

# 雷达资料快速更新四维变分同化中增加地面资料同化对强对流临近数值预报的影响\*

刘瑞婷<sup>1,2</sup> 陈明轩<sup>1</sup> 肖 现<sup>1</sup> 秦 睿<sup>1</sup> 高 峰<sup>1</sup> 杨 璐<sup>1</sup>  
吴剑坤<sup>1</sup> 孙娟珍<sup>3</sup>

LIU Ruiting<sup>1,2</sup> CHEN Mingxuan<sup>1</sup> XIAO Xian<sup>1</sup> QIN Rui<sup>1</sup> GAO Feng<sup>1</sup> YANG Lu<sup>1</sup>  
WU Jiankun<sup>1</sup> SUN Juanzhen<sup>3</sup>

1. 北京城市气象研究院, 北京, 100089

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

3. 美国国家大气研究中心, 科罗拉多州博尔德, 80307

1. *Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China*

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

3. *National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO 80307, U.S.A*

2021-03-10 收稿, 2021-07-19 改回.

刘瑞婷, 陈明轩, 肖现, 秦睿, 高峰, 杨璐, 吴剑坤, 孙娟珍. 2021. 雷达资料快速更新四维变分同化中增加地面资料同化对强对流临近数值预报的影响. *气象学报*, 79(6): 921-942

Liu Ruiting, Chen Mingxuan, Xiao Xian, Qin Rui, Gao Feng, Yang Lu, Wu Jiankun, Sun Juanzhen. 2021. The impact of assimilating surface observations in rapid-refresh four-dimensional Variational Radar Data Assimilation System on model-based severe convection nowcasting. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(6):921-942

**Abstract** The high-resolution numerical simulations and verifications of 10 convective cases that occurred in Beijing have been conducted by assimilating surface observations in a four-dimensional Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) based on the rapid-refresh 4D variational assimilation (RR4DVar) technique of multi-radar observations and three-dimensional cloud-scale numerical model. Compared with the surface observations fusion scheme, the verification results show that the surface observations assimilation obviously can improve analysis results below 1 km boundary layer height, and the root mean square errors (RMSE) of simulated wind speed and wind direction are respectively reduced by 0.1 m/s and 7.2° on average, the RMSE of temperature is reduced by 0.2°C. The RMSE of wind speed is decreased by 0.5 m/s at the lowest model level of 100 m, and the error of wind speed increases with height below 3 km. The RMSEs of wind direction and temperature are respectively reduced by 15.5° and 0.4°C at the lowest model level, and the errors of temperature are decreased at all levels below 1.5 km height. The RMSEs of 10 m surface wind speed and wind direction are respectively reduced by 0.2 m/s and 10.8°, and the error of 2 m surface temperature is also reduced. In addition, the surface observations assimilation can to a certain extent improve the 1 hour forecast of surface fields, whereas the RMSEs of regional surface temperature and wind field increase with forecast time. Combined with the detailed analysis of localized and rapidly intensified convection case that occurred in Beijing on 17 May, 2019, it is found that the surface observations assimilation can better represent the dynamical and thermodynamical characteristics in the lower atmosphere with more details, and thus improves the forecast of low-level meteorological variables. Further investigation of the local trigger mechanism of convection

\* 资助课题: 北京市自然科学基金项目(8204060、8212026、8192016)、国家重点研发计划项目(2018YFC1507801)、国家自然科学基金项目(41575050、41805034)、灾害天气国家重点实验室开放课题(2019LASW-B06)。

作者简介: 刘瑞婷, 主要从事强对流数值模拟、临近预报研究。E-mail: rtlui@ium.cn

通信作者: 陈明轩, 主要从事临近预报相关研究。E-mail: mxchen@ium.cn

indicates that the interaction between the convergence line of sea breeze and the urban condition to some extent has affected the trigger and development of local convection in Beijing. This method can further improve the nowcasting of localized and rapidly intensified convection in Beijing.

**Key words** VDRAS, Data assimilation, Surface observations, Numerical simulation, Nowcasting

**摘要** 基于雷达资料快速更新四维变分同化(RR4DVar)技术和三维数值云模式发展的快速更新雷达四维变分分析系统(VDRAS),通过在系统中加入地面自动气象站观测资料的同化方法,对发生在北京地区的10个强对流过程开展了地面资料同化的高分辨率模拟分析和检验评估,并与已经业务使用的地面资料融合方法进行对比。研究发现,地面观测资料同化使边界层1 km高度以下的分析场改善最为明显,风速和风向的均方根误差分别平均降低0.1 m/s和7.2°,温度的均方根误差降低0.2°C。模式最低层100 m高度的风速均方根误差降低0.5 m/s,风速的误差随高度上升逐渐增大。模式最低层风向的均方根误差降低15.5°,温度的均方根误差降低0.4°C,且1.5 km高度以下的温度偏差都减小。区域内地面10 m高风速的均方根误差平均降低0.2 m/s,风向的均方根误差降低10.8°,地面2 m气温的偏差也降低。随着预报时效的延长,地面温度和风场的误差不断增大,但地面资料同化方法在一定程度上可以提高1 h内地面气象要素的预报效果。对2019年5月17日北京地区局地强对流新生和增强过程的详细分析表明,地面自动气象站观测资料的同化方法相对于融合,可以通过更细致准确地分析低层大气的热动力特征,改善低层气象要素的预报效果。在此基础上,通过探究对流单体的局地触发机理发现,海风锋辐合线与城市的相互作用一定程度上影响了对流的局地新生和发展,该同化方法可以进一步提高北京地区局地突发强对流的临近数值预报能力。

**关键词** 雷达四维变分分析系统, 数据同化, 地面观测, 数值模拟, 临近预报

中图法分类号 P456

## 1 引言

近几十年,大量中尺度观测分析和对流尺度数值模拟研究表明,对流风暴的新生和发展演变通常与低层三维动力和热力条件及其相互作用存在密切联系(Markowski, et al, 2010)。风暴本身的热动力特征(如冷池、出流)及其与近风暴低层环境(如风场、辐合上升、风垂直切变、入流等)特征相互作用,一定程度上可以预测对流风暴的发展传播(Parker, et al, 2004; Weisman, et al, 2004; Lombardo, et al, 2013; 陈明轩等, 2013; 孙继松等, 2013; 冉令坤等, 2014; 郑媛媛等, 2014; 肖现等, 2015)。并且许多研究(Wilson, et al, 1986, 1997; Koch, et al, 1997; Ziegler, et al, 1998; 陈明轩等, 2010; 王彦等, 2011)指出,边界层辐合线(出流边界、干线、海风锋、冷锋、近地面中尺度切变线等)相互作用或者边界层辐合线与原有风暴系统相互作用,会导致近地面动力不稳定和辐合上升明显增强,有利于对流风暴的新生和快速增强。

