

王丹, 阮征, 王改利, 等. 2019. 风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的同化应用研究 [J]. 大气科学, 43(3): 634-654. Wang Dan, Ruan Zheng, Wang Gaili, et al. 2019. A study on assimilation of wind profiling radar data in GRAPES-Meso model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43(3): 634-654. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125

风廓线雷达资料在 GRAPES-Meso 模式中的 同化应用研究

王丹^{1,2} 阮征² 王改利² 朱立娟¹ 田伟红¹ 李丰²

1 中国气象局数值预报中心, 北京 100081

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 以未来业务化应用为目标, 本文进行了业务数值预报模式 GRAPES_Meso (Global/Regional Assimilation and Prediction System) 中的风廓线雷达资料同化应用研究。基于 2015 年 7 月的全国风廓线雷达观测数据, 首先建立了面向同化应用的风廓线雷达资料两步质量控制方案。通过对比分析质量控制前后风廓线雷达观测资料集与欧洲中心再分析资料 ERA-Interim 的差值场特征, 论证了质量控制方案的合理性, 两步质控后风场误差显著减小, 同时观测背景差更接近高斯分布, 符合数值同化应用假设。将质量控制后的风廓线雷达资料应用于 GRAPES-3DVAR 系统, 开展有、无风廓线雷达资料同化的对比试验, 通过批量试验和台风“莲花”个例分析来探讨风廓线雷达资料同化对数值预报的影响。研究表明: 在循环同化过程中加入风廓线雷达资料对数值模式初始场有一定改善, 风场、温度场、湿度场的分析误差均有减小, 从而使短期降水 (0~12 h) 的预报技巧得以提高。针对台风暴雨两个个例分析结果表明, 风廓线雷达资料同化能有效地调整台风降水区的动力结构和水汽分布, 在模式中形成更有利于对流发展的环境条件, 从而更好地预报降水的位置与强度。

关键词 风廓线雷达 质量控制 资料同化 影响试验

文章编号 1006-9895(2019)03-0634-21

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1810.18125

A Study on Assimilation of Wind Profiling Radar Data in GRAPES-Meso Model

WANG Dan^{1,2}, RUAN Zheng², WANG Gaili², ZHU Lijuan¹, TIAN Weihong¹, and LI Feng²

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Aiming at future operational implementation, the research on assimilation of wind profiling radar (WPR) data into the GRAPES_Meso model (Global / Regional Assimilation and Prediction System) is carried out. Based on observational WPR datasets in China during July 2015, a two-step quality control (QC) procedure is developed first. The differences between the ERA-Interim reanalysis data and the WPR observational data before and after QC are calculated, respectively. Results show that the wind field errors are largely reduced after QC, and the distributions of the innovations

收稿日期 2018-02-08; 网络预出版日期 2019-01-22

作者简介 王丹, 女, 1987年生, 工程师, 主要从事观测资料质量控制和同化应用研究。E-mail: wangd@cma.gov.cn

通讯作者 阮征, E-mail: ruanz@cam.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41475029, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201506003, 灾害天气国家重点实验室开放课题 2018LASW-B10

Found by National Natural Science Foundation of China (Grant 41475029), Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant GYHY201506003), Opening Foundation of State key Laboratory of Severe Weather (Grant 2018LASW-B10)

corresponding to observations after QC are closer to a Gaussian distribution. Based on the GRAPES-3DVAR system, the WPR observations after QC were used in one-month continuous experiments as well as a real-case study to illustrate the influence of WPR observations on GRAPES_Meso model. Results show that the assimilation of WPR data can improve the initial condition of the model. Analysis errors of wind, temperature and humidity field are reduced, and the prediction skill for short-term precipitation (0-12 h) is improved. The impact of assimilating WPR data on the analysis and forecast of typhoon “Linfa” is also investigated in this study. Results show that assimilating WPR data can effectively adjust the dynamic structure and water vapor condition over the typhoon precipitation area, producing a more favorable condition for the development of convective system and improving the forecast skill of precipitation.

Keywords Wind profiling radar, Quality control, Data assimilation, Impact experiment

1 引言

高时空分辨率和高质量的初始场资料是数值天气预报取得成功的先决条件（刘瑞等，2012；薛湛彬等，2017）。风是天气形成的直接动力，影响模式的预报性能。然而，在初始场资料中，风的观测相对匮乏。传统的探空观测虽能提供风场信息，但是每天仅提供两次资料，时间分辨率较低。常规地面观测能提供逐小时近地面风场资料，但是缺少对风场垂直结构的完整描述。卫星云导风资料集中在对流层中上层，无法提供低层大气的风场探测信息，而低层大气内风场的辐合、切变与强对流的发展密切相关。我国风廓线雷达技术发展始于20世纪80年代，如今其硬件技术已趋于成熟。截至2017年，完成建设的风廓线雷达已经达到93部。风廓线雷达最大的探测优势是具有高时空分辨率，探测周期不超过6分钟，垂直分辨率为几十米到几百米，可以很好的弥补常规观测时空密度不高的缺陷。

风廓线雷达资料已经在多个国家进入业务化应用。美国国家海洋和大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration，简称NOAA）的风廓线网从1992年开始运行，由35部UHF（Ultra-High Frequency；300~1000 MHz）风廓线雷达组成。在美国快速循环同化系统（Rapid Update Cycle，简称RUC）中的应用试验表明，风廓线雷达资料对于300 hPa以下3~6 h的风场预报具有明显的正效果（Benjamin et al., 2004）。欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasts，简称ECMWF）将美国风廓线雷达探测网的资料应用到其同化系统，提高了欧洲地区风场的短期预报（2~3 d）效果（Bouttier, 2001）。加拿大气象中心利用其同化系

统进行了风廓线雷达的三维变分和四维变分同化试验，并探讨了风廓线雷达资料垂直稀疏化对预报效果的影响，结果表明同化风廓线雷达资料能提高模式前6小时的风场预报（St-James and Laroche, 2005）。日本的风廓线观测网由31部风廓线雷达组成，从2001年以来在日本数值预报模式中进行应用，研究显示对改善 30 mm h^{-1} 以上的降水预报具有积极意义（Ishihara et al., 2006）。

我国风廓线雷达资料早期主要用于天气学分析，在这方面积累了大量的研究成果（王欣等，2005；阮征等，2008；何平等，2010；方平治等，2013）。近年来，随着资料同化系统和高分辨率数值模式的发展，风廓线雷达探测的高时空分辨率风资料开始应用于数值模式。李妙英等（2013）利用WRF（Weather Research and Forecasting）模式同化湖北省咸宁市通山站风廓线雷达，分析单点风场资料对模式初始场和预报场的作用，结果显示风廓线雷达资料同化对模式初始场中风场、湿度场改善明显，从而提高了降水预报的准确度。张胜军等（2004）将“中国登陆台风外场科学试验”中得到的风廓线雷达资料通过牛顿张弛逼近（Nudging）技术进行四维同化分析，结果表明同化风廓线雷达资料一定程度上改善了降水的数值模拟结果。张旭斌等（2015）以及Zhang and Chen（2016）将广东地区13部风廓线雷达资料应用于华南区域预报模式，试验表明加入风廓线雷达资料可以更好地描述模式初始场中低层风场的特征，从而对短期降水预报产生正贡献。以上风廓线雷达资料同化工作多为单点试验和小范围区域站网试验，全国站网的风廓线雷达资料同化工作几乎空白，存在一些亟待解决的问题。一方面，我国目前业务运行的风廓线雷达来自于多个生产厂家，型号多样，各个厂家在处理流程上采用的技术方案不同，造成风廓线雷达资料

质量不一致性很强, 制约其在数值模式中的应用。另一方面, 资料的可信度问题有待探讨。厂家提供的产品级数据简单地将可信度标记为百分百可信和零可信, 处理方式较为笼统, 造成在数值预报应用方面的困难。如何解决上述问题, 从而使得全国风廓线雷达资料同化进入数值模式, 并评估其影响是本文的核心目标。

本文利用2015年7月全国49部风廓线雷达资料, 建立了面向业务同化应用的风廓线雷达资料两步质量控制方案, 并将质量控制后的风廓线雷达资料应用于GRAPES - Meso (Global / Regional Assimilation and Prediction System) 变分同化系统中。通过批量试验和个例分析来探讨风廓线雷达资料同化对数值模式分析和预报的影响, 为将来风廓线雷达资料在GRAPES-Meso中实现业务化应用提供有益参考。

2 观测资料及其预处理

本文选用2015年7月全国风廓线雷达站网的49部雷达探测资料, 包含46部边界层雷达(LC)、2部对流层II型雷达(PB)和1部对流层I型雷达(PA)。我国风廓线雷达探测系统提供三级数据, 分别为谱分布数据(FFT)、谱矩数据(RAD)和产品级数据(OBS)。本文从RAD数据出发进行面

向数值预报同化分析的数据预处理工作。这里采用两步质量控制策略, 其处理流程见图1。QC1是针对风廓线雷达数据本身的质量控制, QC2是面向同化应用的质量控制。二者的具体方法将在2.1节和2.2节中展开详细论述。

2.1 资料前端质量控制(QC1)

为解决风廓线雷达产品多厂家、多类型造成的资料质量不一致性问题, 中国气象局数值预报中心与中国气象科学研究院合作开发了风廓线雷达资料前端处理系统。与厂家产品相比, 其算法流程更为清晰、透明, 符合数值预报的应用需求。该系统从RAD级数据出发, 综合考虑探测波束内风场的不均匀性对雷达数据质量的影响, 建立风廓线产品数据处理算法(高祝宇等, 2016; 刘瑞婷等, 2016)。主要包括以下三步:

(1) 对每个探测波束上的径向速度数据进行数据连续性检查, 剔除噪点数据。

(2) 基于5波束探测到的风廓线雷达径向速度, 由垂直波束和其中两个相邻的倾斜波束的数据合成水平风, 雷达探测一次可以得到探测空间内的4组水平风结果:

$$U_e = \frac{V_{re} - V_{rz} \cos\theta}{\sin\theta}, \quad (1)$$

$$U_w = \frac{V_{rw} - V_{rz} \cos\theta}{\sin\theta}, \quad (2)$$

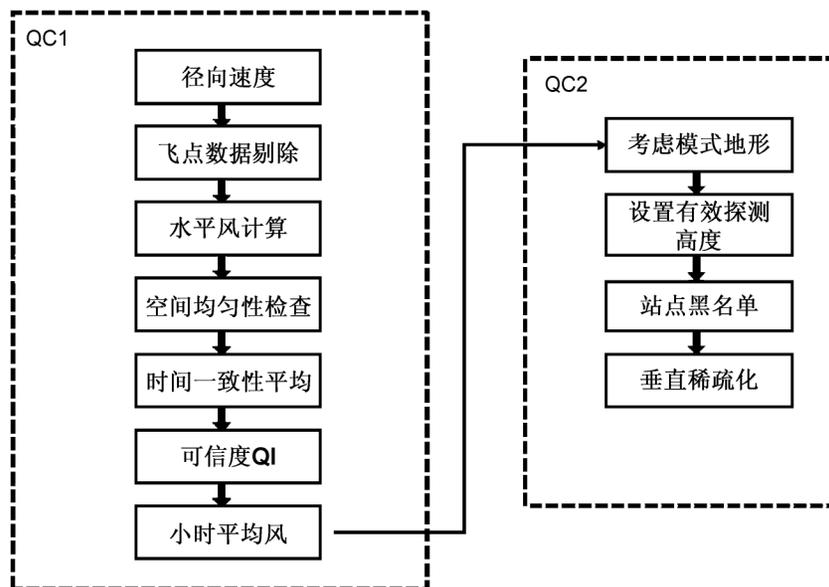


图1 风廓线雷达质量控制流程。QC1: 资料前端质量控制; QC2: 面向同化质量控制

Fig. 1 Quality control flow of wind profilers. QC1 means quality control for data front, QC2 means quality control for assimilation

$$V_n = \frac{V_m - V_{rz} \cos \theta}{\sin \theta}, \quad (3)$$

$$V_s = \frac{V_{rs} - V_{rz} \cos \theta}{\sin \theta}, \quad (4)$$

其中, U_e 、 U_w 表示利用东西波束和垂直径向波束计算出的纬向风 U , V_n 、 V_s 表示利用南北波束和垂直径向波束计算出的经向风 V , θ 为倾斜波束天顶角, V_e 、 V_w 、 V_s 、 V_m 、 V_z 分别表示东、西、南、北和垂直方向的径向速度。对同一距离高度上的4组风进行误差分析:

$$DU = U_e - U_w = (V_{re} + V_{rw}) \csc \theta - 2V_{rz} \cot \theta, \quad (5)$$

$$DV = V_n - V_s = (V_{rn} + V_{rs}) \csc \theta - 2V_{rz} \cot \theta, \quad (6)$$

