 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.
- 许健民,张其松,方翔,1997. 用红外和水汽两个通道的卫星测值指定云迹风的高度[J]. 气象学报,55(4):408-417.
- 许健民,张其松,2006. 卫星导风推导和应用综述[J]. 应用气象学,17(5):574-582.
- 薛湛彬,龚建东,何财福,等,2013. 静止卫星云导风的质量控制及在同化中的应用[J]. 应用气象学报,24(3):356-364.
- 薛湛彬,龚建东,薛纪善,等,2011. FY-2E 卫星云导风定高误差及在同化中的应用[J]. 应用气象学报,22(6):681-690.
- 薛纪善,2008. 数值预报系统 GRAPES 的科学设计与应用[M]. 北京:科学出版社:67-81.
- 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]. 厦门:第 28 届中国气象学会年会.
- 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.
- Baker N, Langland R, Pauley P, et al, 2012. The impact of satellite atmospheric motion vectors in the U. S. Navy global data assimilation system-NWP Results[C]. Extended abstract//11th International Winds Workshop, University of Auckland, New Zealand.
- Desroziers G, Berre L, Chapnik B, et al, 2005. Diagnosis of observation, background and analysis-error statistics in observation space[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 131(613):3385-3396.
- Han Wei, Wan X, Gong J, 2016. Evaluation of FY-2E Reprocessed AMVs in GRAPES[C]. 13th International Winds Workshop, Monterey, California, 27 June-1 July 2016.
- 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 multi-spectral 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.
- Xu J, Holmlund K, Zhang Q, et al, 2002. Comparison of two schemes for derivation of atmospheric motion vectors[J]. J Geophys Res, 107(14):1-15.