因此,低层大气的对流尺度动力和热动力演变特征成为强天气预报、预警的关键。对流尺度数值天气预报面临的主要问题之一是准确的初始条件,其初值的高度非线性会对强对流系统的预报造成困难(Schenkman, et al, 2011)。多普勒天气雷达,其高时空分辨率的观测数据不仅可以反演风暴的

四维结构,而且大量研究(Weygandt, et al, 2002a, 2002b; Dawson II, et al, 2006; 陈耀登等, 2018)表明,同化雷达反射率因子和径向速度可以为数值模式提供高精度的初始条件,有助于改善数值模式对强对流系统的分析和预报能力。然而,对流系统新生前并无明显的雷达回波或是由于雷达最低扫描非零高程和地球曲率的影响,雷达通常无法观测到地面层特征,尤其当风暴远离雷达时(100 km),雷达最低观测仰角(0.5°)的波束距地面会超过2 km。但是,近地层及边界层中的温度、湿度和风速等对于强对流的新生和发展起着重要的作用(Mueller, et al, 1993; Atkins, et al, 1995; Weckwerth, et al, 1996; Ziegler, et al, 1997; Wilson, et al, 1998; Wakimoto, et al, 2010; Sobash, et al, 2015; 陈明轩等, 2017)。近年来,随着地面观测网站的增加和完善,高时空分辨率的地面自动气象站观测数据已经实时可用,能满足数值预报的快速同化发展需求。因此,考虑到边界层过程在强对流天气新生和快速演变中的重要作用,地面自动气象站观测和雷达探测资料的“同时同化”可以填补雷达资料的边界层“缺测”,从而提高数值模式在低层热力和动力的分析预报能力。一些研究已经将同化地面观测资料加入到对流尺度数值模式中。通过在集合卡尔曼滤波(EnKF)系统中同化地面观测资料(Zhang, et al, 2004; Marquis, et al, 2014; Putnam, et al, 2014;

Snook, 2015)发现,该方法可以获得更好的中尺度和对流尺度特征。Dong等(2011)研究发现,当雷达距离对流系统较远时,如果地面观测网间距小于20 km,同化地面观测资料会提高风暴的预报能力。Hou等(2013)利用风暴尺度预报系统研究了地面自动气象站观测数据的三维变分同化(3DVar)对华南地区强降水预报的影响,结果显示其对降水位置预报有普遍积极的影响,而且可以改善模式近地面的气象要素。许多学者对地面观测资料的同化方案也进行了探索,针对观测站实际地形高度与模式地形高度不匹配的情况考虑了地形高度差异的影响(徐枝芳等,2007a,2007b; Xu, et al, 2013)。在此基础上,张鑫宇等(2021)对WRF-DA地面资料同化方案中温度和风速的订正方案进行了优化,结果显示9 h的预报误差明显降低。

北京市位于华北平原,邻近渤海湾,坐落于太行山和燕山山脉脚下,特殊的地形条件和快速的城市化发展使北京受到多个流场(山谷风、海陆风、城市热岛)的影响,强对流新生和快速发展导致的强降水事件近年来引起了相当大的关注。Xiao等(2017)研究发现,冷池对北京西部山区雷暴下山的新生和发展有重要的作用。王华等(2008)研究发现,北京西部山区地形的热力环流和动力强迫导致强对流的触发,其发展受到城市下垫面热力作用的影响。张文龙等(2013)通过分析北京局地暴雨天气过程的对流层低层偏东风发现,浅薄的暖湿偏东风直接起到了对流风暴触发机制的作用。Li等(2017a, 2017b)进一步分析发现,北部山区中尺度对流系统(MCS)的冷池出流加强了偏北气流,北京城市下垫面促进了城区低层辐合,导致强对流的再生。因此,北京地区发生的强对流天气由于受到多种低层环境因素的影响,发生、发展较为复杂。

本研究通过在快速更新雷达四维变分分析系统(VDRAS)中加入地面自动气象站观测资料的同化方法,并选取近年来发生在北京地区的10个强对流天气过程,对地面资料同化的结果进行分析和检验评估。在此基础上,开展雷达资料和地面观测资料的“同时同化”对北京地区局地强对流系统新生和增强的模拟与预报研究,进一步认识北京地区强对流新生和增强的物理机制,以提升局地突发强对流天气预警和临近预报能力。

## 2 资料同化方法

### 2.1 雷达四维变分分析系统介绍

VDRAS是基于四维变分同化(4DVar)技术并以云模型为约束的对流尺度数据同化系统(Sun, et al, 1997, 1998),使用的微物理方案包括Kessler暖云参数化方案(Sun, et al, 1997)和简单的冰参数方案(Chang, et al, 2016),通过实现对精细的大气动力和热力特征的有效模拟,提升强对流天气的临近预报。VDRAS已经在北京2008年夏季奥运会期间强天气临近预报中获得成功的实时示范应用(陈明轩等,2011)。在此基础上,通过改进雷达资料快速更新四维变分同化(RR4DVar)技术和三维数值云模式,进一步发展了一个可实时业务运行的快速更新雷达四维变分分析系统,可对京津冀区域逐6 min更新的一部或多部新一代多普勒天气雷达反射率因子和径向速度资料进行快速四维变分同化,同时融合区域5 min更新的自动气象站观测和中尺度数值模式结果,快速分析和临近预报5—15 min的对流尺度大气三维动力、热动力和微物理场的精细结构(陈明轩等,2016),包括与对流风暴生消、发展和传播密切相关的近风暴环境特征,以及风暴形成的冷池、出流等对流尺度热动力结构特征。其结果已被广泛应用于对流尺度风暴发展演变的机理分析研究(Xiao, et al, 2017; 肖现等, 2015; 陈明轩等, 2013)以及高分辨率的临近数值预报研究(Sun, et al, 2008; Tai, et al, 2011)。