其中, DU 表示东西波束计算出的 U 风离差, DV 表示南北波束计算出的 V 风离差。剔除某一距离高度上水平风离差较大的层次, 认为不满足空间均匀性条件。

(3) 风廓线雷达瞬时观测风场的脉动性较强, 而数值模式要求风场观测具有一定的时间代表性。若使用瞬时风, 两者在时间尺度上很难匹配。因此, 需要将通过空间均匀性检验的数据进行时间一致性平均:

$$E_{\text{con}} = \frac{1}{S_{\text{max}}} \sum_{j=1}^{S_{\text{max}}} S_j, \quad (7)$$

其中, E_{con} 表示对最大样本数组中所有的径向速度求得的平均值, S_{max} 表示经过一致性检验能够获取的最大样本, S_j 表示第 j 个样本值。NECP、EC-MWF等预报中心在业务中均同化 1 h 分辨率的风廓线雷达水平风, 文中也将时间窗设定为 1 小时。参考卫星云导风在数值模式中的应用经验 (薛湛彬等, 2011), 解算过程中增加水平风可信度标记为 QI , 定义为通过空间均匀性检验的参与小时平均风计算的数据占实际探测总次数的比值, 取值范围为 0~100。可信度 QI 的作用旨在识别出满足水平风场均匀假设条件的“可靠资料”。

对风廓线雷达资料的可信度评估通常基于探空观测。但是由于两者探测原理不同, 为使两者具有可比性, 风廓线雷达与探空的对比工作基本都为同址比较 (Chan and Yeung, 2003)。我国现已完成建设的风廓线雷达和探空采用交错布局, 两者距离相差较远 (图略), 利用探空对全国风廓线雷达资料进行检验存在客观条件限制。ERA-Interim 再分析资料被认为是真实大气的最佳近似 (王金成等, 2014)。因此, 文中选取同时段的 ERA-Interim 再

分析资料, 对 2015 年 7 月全国站网 49 部风廓线雷达数据进行评估。ERA-Interim 再分析资料的水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$, 时间分辨率为 6 h, 垂直层顶为 0.1 hPa。

图 2 是不同可信度标记区间 ($QI > 0$, $QI > 33.3$, $QI > 50$) 的风廓线雷达观测与 ERA-Interim 再分析资料的均方根误差的水平分布。从图 2 可知: 可信度标记 QI 具有很好的指示性, 可信度 QI 值越高, 与 ERA-Interim 再分析资料的均方根误差越小, 资料可靠性越高。当不考虑可信度时 (取 $QI > 0$ 的全部数据; 图 2a), 从 U 来看 49 部雷达中有仅有 6 部雷达的测风均方根误差小于 2 m s^{-1} ; 当考察 $QI > 33.3$ 的数据时 (图 2b), 均方根误差小于 2 m s^{-1} 的站点数量增加为 21 部; 当考察 $QI > 50$ 的数据时 (图 2c), 49 部雷达中 32 部雷达的均方根误差小于 2 m s^{-1} 。将所有雷达的均方根误差进行平均, 当取 $QI > 0$ 的样本时, 风廓线雷达 U 的均方根误差为 2.86 m s^{-1} , V 的均方根误差为 2.81 m s^{-1} ; 取可信度 $QI > 33.3$ 的数据样本时, U 的均方根误差为 2.42 m s^{-1} , V 的均方根误差为 2.52 m s^{-1} ; 取可信度 $QI > 50$ 的数据样本时, 风廓线雷达 U 的均方根误差减小到 2.29 m s^{-1} , V 的均方根误差减小到 2.37 m s^{-1} 。上述误差范围与国内外的研究结论 (Weber and Wuertz, 1990; 吴蕾等, 2014) 一致, 说明前端处理算法是准确可靠的。

2.2 面向同化质量控制 (QC2)

同化是资料和模式背景场协调的过程, 除了开展面向观测资料的质量控制从而识别出“好”数据, 还需要判断“好”数据的观测误差是否服从高斯分布 (仲跻芹等, 2017)。因此, 在同化风廓线雷达观测资料前需要进行面向数值预报同化应用的二次质量控制, 以保证资料满足同化应用假设。质量控制流程具体如下:

(1) 考虑模式中地形高度和实际风廓线雷达测站高度存在一定的高度差异, 考察 49 部风廓线雷达测站高度与 GRAPES-Meso 模式地形的高度差。其中, 有 30 部风廓线雷达站位于模式地形以下, 最大距离差达到 946 m (见图 3)。因此, 需要对每个测站进行判断, 剔除位于地形高度以下的测风。

(2) 风廓线雷达接收到的信号通常随高度的增加而衰减, 影响风廓线雷达的有效探测高度, 导致资料在高层的误差较大。因此, 需对资料进行高度限制, 剔除超过设定高度的资料。统计 2015 年 7 月

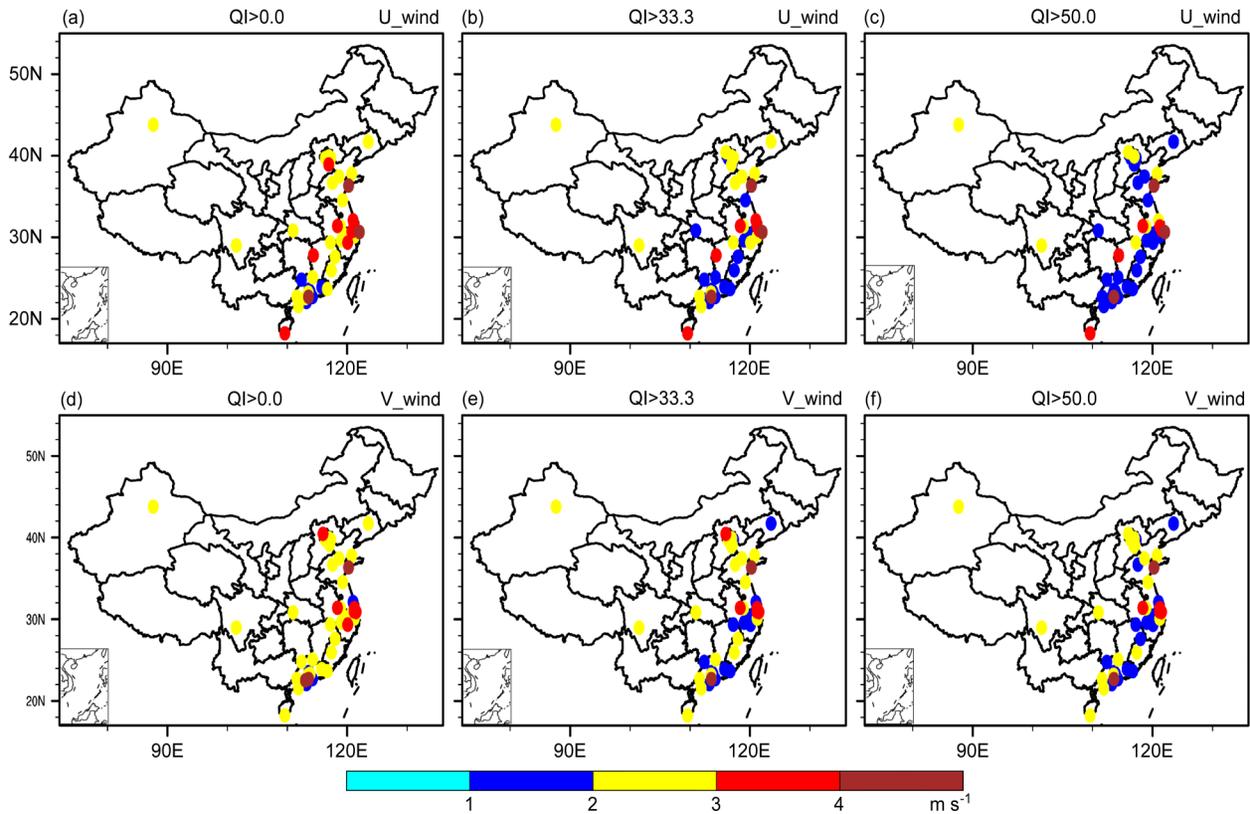


图2 不同可信度QI值的风廓线雷达资料与ERA-Interim再分析资料中(a-c) 纬向风 U 、(d-f) 经向风 V 的均方根误差(单位: m s^{-1})分布
Fig. 2 Distributions of RMSE (Root Mean Square Error; units: m s^{-1}) between wind profilers data and ERA-Interim Reanalysis field at different QI values: (a-c) zonal wind U , (d-f) meridional wind V

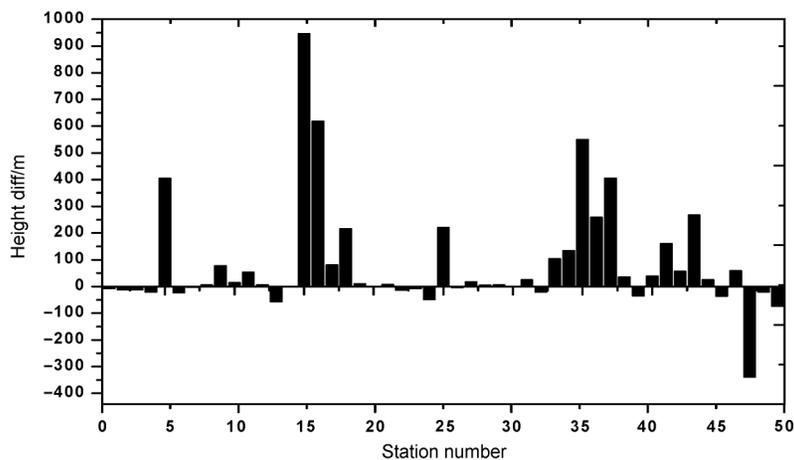


图3 风廓线雷达测站高度与GRAPES-Meso模式地形高度差(单位: m)

Fig. 3 Differences between elevations of wind profilers and GRAPES_Meso model terrain height (units: m)

风廓线雷达水平风与ERA-Interim再分析资料的均方根误差的垂直变化,并结合已有研究经验(吴蕾等, 2013; 朱立娟, 2015),本文将LC型号雷达有效探测高度设定为4 km, PB型号雷达有效探测高度设定为8 km, PA型号雷达有效探测高度设定为10 km。

(3) 在对比2015年7月风廓线雷达资料与ERA-Interim再分析资料时,发现49部雷达中有4部雷达的均方根误差相对于其它雷达始终较大(表1),将这四个站点列入黑名单,不放入同化系统。

(4) 风廓线雷达资料在各个高度上的风是基于同样的观测设备和计算方法获得,导致其误差的垂

表 1 2015 年 7 月风廓线资料站点黑名单 (取 $QI > 50$ 的资料)

Table 1 Blacklist of stations for wind profilers for July 2015 ($QI > 50$)

站号	经度	纬度	高度/m	均方根误差	
				$U/m s^{-1}$	$V/m s^{-1}$
G3239	113.55°	22.7°	7.0	5.5561	7.7671
54857	120.233°	36.33°	12.0	5.4981	5.0258
58369	122.04°	30.64°	49.0	5.1996	4.6411
58462	121.16°	30.93°	0.0	4.0123	3.1201

直相关性较高 (St-James and Laroche, 2005), 在同化过程中需要垂直稀疏化。此处垂直稀疏化的方式选取和模式垂直方向最接近的层次进入模式。经过这样处理之后, 进入同化系统的风廓线雷达资料的垂直分辨率基本和模式的垂直分辨率一致。

2.3 质量控制效果分析

为综合分析上述两步质量控制方法的效果, 选用 ERA-Interim 作为背景场, 建立观测背景差。图 4 是 2015 年 7 月的风廓线雷达资料与背景场的散点分布图。图 4 中 qc0 表示不经过任何质量控制; qc1 表示经过第一步质量控制, 取可信度 $QI > 50$ 的测风资料; qc2 表示经过两步质量控制, 即在 qc1 的基础上再进行面向同化的质量控制。从图中可以看出: 未经质量控制 (图 4a、d) 的资料分布较为散乱, 有明显的离群资料; 经过第一步质量控制后 (图 4b、e), 很多离群资料被剔除, 但在零风速附近依然存在不少偏差较大点; 经过两步质量控制后 (图 4c、f), 这些异常点被剔除, 资料更集中于对角线分布, 整体质量显著提高。进一步计算观测背景差样本的标准差和均值可知, 未做任何质量控制