4DVar同化技术是通过最小化代价函数来计算模式变量场与观测和背景场之间的最佳初始状态,找到与实际大气观测结果在时、空分辨率上尽可能接近的模式变量场。该代价函数如下

$$J = \frac{1}{2} (x_0 - x_b)^T \mathbf{B}^{-1} (x_0 - x_b) + \frac{1}{2} \sum_{\sigma, t} [\eta_v (v_r - v_r^o)^2 + \eta_q (q_r - q_r^o)^2] + J_p \quad (1)$$

式中,  $x_0$  表示同化开始前的模式变量场,  $x_b$  表示背景场,  $\mathbf{B}$  表示背景场误差协方差矩阵,所以该项代表了模式变量场与背景场之间的偏差。在假定观测误差不相关时,模式变量与雷达观测之间的偏差可表示为第二项。 $\sigma$  和  $t$  表示在空间和时间域求和,  $\eta_v$  和  $\eta_q$  分别代表径向速度和雨水混合比的权重系数,雷达观测的径向速度和雨水混合比用  $v_r^o$  和  $q_r^o$  表

示,  $v_r$  和  $q_r$  代表相应的模式变量。其中, 径向速度的观测值直接来自雷达测量值, 而雨水混合比的观测值是在数据同化之前根据雷达反射率因子 ( $Z$ ) 测量值估算得到的 (Tong, et al, 2005)

$$q_r^o = \frac{1}{\rho} 10^{[(Z-43.1)/17.5]} \quad (2)$$

式中,  $Z$  是以 dBz 为单位的反射率因子,  $\rho$  是空气的密度。

式(1)中,  $J_p$  是约束项, 从时间和空间上实施强迫约束和平滑, 以确保在没有雷达资料的区域模式解不会偏离观测和中尺度背景场太远, 从而确保代价函数能够快速收敛。

## 2.2 地面观测资料同化方法

目前 VDRAS 主要基于 Barnes 插值方案 (Barnes, 1964) 先将自动气象站的地面观测数据插值到模式水平网格点上, 形成地面中尺度分析场; 然后利用局地线性最小二乘拟合法, 将地面和地面以上中尺度分析场进行融合, 形成最终的三维中尺度分析背景场。主要是为了在雷达数据同化前利用地面观测资料对中尺度分析背景场进行融合校正, 提高系统热、动力场的分析和预报能力 (陈明轩等, 2016)。过去地面观测资料的时、空分辨率较雷达观测低, 只能代表大尺度的时、空环境特征。随着自动气象站地面观测网的快速发展, 地面观测资料的时间分辨率提高到 5 min 以内, 空间布网密度也逐渐增大, 近地面中尺度和某些对流尺度的时、空演变特征已可以被有效获取。因此, 相对于原来地面资料的融合方法, 地面自动气象站观测和雷达观测资料的“同时同化”可能会提高模式的中尺度甚至对流尺度的分析和临近预报效果。

基于 VDRAS 发展的地面自动气象站观测资料同化方法, 在同化前都通过邻域检查对资料进行二次质量控制, 以保证同化数据的质量。可以将地面自动气象站观测的气温、风和水汽混合比与雷达观测资料的反射率因子和径向速度同时同化, 其代价函数更新如下 (Chen, et al, 2016)

$$J = \frac{1}{2} (x_0 - x_b)^T B^{-1} (x_0 - x_b) + \frac{1}{2} \sum_{\sigma, t} [\eta_v (v_r - v_r^o)^2 + \eta_q (q_r - q_r^o)^2 + \eta_T (T_s - T_s^o)^2 + \eta_U (U_s - U_s^o)^2 + \eta_V (V_s - V_s^o)^2 + \eta_{Q_s} (Q_s - Q_s^o)^2] + J_p \quad (3)$$

式(3)中, 新增的 4 组分别代表模式最低层高度上的温度 ( $T_s$ )、水汽混合比 ( $Q_s$ ) 以及风的分量 ( $U_s, V_s$ ),  $T_s^o, Q_s^o, U_s^o$  和  $V_s^o$  表示相应的观测值。式中  $\eta_T, \eta_U, \eta_V$  和  $\eta_{Q_s}$  分别代表地面资料的权重系数。Chen 等 (2016) 将地面自动气象站的观测资料以独立站点方式存放, 并将地面资料订正到相应的模式最低层高度上, 同时对站点周边的 4 个模式网格点变量进行加权平均。当某个地面自动气象站观测资料的时间在同化窗积分的时间范围内时, 即可将此时该站的地面资料进行同化。本研究在此基础上, 将地面观测资料的站点同化方法升级为格点同化。首先将每个自动气象站的地面观测资料以同化窗内多组观测数据的形式存放, 然后利用 Barnes 插值方案分别将不同测站的同组地面观测资料插值到模式的水平网格点上, 再以格点的形式对同化窗内多组地面观测资料进行同化。相对于地面观测资料的站点同化方法, 当地面观测资料密集时, 格点同化方法可以将地面资料稀疏化, 从而减小过多的观测误差; 当某些原因导致地面观测资料比较稀疏时, 格点同化方法也可以基于水平插值方案将地面自动气象站的观测资料进行扩展, 从而同化更多的地面资料。总之, 地面自动气象站资料的格点同化方法使得地面资料在模式空间的观测信息代表性变得更为均匀。

该格点同化方法可以实现地面观测资料对 VDRAS 边界层内多模式层温度和最低模式层风速的间接同化, 从而提升模式边界层温度和风的初始场分析效果, 减小由于雷达资料在近地面观测的缺失导致的模式边界层初始场误差。对于温度, 式(4)给出了边界层内第  $k$  层模式高度 ( $Z_k$ ) 的温度观测值 ( $T_s^o$ ) 可利用中尺度模式初始背景场 (或标准大气) 在边界层内的温度垂直递减率 ( $T_1$ ) 由地面 2 m 气温测量值  $T_2^o$  进行订正

$$T_s^o = T_2^o + T_1 \times Z_k \quad (4)$$

对于风速, 在常通量层根据普朗特混合长理论和莫宁-奥布霍夫 (M-O) 相似理论, 可推得静力中性层结下的对数风廓线公式 (Kaimal, et al, 1994)

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (5)$$

式中, 风速  $U$  为地面高度  $Z$  的函数,  $\kappa$  为冯卡门常数, 一般取为 0.4;  $Z_0$  为地面粗糙度,  $U_*$  为地面摩擦

速度。许多研究表明近地层风速廓线与热力层结相关,当大气为静力非中性层结时,根据拉依赫特曼的混合长公式,可推导出近地层的风随高度呈指数分布(吕美仲等,1990)

$$\frac{U}{U_*} = \frac{1}{A\varepsilon}(Z^{\varepsilon} - Z_0^{\varepsilon}) \quad (6)$$

式中, $A$ 与层结及地面粗糙度有关, $\varepsilon$ 为层结参数。若已知 $Z_i$ 高度的风速为 $U_i$ ,则近地层指数风廓线可简化为(李鹏等,2011)

$$\frac{U}{U_i} = \left(\frac{Z}{Z_i}\right)^a \quad (7)$$

式中,指数 $a$ 为粗糙度系数,与层结和地面粗糙度有关,一般取0.143。因此,可将地面自动气象站观测的地面10 m风( $U_{10}^0, V_{10}^0$ )订正到模式最低层高度 $Z_s$ 上( $U_s^0, V_s^0$ ),得到

$$\frac{U_{10}^0}{U_s^0} = \left(\frac{10}{Z_s}\right)^a \quad (8)$$

### 3 个例描述和系统设置

#### 3.1 个例综合描述

选取2017—2020年夏季发生在北京地区包含不同类型对流风暴(多单体风暴、超级单体风暴、飑线、暴雨中尺度对流系统)的典型对流个例共计10个,用来对比研究VDRAS的地面观测资料同化与融合结果的差异。表1列出了每个对流过程的天气实况以及天气成因。

#### 3.2 系统设置

所有试验的模拟范围为 $150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$ ,模拟中心点设定在( $38.4^{\circ}\text{N}$ ,  $116.45^{\circ}\text{E}$ ),基本覆盖了上

述风暴个例发展的区域(图1)。所有试验均选取北京S波段雷达(BJRS)和天津S波段雷达(TJRS)的观测资料(包括径向速度和反射率因子)进行RR4DVar同化,在此基础上开展地面自动气象站观测资料同化与融合方法的对比研究。模式水平分辨率为1 km,垂直分辨率为200 m,模式最低层为垂直分辨率一半,即100 m,垂直均为50层,雷达资料同化高度设置到8.5 km,确保绝大部分雷达资料被同化。此高度以上为海绵层,由背景场、云模式积分动力调整及重力波阻尼算法控制,用来抑制重力波对模式上边界的影响和反射效应,同时确保有无雷达资料同化垂直层间的平滑过渡。高空背景场主要基于中国气象局北京快速更新循环数值预报系统-短期数值模式的预报结果。每个分析循环为15 min,迭代35次后输出分析结果。雷达资料和地面观测资料的同化窗均设置为730 s,并利用云模式进行15 min循环预报,用于计算下一热启动循环背景场。该两部雷达均处于VCP21扫描模式(6 min左右间隔、9个仰角)下的同步扫描控制,区域内地面自动气象站的观测资料为5 min间隔,所以每个同化窗包含2—3组雷达体扫资料和3组地面观测资料。每个对流个例分别设置2组试验:融合试验(SURF-MESO),在雷达资料同化的基础上,采取地面观测资料与中尺度背景场融合的技术方法;同化试验(SURF-4DVar),将地面观测和雷达观测资料在RR4Dvar中同时同化。

在此基础上,开展地面自动气象站观测资料同化方法的批量个例定量检验评估,每个对流个例的检验时段参见表1。利用海淀、观象台、延庆3部

表1 北京地区10个对流个例简介  
Table 1 Description of the 10 convection cases occurred in Beijing

序号	对流个例	天气实况	成因分析
1	2017年8月5日05时—6日00时(世界时,下同)	雷阵雨,局地短时雨强较大	低涡东移引导冷空气南下
2	2018年6月29日23时—30日12时	雷阵雨,伴有大风、冰雹和局地强降水	低层切变线
3	2018年7月24日05—23时	雷阵雨	东移高空槽和副高外围偏南气流
4	2018年8月7日05时—8日00时	强降雨,局地大暴雨	副热带高压外围偏南气流和冷空气
5	2018年8月12日04—23时	强降雨	副高外围偏南气流
6	2019年5月16日22时—17日13时	分散性雷阵雨,局地暴雨	强对流系统
7	2019年7月28日05时—29日00时	降水,伴有短时强降水和雷暴大风	高空槽和副高外围暖湿气流
8	2019年8月1日06—23时	雷阵雨,伴有短时强降水和短时大风	局地生成及北上加强的对流云团
9	2019年8月6日05—23时	自西向东出现明显降水伴有雷电	短波槽
10	2020年6月17日23时—18日12时	小冰雹、雷暴大风、短时强降水	高空冷涡

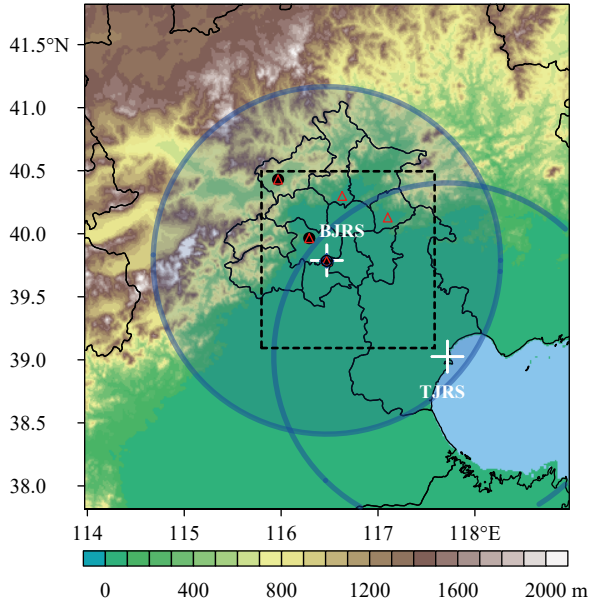


图1 北京及周边地区地形高度(色阶),北京和天津S波段雷达(BJRS、TJRS,+表示)的位置及扫描范围(150 km),检验所用风廓线雷达(黑色o表示)、地基微波辐射计(红色Δ表示)和秒探空(蓝色◇表示)的位置,以及模拟范围(黑色虚线框)