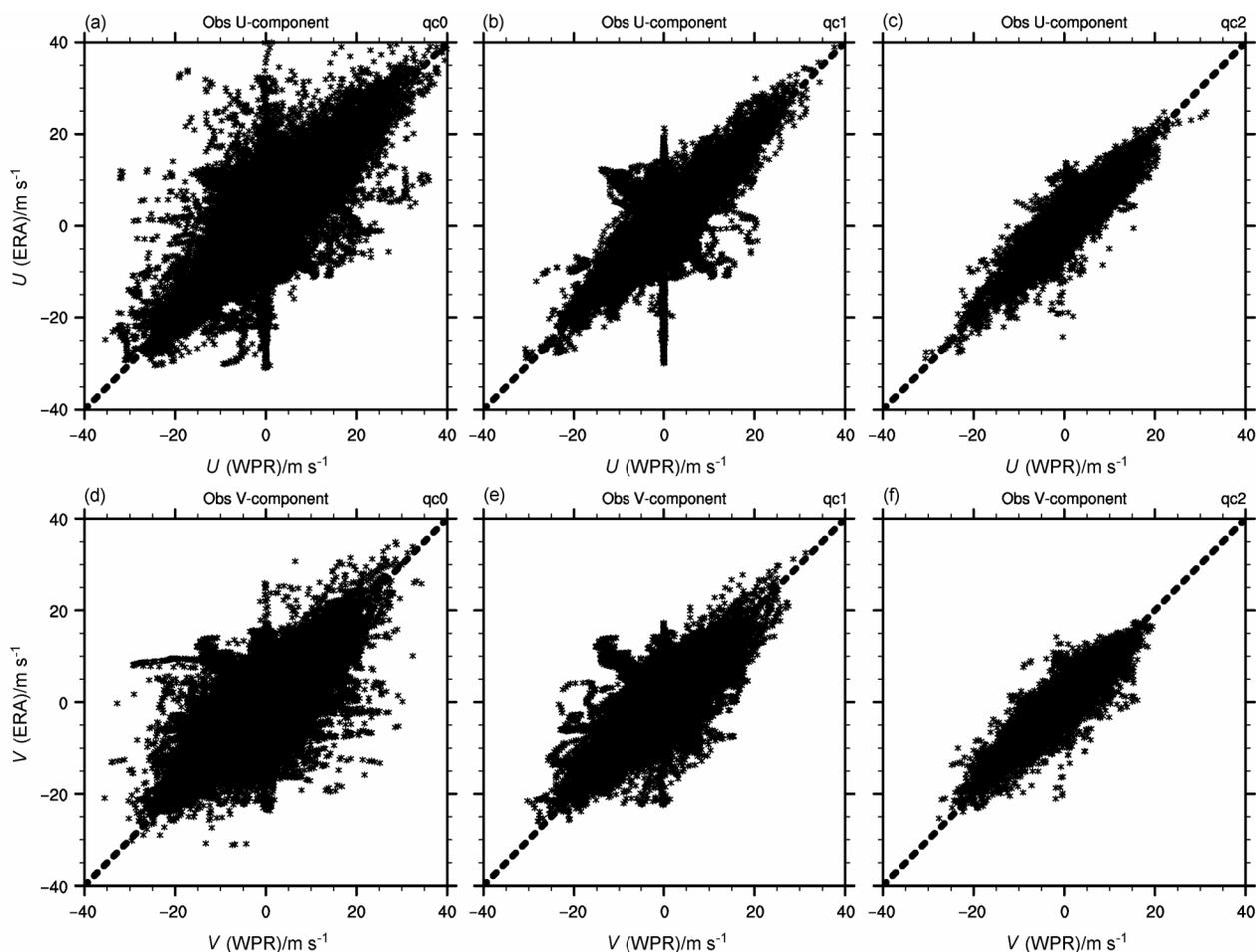


图 4 风廓线雷达资料 (WPR) 相对于 ERA-Interim 再分析场中 (a-c) U 、(d-f) V 的散点分布: (a、d) 不经过任何质量控制 (qc0); (b、e) 经过第一步质量控制 (qc1); (c、f) 经过两步质量控制 (qc2)

Fig. 4 Scatter distributions of wind profilers data (WPR) against ERA-Interim Reanalysis fields: (a-c) U (d-f) V , (a, d) represent no QC control conduct (qc0), (b, e) represent first step QC conduct (qc1), (c, f) represent second step QC conduct (qc2)

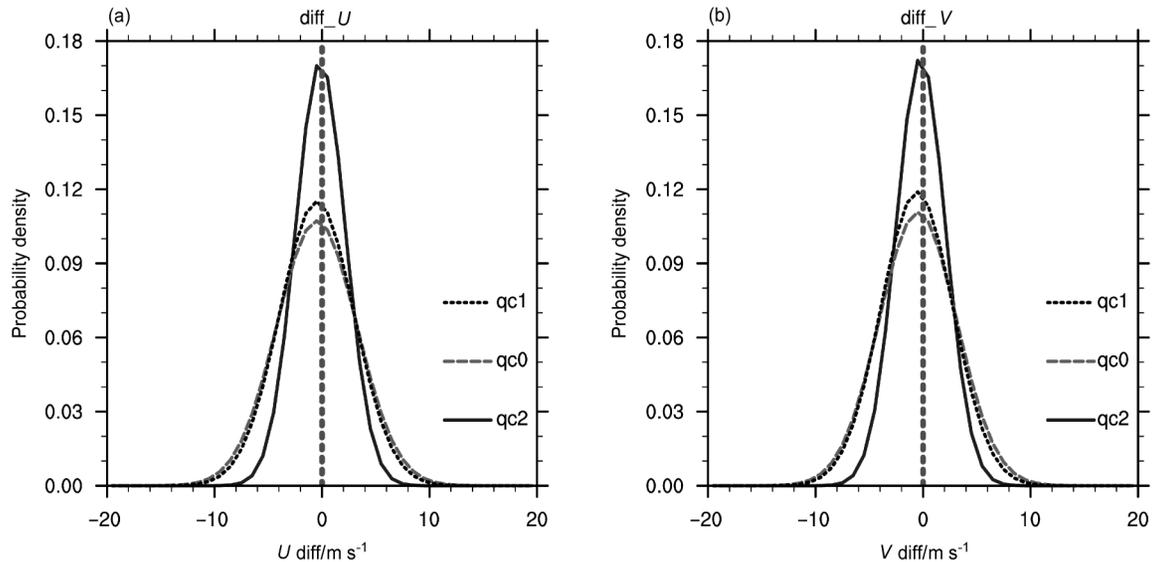


图5 风廓线雷达资料与ERA-Interim再分析资料中 (a) U 、(b) V 差值的概率密度分布

Fig. 5 Probability density distributions (PDF) of differences of (a) U and (b) V between the wind profilers data and ERA-Interim Reanalysis files

前, U 和 V 的标准差分别为 3.72 m s^{-1} 和 3.6 m s^{-1} , 均值分别为 -0.48 m s^{-1} 和 -0.47 m s^{-1} ; 经过第一步质量控制后, U 和 V 的标准差减少为 3.46 m s^{-1} 和 3.35 m s^{-1} , 均值分别为 -0.479 m s^{-1} 和 -0.57 m s^{-1} ; 两步质量控制后, U 和 V 的标准差减小为 2.31 m s^{-1} 和 2.23 m s^{-1} , 均值减小为 -0.15 m s^{-1} 和 -0.21 m s^{-1} , 与背景场更为接近, 说明了上述质量控制方法的有效性。

查看质量控制前后风廓线雷达资料和ERA-Interim风场差值的概率分布图(图5)可以发现: 质量控制前(qc0), 无论是 U 还是 V , 背景差样本的分布跨度很宽; 第一步质量控制后(qc1), 样本分布跨度变化不大, 差值在0附近的资料数量增多; 第二步质量控制后(qc2), 样本分布跨度明显减小, 风场差值大于 10 m s^{-1} 的资料被剔除, 分布形态与正态分布更加相近, 能够满足三维变分同化无偏假设。

3 同化试验

3.1 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-Meso数值预报系统。该模式采用全可压静力平衡或非静力平衡模式可选方案, 半隐式-半拉格朗日动力框架。水平方向采用Arakawa-C跳点网格设计, 垂直方向采用地形高度坐标。模式的水平分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, 垂直方向为50层。模拟区

域为($15^\circ \sim 65^\circ \text{N}$, $70^\circ \sim 145^\circ \text{E}$), 覆盖整个中国地区。系统每日00:00(协调世界时, 下同)做冷启动, 背景场由NECP GFS的6 h预报场提供。此后, 每隔6 h进行一次三维变分同化热启动循环更新, 分析采用的背景场为上一次循环中的6 h预报场。采用的同化分析系统为GRAPES-3DVAR三维变分同化系统(陈德辉等, 2008; 薛纪善等, 2008; 郝民等, 2013)。为检验风廓线雷达资料对GRAPES-Meso同化分析及预报效果的影响, 设计两组试验, 预报时段为2015年7月1~30日, 每6 h进行循环同化, 做24 h预报。CTL: 控制试验, 同化的观测资料为经过预处理的探空、地面、航空飞机报文、船舶、云导风和GPS/PW观测; WPRD: 敏感性试验, 同化的观测资料在控制试验的基础上加上风廓线雷达资料, 风廓线雷达资料经过2.1节和2.2节两步质量控制。根据2015年7月风廓线测风与ERA-Interim再分析资料的误差统计, 取两者误差的标准差 2.3 m s^{-1} 作为风廓线雷达资料的观测误差应用到同化试验中。

3.2 更新向量和分析观测差

对进入资料同化系统的数据质量进行监控和分析是同化应用的一个重要环节(陈敏等, 2014)。图6给出了2015年7月风廓线雷达风场资料在同化系统中更新向量(observation minus background, 简称O-B)和分析观测差(observation minus analysis, 简称O-A)的逐日分布情况。从图可知:

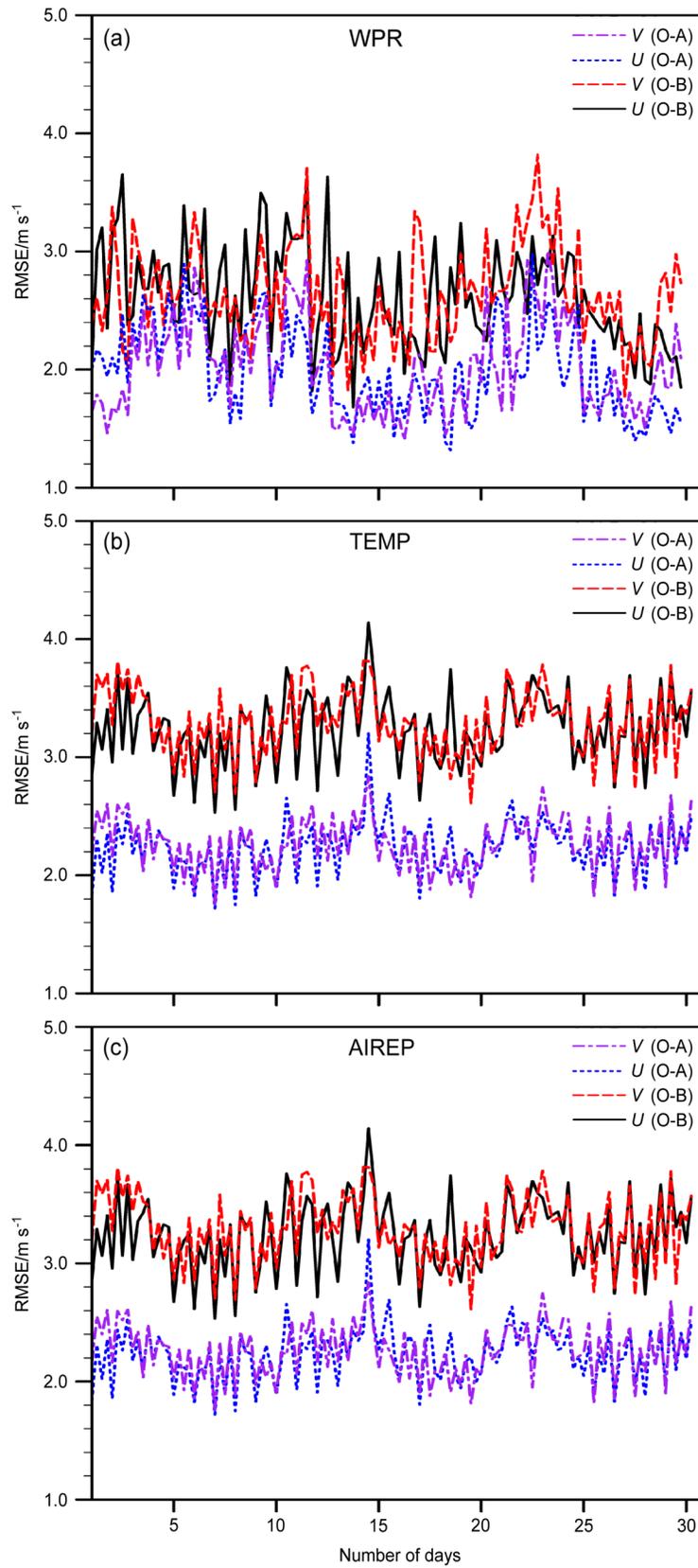


图6 (a) 风廓线雷达、(b) 探空观测以及 (c) 航空飞机报文观测资料在同化系统中的O-B、O-A均方根误差的时间序列

Fig. 6 Time series of RMSEs of O-B (observation minus background) and O-A (observation minus analysis) in GRAPES_3DVAR: (a) Wind profilers, (b) radiosonde, and (c) automated aircraft data

风廓线雷达资料 O-B 的均方根误差在 $2.5\sim 3.5\text{ m s}^{-1}$ 之间, O-A 的均方根误差范围为 $1.5\sim 2.5\text{ m s}^{-1}$ 。与模式中其余两类风场观测(探空、航空飞机报文)相比,这三类资料误差范围接近,这从侧面证明同化系统中使用的风廓线雷达资料准确度很高,与探空、飞机报精度相当。

3.3 批量试验结果分析

为检验风廓线雷达资料同化对数值模式初始场及预报场的影响,将上述两组试验结果分别与探空观测进行比较,计算风场、温度场、湿度场的标准差和偏差。所用的探空资料为同时段全国 123 部探空数据,探空数据经过极值检查、内部一致性检查、温度递减率检查、风切变检查等预处理(陶士伟等, 2006)。从图 7 可知:风廓线雷达资料同化对于模式初始场中各个变量均有调整。 U 在 $1000\sim 500\text{ hPa}$ 层次标准差有所减小,整层平均标准差从 2.43 m s^{-1} 减小到 2.39 m s^{-1} (图 7a); $700\sim 400\text{ hPa}$ 层次偏差更接近 0,其中 600 hPa 处减小幅度最大,偏差从 0.11 m s^{-1} 减小到 0.03 m s^{-1} (图 7b)。 V 在 $300\sim 200\text{ hPa}$ 整层平均标准差从 3.19 m s^{-1} 减小到 3.14 m s^{-1} (图 7c),偏差在 $700\sim 500\text{ hPa}$ 层次更接近于 0 (图 7d)。同化风廓线雷达资料对于模式湿度场分析亦有改善,湿度场的标准差在近地层从 12.4% 减小为 12% (图 7g),偏差在 $925\sim 150\text{ hPa}$ 层次更接近于 0 (图 7h)。就温度场而言,同化风廓线雷达使得近地层温度场的标准差从 1.66 K 减小到 1.60 K (图 7e)。

将模式垂直方向上划分为三层:低层为 $1000\sim 700\text{ hPa}$,中层为 $700\sim 400\text{ hPa}$,高层为 $400\sim 10\text{ hPa}$ 。计算同化风廓线雷达资料前后模式 12 h、24 h 预报结果与探空观测的风速、温度、湿度的标准差(表 2)。从表 2 中可以看出:同化风廓线雷达资料对于

风场和温度场的 12 h 预报无论在模式低层、中层还是高层都略有改善。其中,风场的标准差平均减小 0.03 m s^{-1} ,温度场的标准差平均减小 0.01 K ,湿度场仅在高层有改善,标准差减小了 0.01% 。查看 24 h 预报结果可知, U 整层预报仍然表现为 WPRD 优于 CTL, V 在模式低层和高层预报结果变差,温度场 T 在模式中层预报结果变差,湿度场 RH 延续 12 h 预报场特征,在低层和中层结果变差。综合上述分析可知,同化风廓线雷达资料对整层大气中风速、温度和湿度的预报效果有所改善,主要体现在前 12 h。

降水评分是衡量区域模式预报效果的重要指标。本文采用 ETS (Equitable Threat Score) 评分和 Bias 评分方法(王洪等, 2015)对风廓线雷达资料同化前后模式的降水预报效果进行检验。检验所采用的观测降水资料为逐小时卫星一台站融合降水格点资料。该套资料融合了全国经质控后的 3 万多个雨量计站点资料和卫星反演降水,充分发挥地面观测和卫星反演降水的各自优势,具有较高的质量和可靠性,并被广泛使用(Shen et al., 2010; 姜晓曼等, 2014; Zhang et al., 2016)。它的空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$,与 GRAPES-Meso 模式相一致,本研究将其作为降水观测。

查看逐 6 h 累积降水预报结果(图 8),其中小雨、中雨、大雨、暴雨、大暴雨对应的降水阈值分别为 0.1 mm 、 4.0 mm 、 13.0 mm 、 25.0 mm 和 60.0 mm 。从预报结果来看:同化风廓线雷达资料对于降水预报的影响在模式积分前 12 h 内比较明显,尤其是模式积分最初 6 h 内,降水的 ETS 评分表现为在中雨、大雨、暴雨、大暴雨量级上均有所提高(图 8a)。中雨量级 ETS 评分提高了 2%,大雨量级 ETS 评分提高了 4%,暴雨量级 ETS 评分提

表 2 同化前后模式预报场中风速、温度、湿度相对于探空的标准差

Table 2 Standard deviations of wind, temperature, relative humidity forecasts before and after assimilation compared to radiosonde data at 12 h, 24 h forecast lead time

预报时刻	垂直气压层	$U/\text{m s}^{-1}$		$V/\text{m s}^{-1}$		T/K		RH	
		CTL	WPRD	CTL	WPRD	CTL	WPRD	CTL	WPRD
12 h	1000~700 hPa	3.25	3.23	3.16	3.14	1.76	1.75	15.45%	15.58%
	700~400 hPa	3.38	3.34	3.45	3.43	1.28	1.28	24.76%	24.97%
	400~10 hPa	4.04	4.02	4.20	4.17	1.39	1.38	21.89%	21.88%
24 h	1000~700 hPa	3.70	3.64	3.54	3.55	1.91	1.90	16.14%	16.29%
	700~400 hPa	4.02	3.93	3.97	3.94	1.39	1.41	26.99%	27.47%
	400~10 hPa	4.65	4.60	4.84	4.85	1.54	1.53	22.98%	22.83%

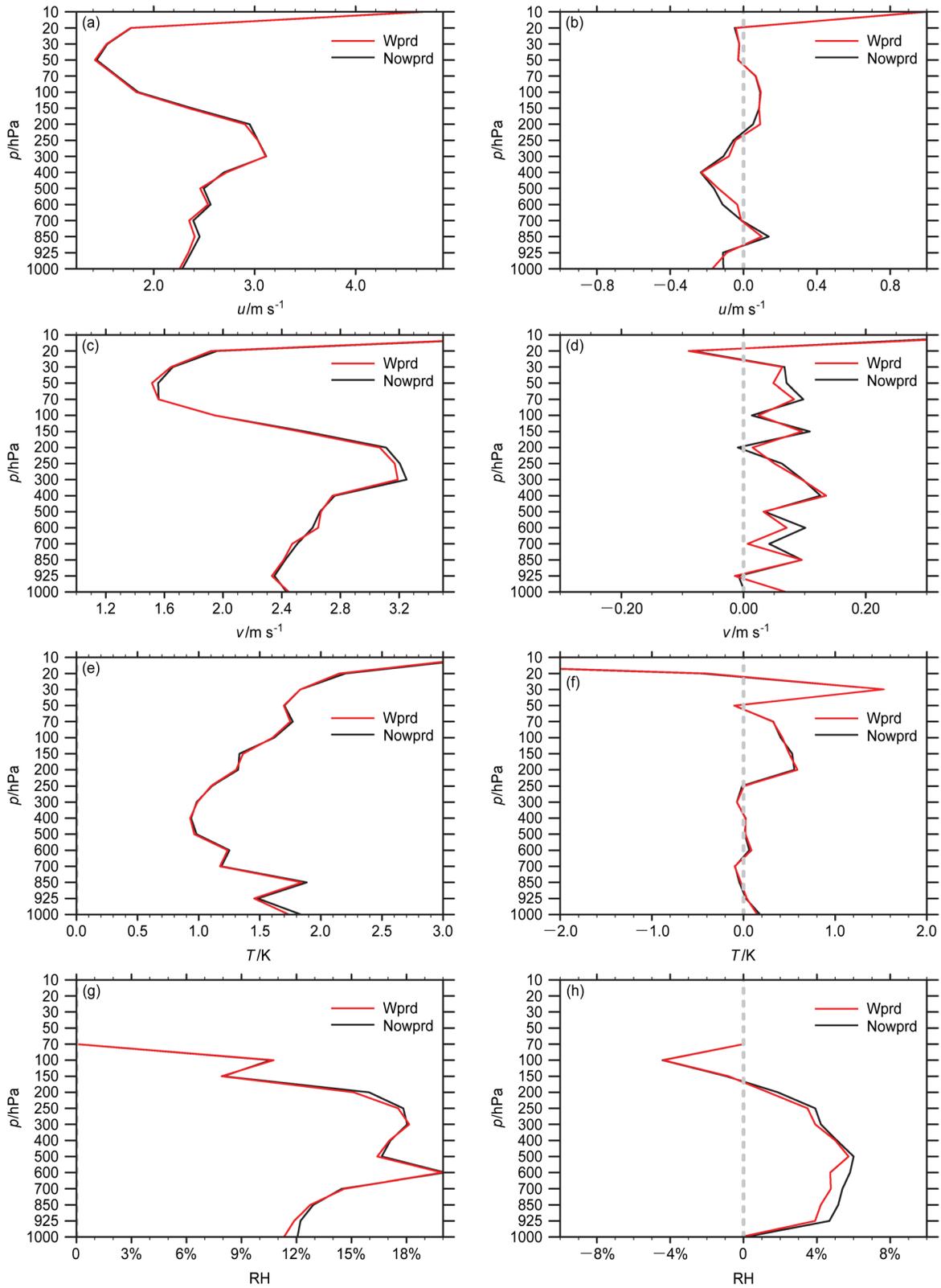


图7 同化前后模式初始场中 (a、b) U 、(c、d) V 、(e、f) 温度和 (g、h) 湿度相对于探空的标准差 (STD, 左列) 和偏差 (Bias, 右列) 的垂直分布。wprd 表示敏感性试验, nowprd 表示控制试验

Fig. 7 Vertical distributions of STD (standard deviation; left column) and Bias (right column) of analyzed (a, b) U , (c, d) V , (e, f) temperature, and (g, h) relative humidity (RH) against radiosonde data. The label “wprd” means sensitive experiment, “nowprd” means control experiment

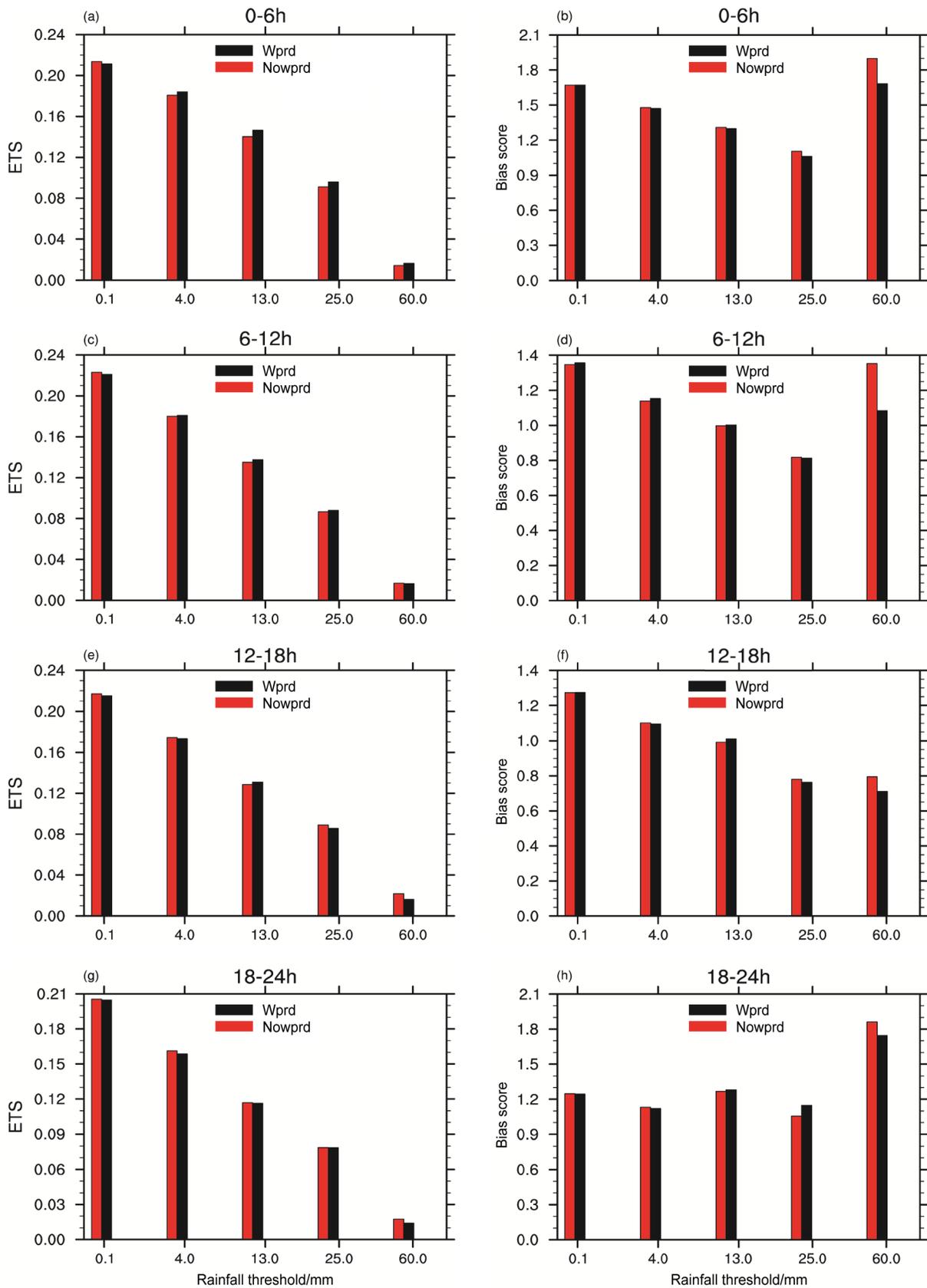


图8 同化前后模式逐6 h累积降水ETS评分和BIAS评分: (a、b) 0~6 h; (c、d) 6~12 h; (e、f) 12~18 h; (g、h) 18~24 h