Fig. 1 Topography of Beijing-Tianjin-Hebei region and the simulation domain in the black dotted box; radar sites of S-band in Beijing and Tianjin (BJRS and TJRS) are denoted by "+" and scanning ranges (150 km); observations used for verification at wind profiler, ground-based microwave radiometers, second-level radiosonde are denoted by black "o", red "Δ" and blue "◇", respectively

风廓线雷达,以及海淀、观象台、延庆、怀柔和平谷5部地基微波辐射计和观象台秒级探空仪(图1)的垂直廓线观测数据,对三维温度和风的分析场模拟偏差进行定量统计,包括:平均绝对误差(MAE)、平均偏差(BIAS)、均方根误差(RMSE)等。利用区域内约600个地面自动气象站的观测资料,开展15 min快速更新的地面分析场及其1 h预报场的客观检验。通过对比2组试验结果的差别,整体评估地面资料同化的效果。

## 4 结果检验

### 4.1 三维温度和风的分析场定量检验结果

表2分别对比了地面观测资料同化(SURF-4DVar)和融合(SURF-MESO)对10个强对流个例三维温度和风的分析场客观检验。总体上,地面资料同化对于2 km高度以下的高空风场有改善作用,风速的均方根误差和平均绝对误差均降低约0.1 m/s,风向的均方根误差降低约4.0°,平均绝对误差降低约0.1°。而1 km高度以下的分析场改善更为明显,风速和风向的均方根误差分别降低达0.1 m/s和7.2°,温度的均方根误差降低0.2°C。这表明地面观测资料同化相对于融合方法可以有效填补雷达的边界层缺测,提高低层气象要素的模拟分析能力,更好地反映大气低层热力和动力特征。

不同测站的温度和风场误差分析结果(表3)表明,SURF-4DVar可以使平原测站如观象台和海淀的风场有较大改善,其中观象台秒级探空表现最明显,风速的均方根误差降低0.4 m/s,风向降低26.7°;山区测站如延庆的风速均方根误差降低约0.1 m/s,风向降低4.4°,其结果虽也有改善,但提高程度小于平原测站。这可能是由于VDRAS并不是设计在严格的地形追随坐标下,因此在复杂地形条件下的计算中,可能会在云模式方程中引起一些误差。雷达径向速度观测能够反映地形对气流的影响,因此可以体现复杂地形对三维风场的影响。SURF-4DVar使平原和山区测站的温度都有较大改善,其中观象台的改善最明显,温度的均方根误差降低0.4°C,表明VDRAS系统在温度场的模拟诊断中,也考虑了地形的影响。

为了进一步对比分析地面观测资料同化和融合方法对三维温度和风场的影响,图2给出了分析场与观测廓线的误差对比。从风速检验(图2a)来看,SURF-MESO的模式最低层高度上的风速平均绝对误差和均方根误差分别为1.4和2.1 m/s,SURF-

表2 三维温度和风的分析场客观检验  
Table 2 Objective verification of 3D temperature and wind analysis fields

	风速均方根误差(m/s)		风速平均绝对误差(m/s)		风向均方根误差(°)		风向平均绝对误差(°)		温度均方根误差(°C)		温度平均绝对误差(°C)	
	2 km	1 km	2 km	1 km	2 km	1 km	2 km	1 km	2 km	1 km	2 km	1 km
SURF-4DVar	2.39	2.27	1.73	1.62	40.60	43.05	28.69	30.42	1.63	1.43	1.13	1.02
SURF-MESO	2.49	2.40	1.79	1.70	44.48	50.27	28.75	32.51	1.76	1.63	1.21	1.15

表3 各站点1 km高度以下温度和风的分析场检验  
Table 3 Verification of temperature and wind analysis fields below 1 km at different sites

	风速均方根 误差(m/s)		风速平均绝对 误差(m/s)		风向均方根 误差(°)		风向平均绝对 误差(°)		温度均方根 误差(°C)		温度平均绝对 误差(°C)	
	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO
观象台	2.08	2.15	1.46	1.48	38.27	43.77	27.50	28.81	1.68	2.10	1.48	1.81
海淀	2.35	2.51	1.65	1.77	39.36	44.61	29.67	30.25	1.02	1.13	0.72	0.79
延庆	2.43	2.49	1.73	1.75	54.13	58.50	38.97	38.28	1.40	1.67	1.02	1.23
怀柔	—	—	—	—	—	—	—	—	1.95	2.30	1.37	1.60
平谷	—	—	—	—	—	—	—	—	1.24	1.36	0.90	0.98
探空	2.15	2.56	1.71	2.01	38.27	65.01	19.65	35.10	1.36	1.65	0.83	0.96