Fig. 8 ETS (Equitable Threat Score) and Bias scores of 6-h accumulated precipitation forecast before and after assimilation: (a, b) 0-6 h, (c, d) 6-12 h, (e, f) 12-18 h, and (g, h) 18-24 h

高了 5%，大暴雨量级 ETS 评分提高了 14%。6~12 h 的降水 ETS 评分表现为大雨、暴雨量级上存在改善，改善幅度略低于前 6 h (图 8c)。从降水 Bias 评分来看，0~6 h 两组试验的 Bias 评分在各个降水量级均大于 1，表明两组试验都存在降水雨区预报偏大的特点。加入风廓线雷达资料后，降水雨区偏大的现象有所修正，特别是在大暴雨降水量级，Bias 评分更接近于 1 (图 8b)。6~12 h 的 Bias 评分也表明风廓线雷达资料同化能减缓大暴雨量级的降水虚报 (图 8d)。整体而言，12 h 以后风廓线雷达资料对模式预报性能的影响减弱，说明风廓线雷达资料还是对短时临近预报更有价值。

3.4 典型个例预报性能分析

2015 年第 10 号台风“莲花”于 7 月 2 日 12:00 在西太平洋洋面上生成，8 日 12:00 加强为台风级别 (中心风力最强达到了 35 m s^{-1})。随后移动加快，于 9 日 04:15 在汕尾市陆丰县沿海地区登陆，登陆后转为偏西方向移动，强度迅速减弱。9 日 09:00 减弱为热带风暴进入惠州市境内。9 日 14:00 在深圳市宝安区减弱为热带低压。受其环流影响，粤东沿海市县出现 9~12 级大风、阵风 14~15 级，过程降雨量达到暴雨、大暴雨量级，局部发生特大暴雨 (曾丹丹等, 2017)。

图 9 给出了典型时刻实况和数值模拟的逐 6 小时累积降水演变情况，模式起报时间为 2015 年 7 月 8 日 18:00。在实况观测中，7 月 8 日 18:00 至 9 日 00:00 (图 9a-c)，台风“莲花”在粤闽交界沿海附近产生了大范围的强降水。控制试验 (以下称 CTL 试验) 模拟的降水范围和强度较实况均偏弱，而敏感性试验 (以下称 WPRD 试验) 模拟的台风结构更为紧密，降水强度更强。9 日 00:00~06:00 (图 9d-f)，台风“莲花”在汕尾登陆，带来了强降水。CTL 试验模拟的 25 mm 量级以上降水云团整体位置相对实况偏南偏东，WPRD 试验与实况更为接近，但大于 60 mm 量级以上降水范围较实况偏弱。9 日 06:00~12:00 (图 9g-i)，台风“莲花”继续往西北偏西方向移动进入惠州。CTL 试验预报的暴雨云团位置整体依旧偏南偏东，其中大于 60 mm 量级的大暴雨云团位于海上，与实况相差甚远，WPRD 试验的大暴雨中心预报强度和位置则与实况更为接近，但是大暴雨量级的降水预报范围较实况依然偏小。9 日 12:00~18:00 (图 9j-l)，台风“莲花”进入深圳。CTL 试验预报的降水云团

依旧偏南偏东，WPRD 更接近实况。

将 6 h 累积降水量的模式预报值与实况观测进行定量对比，计算 ETS 评分和 Bias 评分 (图 10)。从图可知：整体而言，WPRD 试验的 ETS 评分优于 CTL 试验，表明其对于降水落区的预报更为准确。但在 60 mm 以上大暴雨级别的降水中，ETS 评分在 6~12 h 差于 CTL 试验 (图 10i)，分析其原因主要是由于 WPRD 试验对于 60 mm 以上降水预报偏弱造成的。Bias 评分在小雨 (图 10b)、中雨 (图 10d) 量级 WPRD 试验更接近于 1，表明其降水预报范围较 CTL 更接近于实况。但在 60 mm 以上量级 (图 10j)，WPRD 试验 BIAS 值始终小于 1，表明其大暴雨量级降水预报不足，这和上述定性分析的结论相一致。

WPRD 试验降水预报结果为何优于 CTL 试验？为了探究原因，对两组试验预报的天气形势场和物理量进行诊断。首先考察大尺度环流形式预报 (图 11)，从 ERA-Interim 再分析资料的 500 hPa 高度场演变可知，初始时刻台风所造成的闭合低压位于南海洋面 (图 11a)；9 日 00:00 闭合低压靠近粤东沿海开始影响广东 (图 11d)；9 日 06:00 闭合低压位于汕尾上空 (图 11g)，随后往西北偏西方向移动依次进入惠州、深圳。WPRD 和 CTL 试验预报的闭合低压的移动方向与实况基本一致。不同的是，CTL 试验相对于实况明显滞后。例如 9 日 06:00 (图 11h)、12:00 (图 11k) 以及 18:00 (图 11n)，CTL 试验预报的闭合低压中心依然位于海上，而实况中台风低压中心已在广东境内，相比之下，WPRD 试验预报与实况更接近。

图 12 为两组试验 850 hPa 风场和涡度场的水平分布。从涡度随时间的演变可知：CTL 模拟的涡度中心与 WPRD 相比一直偏南偏东，这与上述高度场预报分析结果一致。对比两组试验 850 hPa 风场和涡度场的差值可以看出，在模式初始时刻 (图 12c)，同化风廓线雷达资料使得台风附近偏南气流加强，有利于台风向北方向移动靠近粤东沿海，同时在台风移动方向的西北侧激发了中心强度为 $49.12 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正涡度增量。模式积分 6 h 后 (图 12f)，台风中心西北侧的气旋性风场增量更加明显，正涡度进一步加强，最大增量为 $94.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。模式积分 12 h 后 (图 12i)，正涡度增量移至汕尾上空，汕尾地区具有比 CTL 强的气旋性环流。模式积分 18 h (图 12l) 和 24 h (图 12o) 后，惠州、深

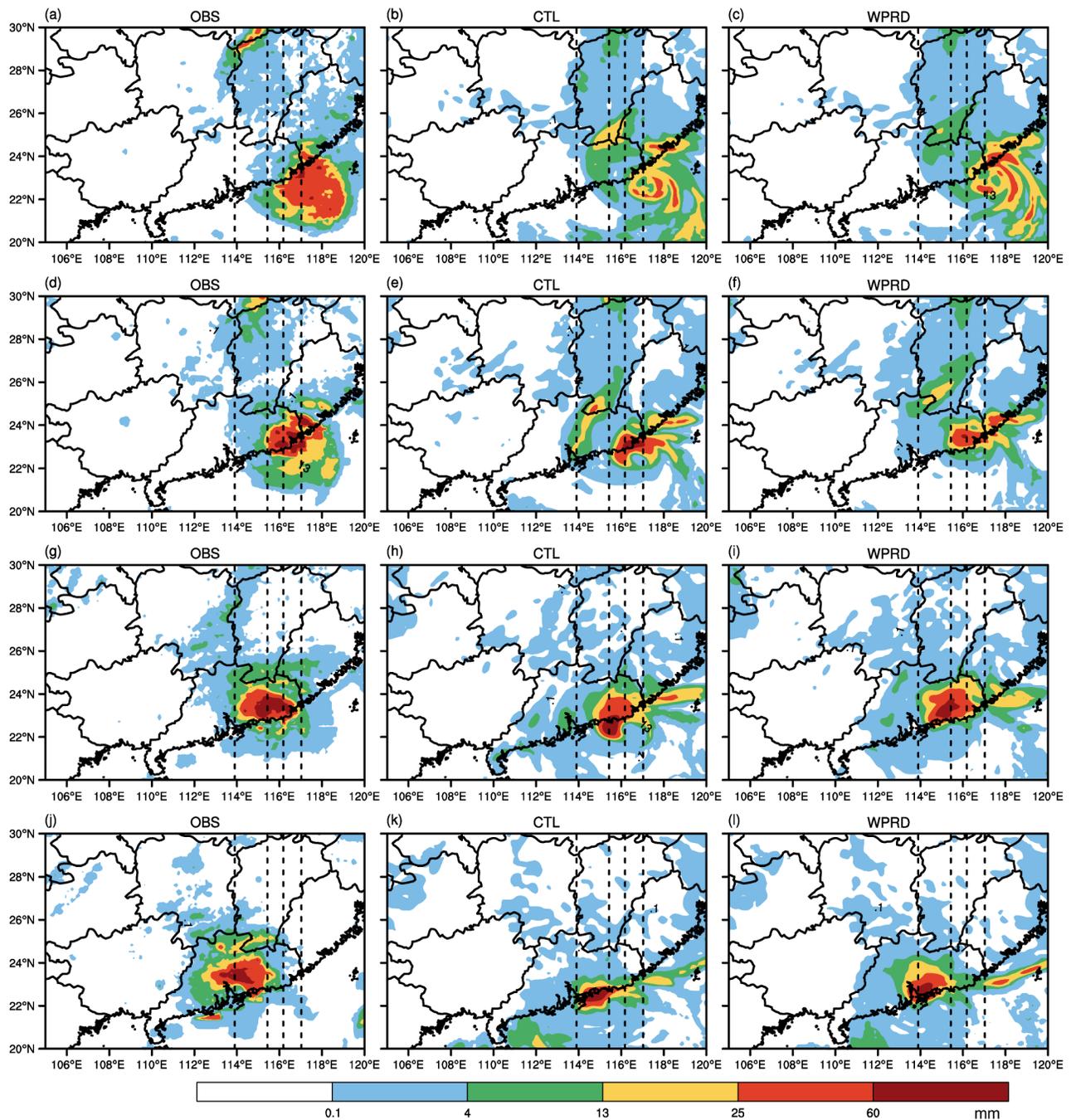


图9 2015年7月8日18:00至9日18:00实况观测(OBS;左列)、控制试验模拟(CTL;中间列)和敏感试验模拟(WPRD;右列)的逐6h累积降水量演变(单位:mm):(a-c)0~6h;(d-f)6~12h;(g-i)12~18h;(j-l)18~24h。黑色虚线从右到左为广东、汕尾、惠州、深圳的起始经度线

Fig. 9 6-h accumulated rainfall observations (OBS; left column) and rainfall forecasts from CTL (control experiment; middle column) and WPRD (sensitive experiment; right column) from 1800 UTC 8 July to 1800 UTC 9, 2015 (units: mm): (a-c) 0-6 h; (d-f) 6-12 h; (g-i) 12-18 h; (j-l) 18-24 h. Black dotted lines denote the beginning longitudes of Guangdong, Shanwei, Huizhou and Shenzhen

圳地区上空正涡度最大增加了 $111.97 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 和 $95.19 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, 气旋性风场进一步加强。总的来说, 同化风廓线雷达使得局地气旋性环流加强, 同时正涡度增加, 动力场条件更有利于降水发展。

水汽的供应对于降水的形成和发展至关重要。沿北纬 22.5°N 做水汽通量散度的垂直剖面(图13)来对比分析两组试验的水汽分布。初始时刻(图13a-c), 台风外围环流主要影响粤、闽交界, 两组