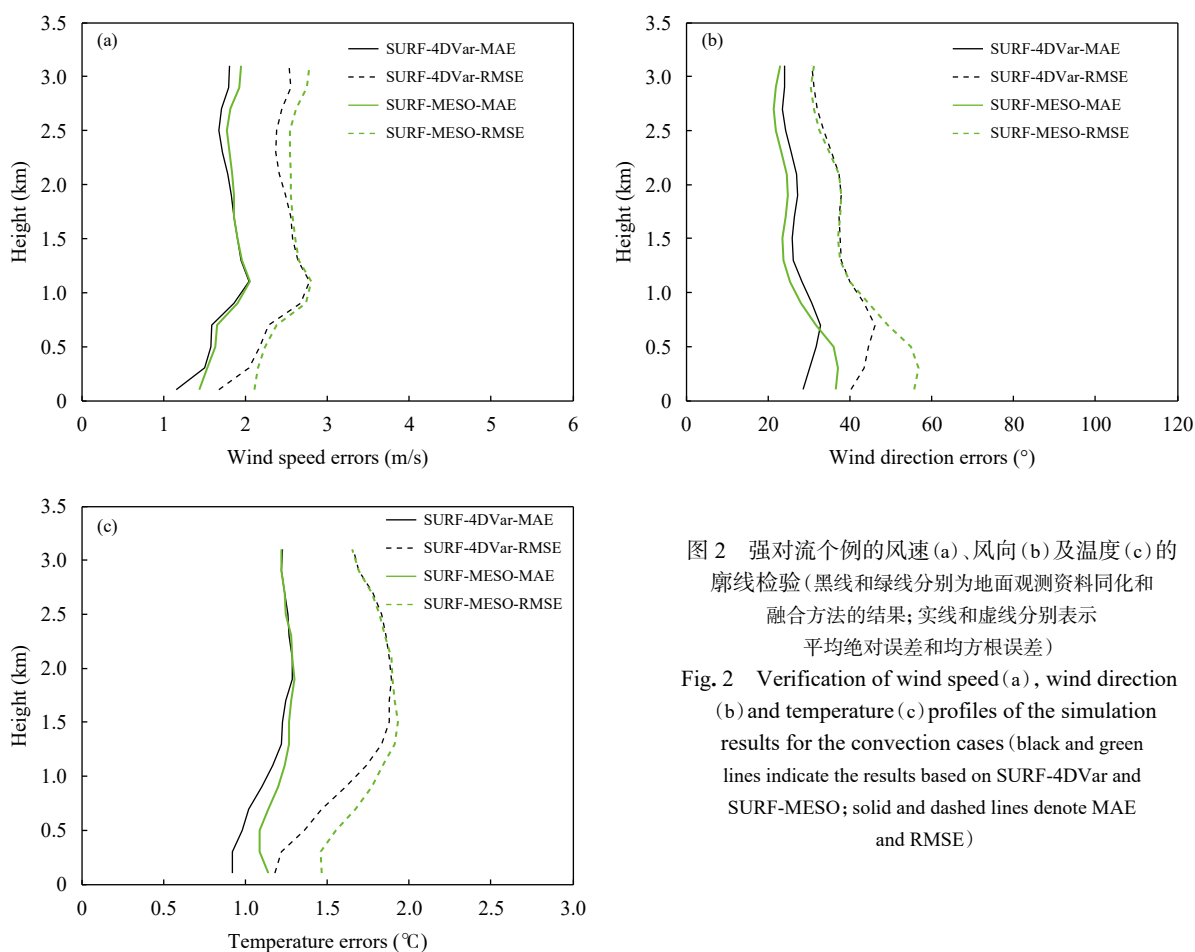


图2 强对流个例的风速(a)、风向(b)及温度(c)的  
廓线检验(黑线和绿线分别为地面观测资料同化和  
融合方法的结果;实线和虚线分别表示  
平均绝对误差和均方根误差)

Fig. 2 Verification of wind speed (a), wind direction  
(b) and temperature (c) profiles of the simulation  
results for the convection cases (black and green  
lines indicate the results based on SURF-4DVar and  
SURF-MESO; solid and dashed lines denote MAE  
and RMSE)

4DVar 将以上的误差分别降低为 1.1 和 1.6 m/s, 且明显降低了 500 m 高度以下风速的偏差。随着高度的上升, 两种方法检验的偏差和均方根误差逐渐增大后基本不变, 而且对上层风速的影响较小。风向检验的结果(图 2b)同样表明, SURF-4DVar 明显降低了 500 m 高度以下风向的偏差, 模式最低层高度上的平均绝对误差和均方根误差分别由 36.6° 和 55.9° 降低为 28.7° 和 40.4°。从温度检验结果(图 2c)

来看, SURF-MESO 的绝对误差总体在 1.2—1.3°C, 均方根误差在 1.5—1.9°C。而 SURF-4DVar 使 1.5 km 高度以下的偏差都有所减小, 模式最低层高度上的绝对误差和均方根误差分别降低为 0.9 和 1.1°C。以上的统计检验结果表明, VDRAS 的地面资料同化相对于融合方法能够更好反映强对流天气过程低层大气三维热动力的精细结构和快速变化。需要指出的是, 对于风廓线和微波辐射计等特种观测

设备, 会受大气不均匀、强烈垂直运动和强降水的负面影响, 有一定的观测误差, 同时 VDRAS 对强对流的动力和热动力特征的模拟分析也有一定的误差, 但总体而言, 这些差异均在可允许的范围内, 而且对于试验前、后结果的定量检验具有参考意义。

#### 4.2 地面温度和风的分析场和预报场定量检验结果

表 4 给出了强对流天气过程中, 模拟区域内地面自动气象站的观测与地面资料同化和融合的分析场检验。由于两组试验中已经在 VDRAS 中使用了地面观测资料, 因此是非独立观测的检验。但本研究是对比分析两个试验的结果差异, 因此该检验分析是合理的。不同对流个例的地面 10 m 风速偏差存在差异, 但总体上在合理的范围内, SURF-MESO 的地面风速偏差和均方根误差平均分别为 0.3 和 1.5 m/s, 而 SURF-4DVar 分别降低到 0.2 和 1.3 m/s。同样, SURF-4DVar 的风向偏差和均方根误差平均值也由  $-3.2^\circ$  和  $63.1^\circ$  降低到  $-1.3^\circ$  和  $52.3^\circ$ , 明显提高了区域地面风向的分析能力。从地面 2 m 气温检验结果来看, 大部分个例的偏差不大, 而 SURF-4DVar 可将偏差进一步缩小。总体上, 地面资料同化对于强对流过程的低层热、动力场有一定的改善, 能更好反映地面温度和风场的中小尺度信息。

此外, 分别对两组试验的每个分析循环都开启了 1 h 的临近预报。区域内地面自动气象站的观测

分别与地面资料同化和融合的预报场检验如表 5 所示。从预报的均方根误差来看, 对未来预报的影响随着预报时效的延长, 地面变量的均方根误差不断增大。当预报时效  $t=30$  min 时, SURF-MESO 的  $U/V$  分量均方根误差分别为 1.43 和 1.37 m/s, 温度的均方根误差为  $1.15^\circ\text{C}$ ; SURF-4DVar 的均方根误差分别为 1.29 m/s、1.24 m/s 和  $1.10^\circ\text{C}$ 。可见 SURF-4DVar 在一定程度上能提高 30 min 内地面气象要素的预报效果。 $t=60$  min 时, SURF-MESO 的  $U/V$  分量均方根误差分别为 1.59 和 1.54 m/s, 温度的均方根误差为  $1.37^\circ\text{C}$ ; SURF-4DVar 分别为 1.56、1.52 m/s 和  $1.35^\circ\text{C}$ , 此时, SURF-4DVar 对地面温度和风场的预报有改善, 但改善作用在减小。