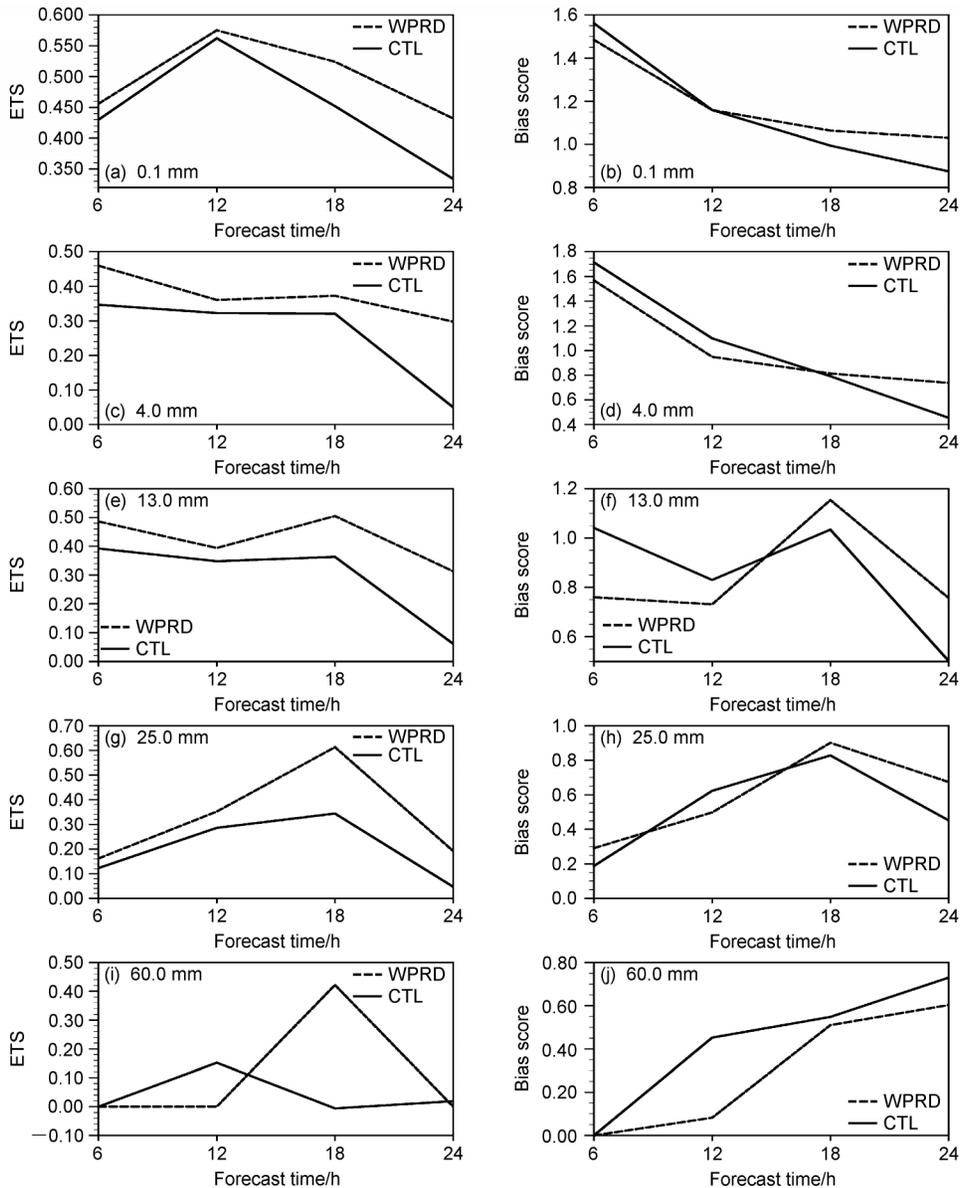


图10 2015年7月8日18:00至9日18:00逐6h累积降水评分在不同降水量级随预报时效的变化：(a、b) 大于0.1 mm；(c、d) 大于4 mm；(e、f) 大于13 mm；(g、h) 大于25 mm；(i、j) 大于60 mm
Fig.10 Variations of ETS and Bias scores of accumulated precipitation forecast at 6-h intervals for (a, b) rainfall larger than 0.1 mm, (c, d) rainfall larger than 4.0 mm, (e, f) rainfall larger than 13.0 mm, (g, h) rainfall larger than 25.0 mm, (i, j) rainfall larger than 60.0 mm from 1800 UTC 8 July to 1800 UTC 9 July, 2015

试验在粤、闽附近均存在水汽通量散度的低值区。不同的是，WPRD试验中水汽辐合更强，最大水汽通量散度差为 $-33.3 \times 10^{-7} \text{ g hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}$ 。分析各个预报时次低层水汽分布情况，整体来看，与降水落区预报相对应，CTL试验预报的水汽辐合区较WPRD存在滞后。例如，模式的第24小时预报场（图13j-i），此时台风已进入深圳，WPRD试验中深圳上空为大片水汽通量负值区域，表明已积累大量水汽，而CTL试验中，深圳上空为大片水汽

辐散区，WPRD试验中水汽条件更利于降水发展。

上升运动与大气中的凝结降水过程密切相关，大气层结不稳定能量须在一定的上升运动条件下才能释放出来，从而形成对流性天气。图14为汕尾（22.78° N，115.37° E）、惠州（23.12° N，114.42° E）和深圳（22.33° N，114.07° E）地区垂直速度场的高度时间演变图。从上述实况逐6h累积降水演变可知，9日00:00~06:00、06:00~12:00

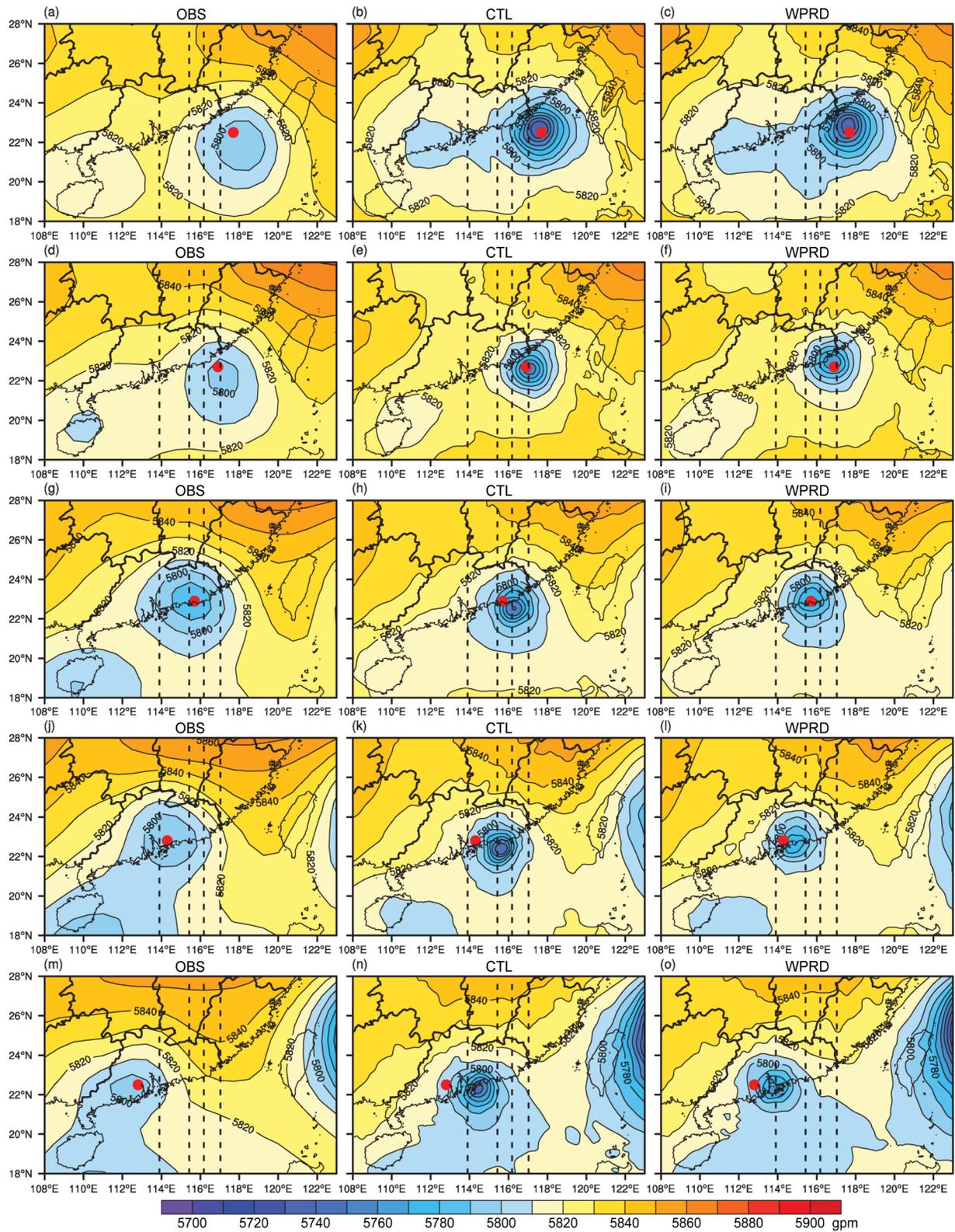


图11 2015年7月 (a-c) 8日18:00、9日 (d-f) 00:00、(g-i) 06:00、(j-l) 12:00、(m-o) 18:00 500 hPa位势高度场 (单位: gpm): 实况观测 (左列)、CTL预报 (中间列) 和WPRD预报 (右列)。红色点代表台风“莲花”最佳路径位置, 黑色虚线从右到左为广东、汕尾、惠州、深圳的起始经度线

Fig. 11 Geopotential height at 500 hPa (units: gpm) at (a-c) 1800 UTC 8 July, (d-f) 0000 UTC 9 July, (g-i) 0600 UTC 9 July, (j-l) 1200 UTC 9 July, and (m-o) 1800 UTC 9 July, 2015: Observations (left column), CTL (middle column), and WPRD (right column). Red dots represent the best track positions for typhoon “Linfa”, black dotted lines show the beginning longitudes of Guangdong, Shanwei, Huizhou and Shenzhen

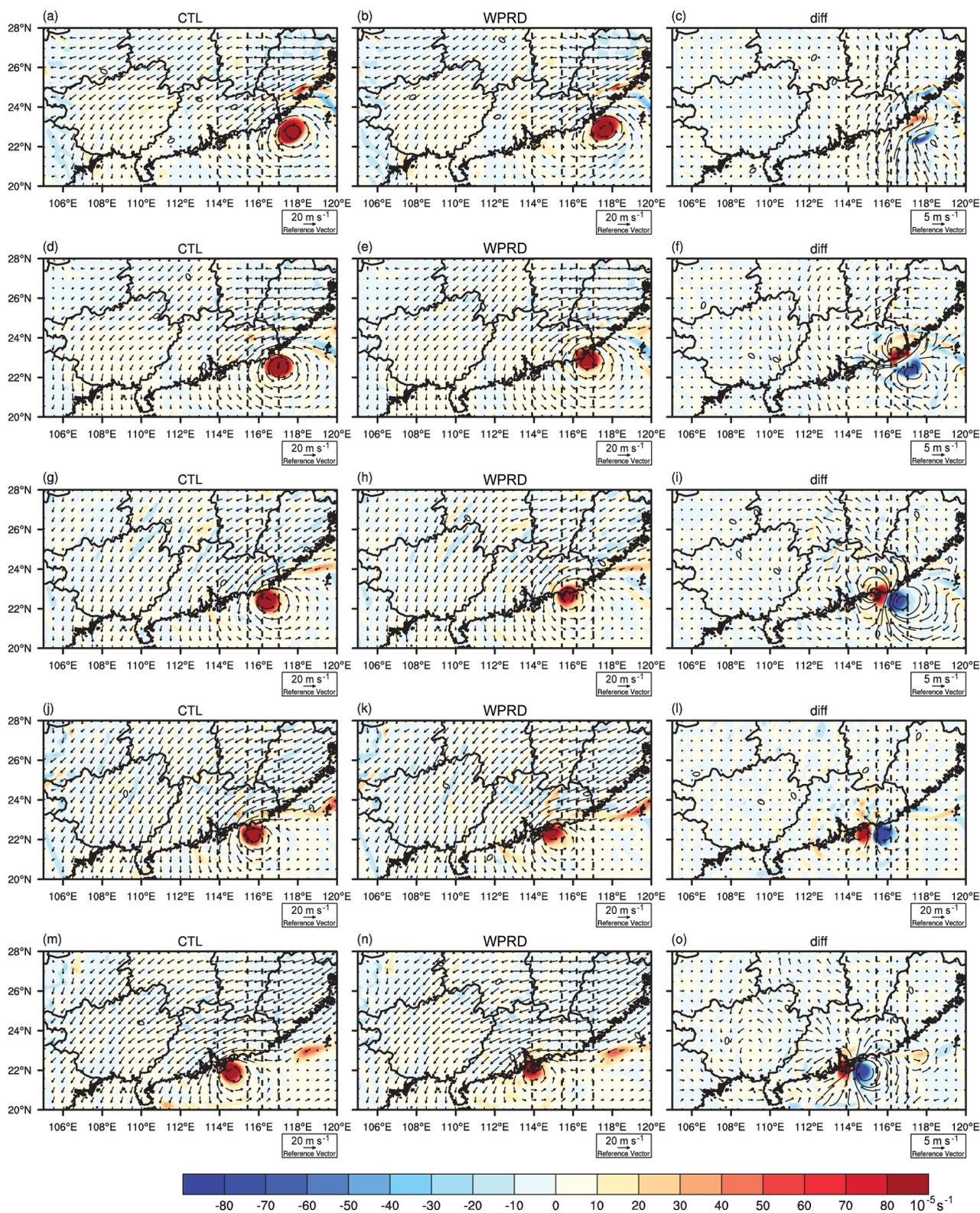


图12 2015年7月 (a-c) 8日 18:00、9日 (d-f) 00:00、(g-i) 06:00、(j-l) 12:00、(m-o) 18:00 850 hPa 风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 和涡度场 (填色, 单位: 10^{-5} s^{-1}): CTL (左列)、WPRD (中列) 和差值场 (右列; WPRD与CTL试验的差值)。黑色虚线从右到左为广东、汕尾、惠州、深圳的起始经度线

Fig. 12 Wind (arrows, units: m s^{-1}) and vorticity (shaded, units: 10^{-5} s^{-1}) at 850 hPa at (a-c) 1800 UTC 8 July, (d-f) 0000 UTC 9 July, (g-i) 0600 UTC 9 July, (j-l) 1200 UTC 9 July, and (m-o) 1800 UTC 9 July, 2015: CTL (left column), WPRD (middle column), and difference field (right column: WPRD minus CTL). Black dotted lines show beginning longitudes of Guangdong, Shanwei, Huizhou and Shenzhen

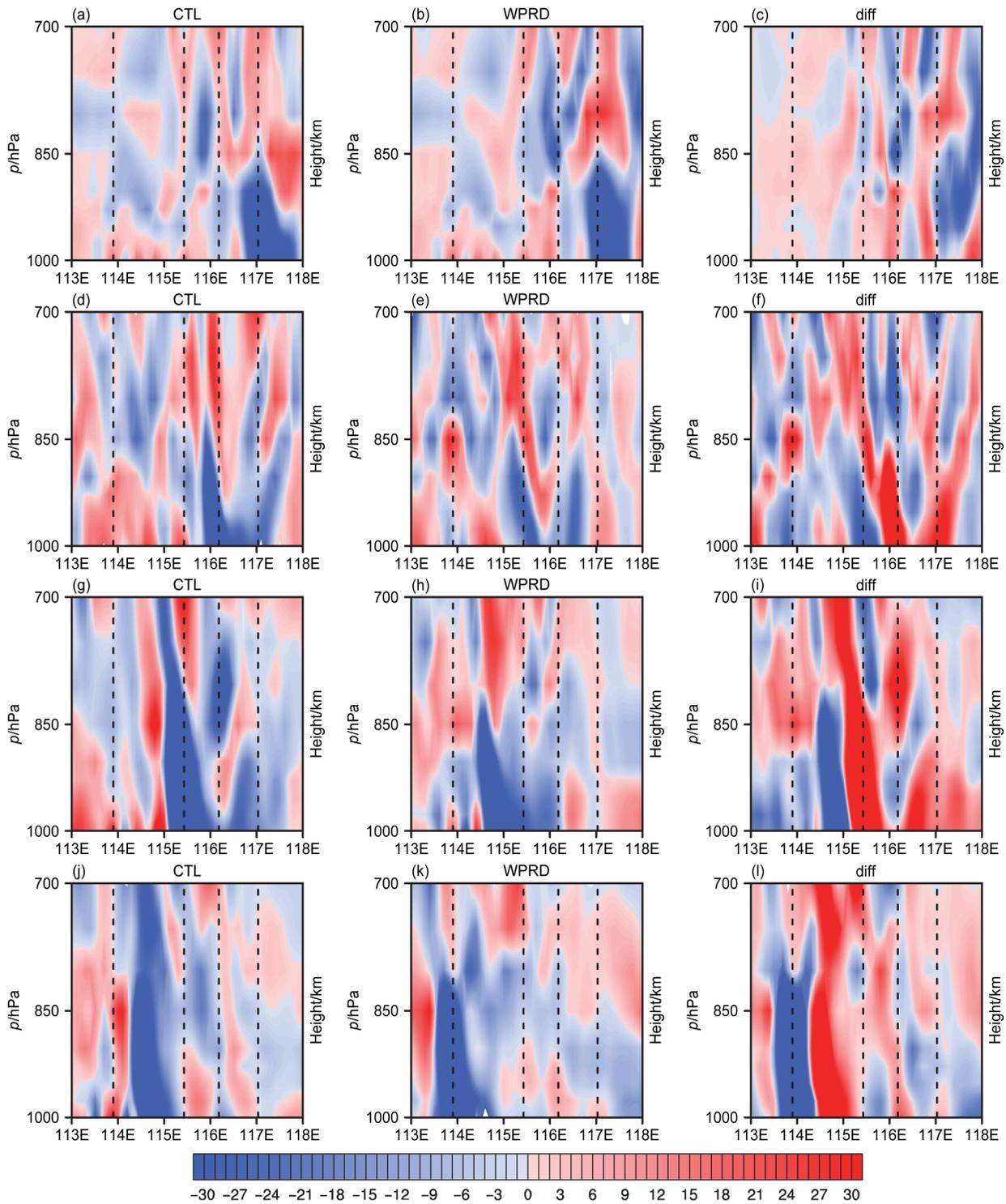


图13 2015年7月 (a-c) 8日18:00、9日 (d-f) 00:00、(g-i) 06:00、(j-l) 12:00、(m-o) 18:00水汽通量散度(填色; 单位: $10^{-7} \text{ g hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) 沿北纬 22.5°N 垂直剖面: CTL (左列)、WPRD (中列) 和差值场 (右列; WPRD减去CTL)。黑色虚线为广东、汕尾、惠州、深圳的起始经度线
Fig. 13 Vertical cross sections along 22.5°N of moisture divergence (units: $10^{-7} \text{ g hPa}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) at (a-c) 1800 UTC 8 July, (d-f) 0000 UTC 9 July, (g-i) 0600 UTC 9 July, (j-l) 1200 UTC 9 July, and (m-o) 1800 UTC 9 July, 2015: CTL (left panels), WPRD (middle panels) and differences (right panels; WPRD minus CTL). Black dotted lines show the beginning longitudes of Guangdong, Shanwei, Huizhou and Shenzhen

(图 14a-c), 汕尾地区被强降水所覆盖。CTL 试验在该时段内表现为低层 (1000~700 hPa) 主要为

弱下沉气流, 而 WPRD 试验则为大片上升气流区, 最大垂直速度差为 0.45 m s^{-1} 。同化风廓线雷达资

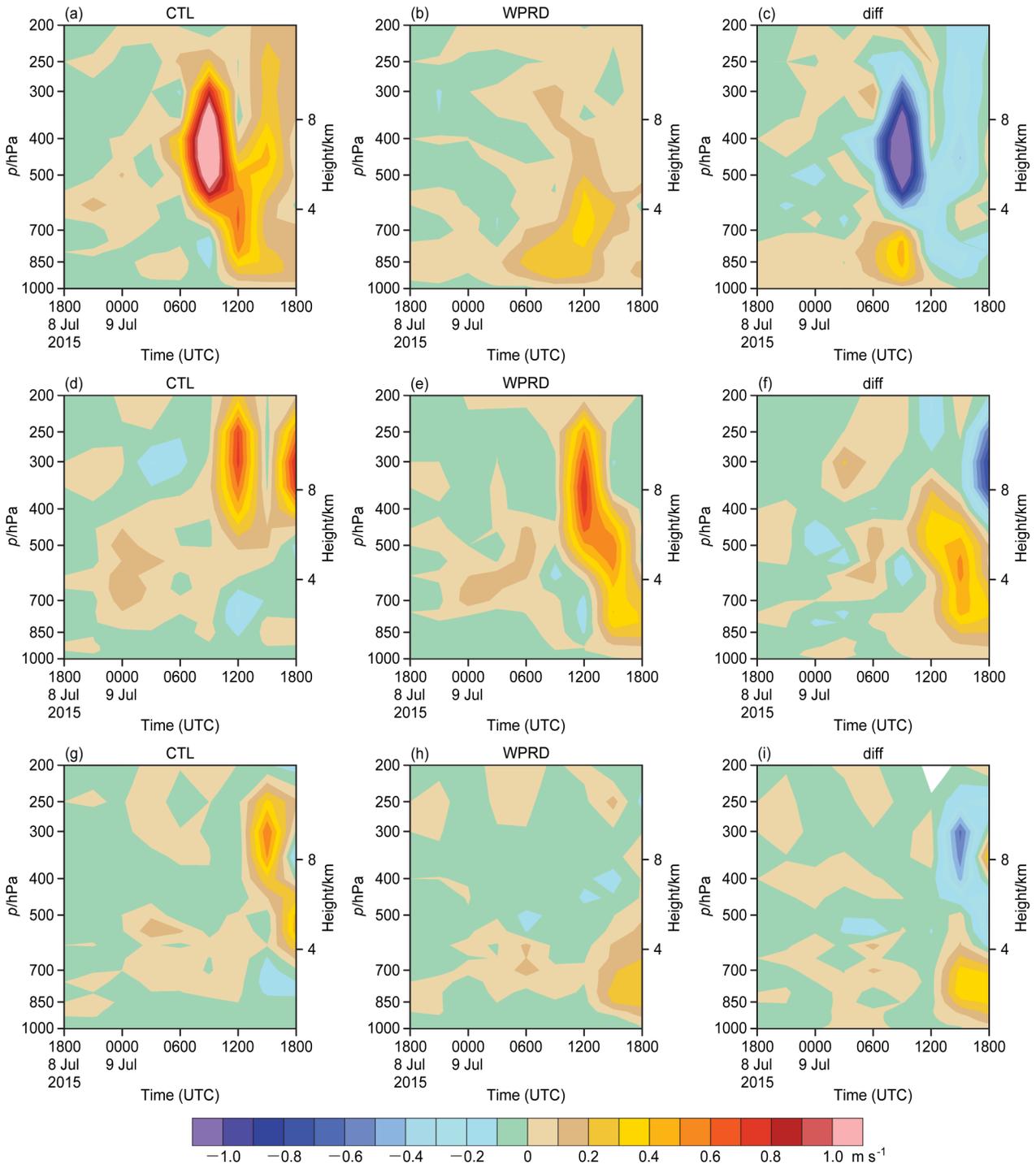


图14 2015年7月8日18:00至9日18:00 (a-c) 汕尾、(d-f) 惠州和 (g-i) 深圳地区垂直气流上升速度的高度—时间演变图 (单位: m s^{-1}): CTL 试验 (左列)、WPRD 试验 (中间列)、WPRD 与 CTL 试验的差值 (右列)

Fig. 14 Time-height cross sections of vertical velocity (units: m s^{-1}) in (a-c) Shanwei, (d-f) Huizhou, and (g-i) Shenzhen on from 1800 UTC 8 July to 1800 UTC 9 July, 2015: CTL (left column), WPRD (middle column) and differences (right column; WPRD minus CTL)

料加强了汕尾地区的垂直上升运动, 有利于低层水汽上升凝结产生降水。9日06:00~12:00、12:00~18:00 (图14d-f), 惠州地区受台风影响产生降水。WPRD 试验从9日09:00起低层开始转为上升气流,

到12:00~18:00上升运动区范围明显增大, 气流上升强度也显著增加, 最大上升速度为 0.79 m s^{-1} , 而此时 CTL 试验低层仍然以下沉气流为主, 不利于降水发展。9日12:00~18:00 (图14g-i), 台风

已经进入深圳, 导致深圳地区出现强降水。WPRD 试验表现为深圳上空 (1000~500 hPa) 存在速度为 $0.2\sim 0.3\text{ m s}^{-1}$ 的上升运动, CTL 试验在 600 hPa 以下被下沉气流控制, 显然 WPRD 模拟的垂直速度更符合实况。

4 总结与讨论

为了评估我国的风廓线雷达观测资料在 GRAPES-Meso 系统中的应用效果, 本文基于 2015 年 7 月全国 49 部风廓线雷达探测数据, 首先建立了面向数值预报同化应用的风廓线雷达两步质量控制方案, 并对质量控制方案的合理性进行分析。进而基于 GRAPES-3DVAR 资料同化系统开展有、无同化风廓线观测的影响试验, 通过批量试验和个例分析探讨风廓线雷达资料同化对预报结果的影响, 主要结论如下:

(1) 面向业务化应用的风廓线雷达两步质量控制方案包含面向探测层面的数据预处理和面向同化应用的质量控制。通过对比 2015 年 7 月风廓线雷达观测资料集在质量控制前后与 ERA-Interim 再分析资料的统计特性, 表明本文建立的质量控制方案合理有效, 两步质控后风场误差显著减小, 同时观测背景差 (OMB) 更接近高斯分布, 满足数值同化应用需求。