## 5 个例分析和机理研究

### 5.1 个例概述

2019 年 5 月 17 日午后开始, 北京各地陆续遭遇降雨和强对流天气, 局地雨势猛烈并伴有冰雹。由 00 时高空和地面天气形势(图略)可以发现, 京津冀地区为暖中心, 气压东高西低, 无明显冷空气特征, 但大气处于极不稳定的层结状态。由 05 时京津冀地面自动站的温度和风场观测(图略)发现, 京津冀地区的西南风在午后转为东南海风且不断加强, 海风锋由天津向北京推进, 带来海边湿冷的空气; 北京南部为暖中心, 且北京城区可观测到明显的风场辐合。图 3 的雷达反射率因子和地面自动

表 4 强对流个例的地面 10 m 风和 2 m 温度的分析场检验  
Table 4 Verification of 10 m wind and 2 m temperature analysis fields for convection cases

个例	风速均方根 误差(m/s)		风速平均 偏差(m/s)		风向均方根 误差( $^\circ$ )		风向平均 偏差( $^\circ$ )		温度均方根 误差( $^\circ\text{C}$ )		温度平均 偏差( $^\circ\text{C}$ )	
	SURF-4DVar	SURF-MESO	SURF-4DVar	SURF-MESO	SURF-4DVar	SURF-MESO	SURF-4DVar	SURF-MESO	SURF-4DVar	SURF-MESO	SURF-4DVar	SURF-MESO
1	1.62	1.94	0.38	0.59	48.28	60.8	-1.35	-3.78	0.91	1.08	-0.1	-0.24
2	1.67	1.87	0.45	0.45	46.92	60.73	-3.53	-12.77	1.22	1.35	-0.11	-0.20
3	1.1	1.25	0.14	0.25	50.04	62.96	-3.27	0.73	0.96	1.01	-0.08	-0.1
4	0.75	0.82	0	0.02	61.49	72.05	0.58	-2.77	1.47	1.49	0	-0.06
5	0.85	0.92	-0.08	-0.18	63.68	70.83	-0.99	0.87	0.90	0.94	-0.05	-0.09
6	1.67	1.92	0.31	0.41	46.43	57.56	-0.26	-3.14	1.10	1.27	-0.08	-0.17
7	1.2	1.46	0.2	0.32	57.14	67.95	-3.07	-4.23	0.83	0.94	-0.09	-0.21
8	2.04	2.42	0.57	0.86	39.43	53.66	0.38	-3.32	1	1.21	-0.11	-0.27
9	1.12	1.21	0.25	0.33	56.22	63.12	-0.25	-0.35	0.83	0.87	-0.07	-0.12
10	1.29	1.43	0.06	-0.04	53.44	61.45	-0.89	-2.96	1.21	1.32	-0.04	-0.07
平均	1.33	1.52	0.23	0.30	52.31	63.11	-1.26	-3.17	1.04	1.15	-0.07	-0.15



表 5 地面 2 m 温度和 10 m 风场的预报场客观检验  
Table 5 Verification of 2 m temperature and 10 m wind forecasts

时间	U风平均 偏差(m/s)		U风均方根 误差(m/s)		V风平均 偏差(m/s)		V风均方根 误差(m/s)		温度平均 偏差(°C)		温度均方根 误差(°C)	
	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO	SURF- 4DVar	SURF- MESO
t=15 min	-0.18	-0.11	1.08	1.32	0.09	-0.04	1.05	1.29	-0.05	-0.12	1.06	1.14
t=30 min	-0.19	-0.14	1.29	1.43	0.02	-0.09	1.24	1.37	-0.01	-0.06	1.10	1.15
t=45 min	-0.17	-0.13	1.45	1.52	-0.04	-0.12	1.39	1.47	0.04	0.01	1.22	1.24
t=60 min	-0.12	-0.11	1.56	1.59	-0.06	-0.12	1.52	1.54	0.11	0.09	1.35	1.37

站的观测显示, 08时10分的北京城区呈偏西风, 温度较高, 而北京通州以东为东南风带来的湿冷空气, 共同导致地面有明显的风场辐合。随后东南风增强、冷暖温度梯度也增大, 此区域形成的热动力不稳定条件有利于触发局地对流型天气, 从08时30分雷达回波来看, 北京通州以东地区开始有对流单体的新生(图3c)。到10时30分对流单体不断发展加强, 图3f可见对流增强时地面较强的冷池和明显的风场出流。此次北京地区的局地强对流的新生和加强可能受到多个流场的影响。其中, 城市的暖中心有利于边界层中上升运动的形成, 而海风锋辐合线和出流边界会进一步导致动力不稳定。

## 5.2 结果验证

对每个同化分析循环中不同变量的关键指标进行统计检验, 以评估地面资料同化的影响。图4为SURF-MESO和SURF-4DVar在分析循环中, 雷达径向速度和雨水混合比的Innov(观测与背景场)、Resi(观测与分析场)残差的均方根误差(RMSE)和平均偏差(BIAS)变化。这些指标已广泛应用于数据同化的研究中(Fierro, et al, 2019; Xiao, et al, 2021)。整个过程中, SURF-MESO和SURF-4DVar雷达径向速度Resi的均方根误差均小于Innov, 表明了同化后的分析场更接近于雷达径向速度的观测(图4a、b)。但增加了地面资料同化后(图4b), 雷达径向速度Resi的均方根误差低于2.0 m/s, 尤其是降低了对流系统发展加强阶段的均方根误差, 反映了地面资料同化对雷达径向速度的同化有正的影响。SURF-MESO和SURF-4DVar的雨水混合比Innov和Resi的均方根误差(以及平均偏差)没有明显差异, 并且都与观测非常接近, 低于 $0.5 \times 10^{-3}$  g/kg ( $-0.1 \times 10^{-3}$  g/kg), 反映了地面资料同化并没有显著影响雨水混合比的同化。

由于只有雷达观测和地面资料同时同化的试

验(SURF-4DVar)可以对比地面要素同化前后指标的变化, 由图5a可以看到地面U风、V风和气温Resi的均方根误差均小于Innov, 分别降低了约65%、64%和45%, 表明模式在同化分析循环中合理地吸收了地面资料, 而且相对于同化前的背景场, 同时同化雷达观测和地面资料后的分析场更接近于地面观测。地面U风、V风和气温Innov的偏差均为负值, 表明总体上背景场的值大于观测, 而同化后Resi的偏差接近于0, 与均方根的统计一致。