(2) 将经过质量控制的风廓线雷达资料应用于 GRAPES-Meso, 开展为期 1 个月的循环同化预报试验。试验结果表明, 在循环同化过程中加入风廓线雷达资料后, 数值模式初始场中风场、温度场、湿度场的分析误差均有减小。整层大气中风速、温度和湿度的预报误差在前 12 h 有所改进。降水评分检验结果显示同化风廓线雷达资料对于提高降水预报技巧有积极影响, 尤其是在模式积分最初 6 h 内, 降水的 ETS 评分表现为在中雨、大雨、暴雨、大暴雨量级上均有所提高, 平均提高了 6.25%。

(3) 针对台风暴雨个例分析结果表明, 风廓线雷达资料同化调整了模式初始场和预报场中的风场结构, 并通过变分同化中的平衡约束关系间接影响高度场、水汽场和垂直速度场的分布。模式中形成更有利于降水发生、发展的环境条件, 从而更好地预报了降水的位置与强度。

本文的研究工作为以后开展风廓线雷达资料业

务同化应用积累了经验, 未来的工作包括:

(1) 在面向业务数值预报同化应用的实时质量控制中建立实时更新的动态黑名单, 进一步优化风廓线雷达质量控制流程。

(2) 选取不同时段、不同类型的天气个例进行更为细致的分析。使用布局更新后的站网数据更全面阐述风廓线雷达资料对数值预报的影响。

(3) 尝试开展更高频次、更高分辨率的快速循环同化, 尽可能使得高频次的风廓线雷达观测信息更多的被数值模式所应用。此外, GRAPES-Meso 中目前使用的同化方案为大尺度同化技术, 对于风廓线雷达这类中小尺度资料过于粗糙。未来需要发展多尺度同化技术, 来提高对风廓线雷达资料的应用能力。

参考文献 (References)

- Benjamin S G, Schwartz B E, Szoke E J, et al. 2004. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85(12): 1871-1886. doi:10.1175/BAMS-85-12-1871
- Bouttier F. 2001. The use of profiler data at ECMWF[J]. *Meteor. Z.*, 10(6): 497-510. doi:10.1127/0941-2948/2001/0010-0497
- Chan P W, Yeung K K. 2003. Experimental extension of the measurement range of a boundary layer wind profiler to about 9 km [C]//*Proceedings of the 12th Symposium on Meteorological Observations and Instrumentation*. Long Beach, California, USA: American Meteorological Society, 2003
- 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. Chen Dehui, Xue Jishan, Yang Xuesheng, et al. 2008. New generation of multiscale NWP system (GRAPES): General scientific design [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(22): 3433-3445
- 陈敏, 陈明轩, 范水勇. 2014. 雷达径向风观测在华北区域数值预报系统中的实时三维变分同化应用试验 [J]. *气象学报*, 72(4): 658-677. Chen Min, Chen Mingxuan, Fan Shuiyong. 2014. The real-time radar radial velocity 3DVar assimilation experiments for application to an operational forecast model in North China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(4): 658-677. doi:10.11676/qxxb2014.070
- 方平治, 赵兵科, 鲁小琴, 等. 2013. 华东沿海地台风风廓线特征的观测个例分析 [J]. *大气科学*, 37(5): 1091-1098. Fang Pingzhi, Zhao Bingke, Lu Xiaoqin, et al. 2013. Case studies on the characteristics of the coastal wind profiles of three typhoons landing along East China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(5): 1091-1098. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12104
- 高祝宇, 阮征, 魏鸣, 等. 2016. 风廓线雷达数据质量影响因子及处理算法 [J]. *应用气象学报*, 27(2): 148-159. Gao Zhuyu, Ruan Zheng, Wei Ming, et al. 2016. Quality factors and processing

- algorithm for wind profiling radar data [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 27(2): 148-159. doi:10.11898/1001-7313.20160203
- 郝民, 张华, 陶士伟, 等. 2013. 变分质量控制 在区域 GRAPES-3DVAR 中的应用研究 [J]. *高原气象*, 32(1): 122-132. Hao Min, Zhang Hua, Tao Shiwei, et al. 2013. Application of variational quality control to regional GRAPES-3DVAR [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 32(1): 122-132. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00013
- 何平, 马颖, 阮征, 等. 2010. 晴空热对流泡的风廓线雷达探测研究 [J]. *气象学报*, 68(2): 264-269. He Ping, Ma Ying, Ruan Zheng, et al. 2010. Study of thermal bubbles in the lower atmosphere based on the data detected using wind profiler radar [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68(2): 264-269. doi:10.11676/qxxb2010.026
- Ishihara M, Kato Y, Abo T, et al. 2006. Characteristics and performance of the operational wind profiler network of the Japan Meteorological Agency [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84(6): 1085-1096. doi:10.2151/jmsj.84.1085
- 姜晓曼, 袁慧玲, 薛明, 等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析 [J]. *气象学报*, 72(2): 207-219. Jiang Xiaoman, Yuan Huiling, Xue Ming, et al. 2014. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21-22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 72(2): 207-219. doi:10.11676/qxxb2014.024
- 李妙英, 杨璐, 周志敏, 等. 2013. 风廓线雷达资料在降水数值预报中的应用探讨 [J]. *成都信息工程学院学报*, 28(3): 284-290. Li Miaoying, Yang Lu, Zhou Zhimin, et al. 2013. Application research of wind profile radar data in the numerical prediction of rainfall [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese)*, 28(3): 284-290. doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.03.013
- 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 Rui, Zhai Guoqing, Wang Zhanggui, et al. 2012. Impact of application of cloud motion wind data from FY-2C satellite on simulation of typhoon cases [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36(2): 350-360. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11052
- 刘瑞婷, 阮征, 魏鸣, 等. 2016. 风的空间不均匀分布对风廓线雷达数据质量影响研究 [J]. *热带气象学报*, 32(2): 229-236. Liu Ruiting, Ruan Zheng, Wei Ming, et al. 2016. The analysis of influence on wind measurement by inhomogeneous wind distribution with wind profile radar [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 32(2): 229-236. doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.02.009
- 阮征, 何平, 葛润生. 2008. 风廓线雷达对大气折射率结构常数的探测研究 [J]. *大气科学*, 32(1): 133-140. Ruan Zheng, He Ping, Ge Runsheng. 2008. Determination of refractive index structure constant with wind profile radar data [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(1): 133-140. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.01.12
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China [J]. *J. Geophys. Res.*, 115, D02114, doi:10.1029/2009JD012097
- St-James J S, Laroche S. 2005. Assimilation of wind profiler data in the Canadian meteorological Centre's analysis systems [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 22(8): 1181-1194. doi:10.1175/JTECH1765.1
- 陶士伟, 陈晓红, 龚建东. 2006. L 波段探空仪温度资料误差分析 [J]. *气象*, 32(10): 46-51. Tao Shiwei, Chen Xiaohong, Gong Jiandong. 2006. Error analyses for temperature of L band radiosonde [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 32(10): 46-51. doi:10.3969/j.issn.1000-0526.2006.10.007
- 王洪, 王东海, 万齐林. 2015. 多普勒雷达资料同化在“7.21”北京特大暴雨两个例中的应用 [J]. *气象学报*, 73(4): 679-696. Wang Hong, Wang Donghai, Wan Qilin. 2015. Application of assimilating Doppler weather radar data in the "7.21" Beijing excessive storm [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 73(4): 679-696. doi:10.11676/qxxb2015.048
- 王金成, 龚建东, 邓莲堂. 2014. GNSS 反演资料在 GRAPES_Meso 三维变分中的应用 [J]. *应用气象学报*, 25(6): 654-668. Wang Jincheng, Gong Jiandong, Deng Liantang. 2014. Operational assimilation of data retrieved by GNSS observations into GRAPES Meso 3DVar system [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 25(6): 654-668
- 王欣, 卞林根, 彭浩, 等. 2005. 风廓线仪系统探测试验与应用 [J]. *应用气象学报*, 16(5): 693-698. Wang Xin, Bian Linggen, Peng Hao, et al. 2005. The atmospheric wind profiler and radio acoustic sounding system with its applications [J]. *Journal of Applied Meteorology Science (in Chinese)*, 16(5): 693-698. doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.05.017
- Weber B L, Wuertz D B. 1990. Comparison of rawinsonde and wind profiler radar measurements [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 7(1): 157-174. doi:10.1175/1520-0426(1990)007<0157: CORAWP>2.0.CO;2
- 吴蕾, 陈洪滨, 高玉春, 等. 2013. 国产风廓线雷达对比试验初步分析 [J]. *现代雷达*, 35(6): 24-28. Wu Lei, Chen Hongbin, Gao Yuchun, et al. 2013. Primary analysis of the comparison test of domestic wind profilers [J]. *Modern Radar*, 35(6): 24-28. doi:10.3969/j.issn.1004-7859.2013.06.007
- 吴蕾, 陈洪滨, 康雪. 2014. 风廓线雷达与 L 波段雷达探空测风对比分析 [J]. *气象科技*, 42(2): 225-230. Wu Lei, Chen Hongbin, Kang Xue. 2014. Comparison between wind profiler and l band upper - air meteorological sounding system [J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 42(2): 225-230. doi:10.3969/j.issn.1671-6345.2014.02.008
- 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等. 2008. GRAPES 新一代全球/区域变分同化系统研究 [J]. *科学通报*, 53(20): 2408-2417. Xue Jishan, Zhuang Shiyu, Zhu Guofu, et al. 2008. Scientific design and preliminary results of three-dimensional Variational data assimilation system of GRAPES [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53(22): 3446-3457. doi:10.1007/s11434-008-0416-0
- 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. Xue Chenbin, Gong Jiandong, Xue Jishan, et al. 2011. Height assignment error of FY-2E atmospheric motion vectors and its application to data assimilation [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in*

- Chinese), 22(6): 681-690. doi: 10.3969 / j. issn. 1001-7313.2011.06.005
- 薛湛彬, 陈娴, 吴俞, 等. 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用 [J]. 大气科学, 41(4): 673-690. Xue Chenbin, Chen Xian, Wu Yu, et al. 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41(4): 673-690. doi: 10.3878/j. issn.1006-9895.1608.15288
- 曾丹丹, 陈芳丽, 黄潮. 2017. 1510 号台风“莲花”水平结构的演变特征 [J]. 广东气象, 39(3): 6-10. Zeng Dandan, Chen Fangli, Huang Chao. 2017. Characteristics of the evolution of horizontal structure of typhoon Linfa (1510) [J]. Guangdong Meteorology (in Chinese), 39(3): 6-10. doi: 10.3969 / j. issn. 1007-6190.2017.03.002
- 张胜军, 徐祥德, 吴庆梅, 等. 2004. “中国登陆台风外场科学试验”风廓线仪探测资料在四维同化中的初步应用研究 [J]. 应用气象学报, 15(S1): 101-108. Zhang Shengjun, Xu Xiangde, Wu Qingmei, et al. 2004. Researches on atmospheric profile observations of "CLATEX" in four-dimensional data assimilation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 15(S1): 101-108. doi: 10.3969/j.issn.1001-7313.2004.z1.014
- 张旭斌, 万齐林, 薛纪善, 等. 2015. 风廓线雷达资料质量控制及其同化应用 [J]. 气象学报, 73(1): 159-176. Zhang Xubin, Wan Qilin, Xue Jishan, et al. 2015. Quality control of wind profile radar data and its application to assimilation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 73(1): 159-176. doi:10.11676/qxxb2015.015
- Zhang X B, Luo Y L, Wan Q L, et al. 2016. Impact of assimilating wind profiling radar observations on convection-permitting quantitative precipitation forecasts during SCMREX [J]. Wea. Forecasting, 31(4): 1271-1292. doi:10.1175/WAF-D-15-0156.1
- Zhang Y, Chen H M. 2016. Comparing CAM5 and super parameterized CAM5 simulations of summer precipitation characteristics over continental East Asia: Mean state, frequency-intensity relationship, diurnal cycle, and influencing factors [J]. J. Climate, 29(3): 1067-1089. doi:10.1175/JCLI-D-15-0342.1
- 仲跻芹, Guo Yongrun, 张京江. 2017. 华北地区地基GPS天顶总延迟观测的质量控制和同化应用研究 [J]. 气象学报, 75(1): 147-164. Zhong Jiqin, Guo Yongrun, Zhang Jingjiang. 2017. A study of quality control and assimilation of ground-based GPS ZTD in North China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 75(1): 147-164. doi:10.11676/qxxb2017.010
- 朱立娟. 2015. 面向资料同化风廓线雷达水平风产品质量初步分析 [J]. 气象, 41(12): 1494-1502. Zhu Lijuan. 2015. Preliminary analysis on wind product of wind profiler for data assimilation [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 41(12): 1494-1502. doi: 10.7519/j.issn. 1000-0526.2015.12.007