图6、7分别给出2019年5月17日08时30分和10时30分地面自动气象站观测、SURF-MESO和SURF-4DVar的近地面温度和风的分析场, 所选时间分别为对流系统新生和发展加强的阶段。从地面自动气象站观测的08时30分近地面温度和风场(图6a)可见, 北京城区的偏西风和北京通州以东的东南风导致地面有明显的风场辐合, 同时也对应地面冷暖温度的交界。将SURF-MESO(图6b)和SURF-4DVar(图6c)分别与自动气象站观测对比发现, SURF-4DVar的结果与自动气象站的实际观测更为一致, 可以更好反映对流触发时北京暖中心产生的温度梯度分布, 以及东南海风导致的冷暖温度分布, 而SURF-MESO未能准确模拟出东南海风西进导致的温度下降。SURF-4DVar(图7c)也较好显示了海风锋向北京移动与城区辐合线相遇的流场特征, 以及东南海风较大风速的空间分布。将该时刻区域内地面自动气象站的观测与两组试验的分析场定量检验得到, SURF-MESO的地面风速和风向均方根误差分别是2.3 m/s和42.2°, 温度的均方根误差为1.0°C; SURF-4DVar使以上均方根误差分别降低为2.0 m/s、39.3°和0.9°C。从10时30分观测的近地面温度和风场(图6d)可知, 此时对流单体逐渐发展增强, 北京通州地区的冷池强度较强, 前方有明显的风场出流, 但阵风锋前方的温

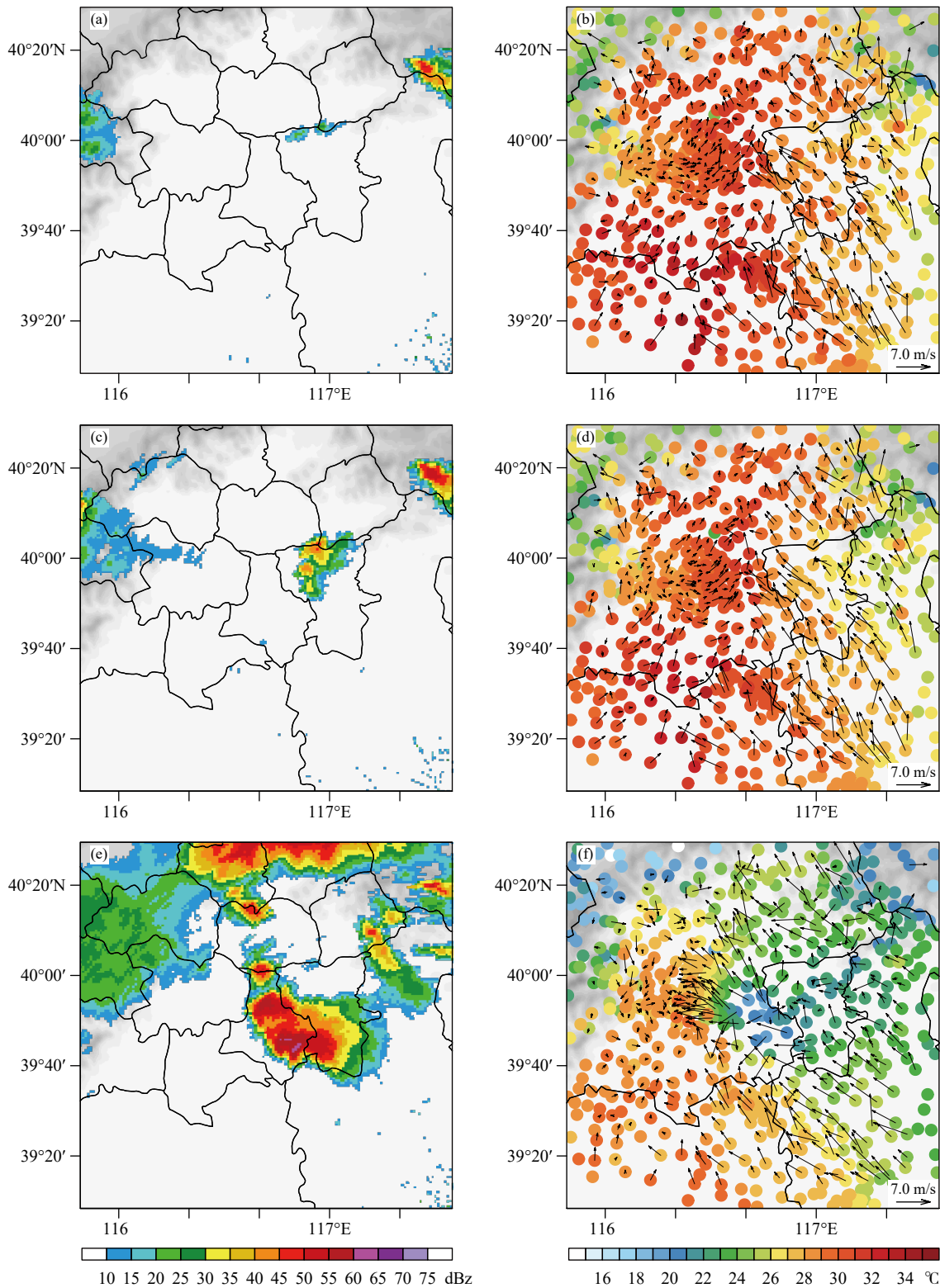


图3 2019年5月17日(a、c、e)北京雷达最低仰角(0.5°)观测的反射率因子(色阶,单位:dBz)、(b、d、f)区域内所有地面自动站观测的温度(色阶,单位:°C)和风场(风矢)(a、b.08时10分,c、d.08时30分,e、f.10时30分)

Fig. 3 Beijing radar reflectivity (shaded, unit: dBz) at the lowest elevation angle (0.5°) (a, c, e), and AWS surface temperature (shaded, unit: °C) and wind vectors (arrow) in the domain (b, d, f) on 17 May 2019 (a, b. 08: 10 UTC; c, d. 08: 30 UTC; e, f. 10: 30 UTC)

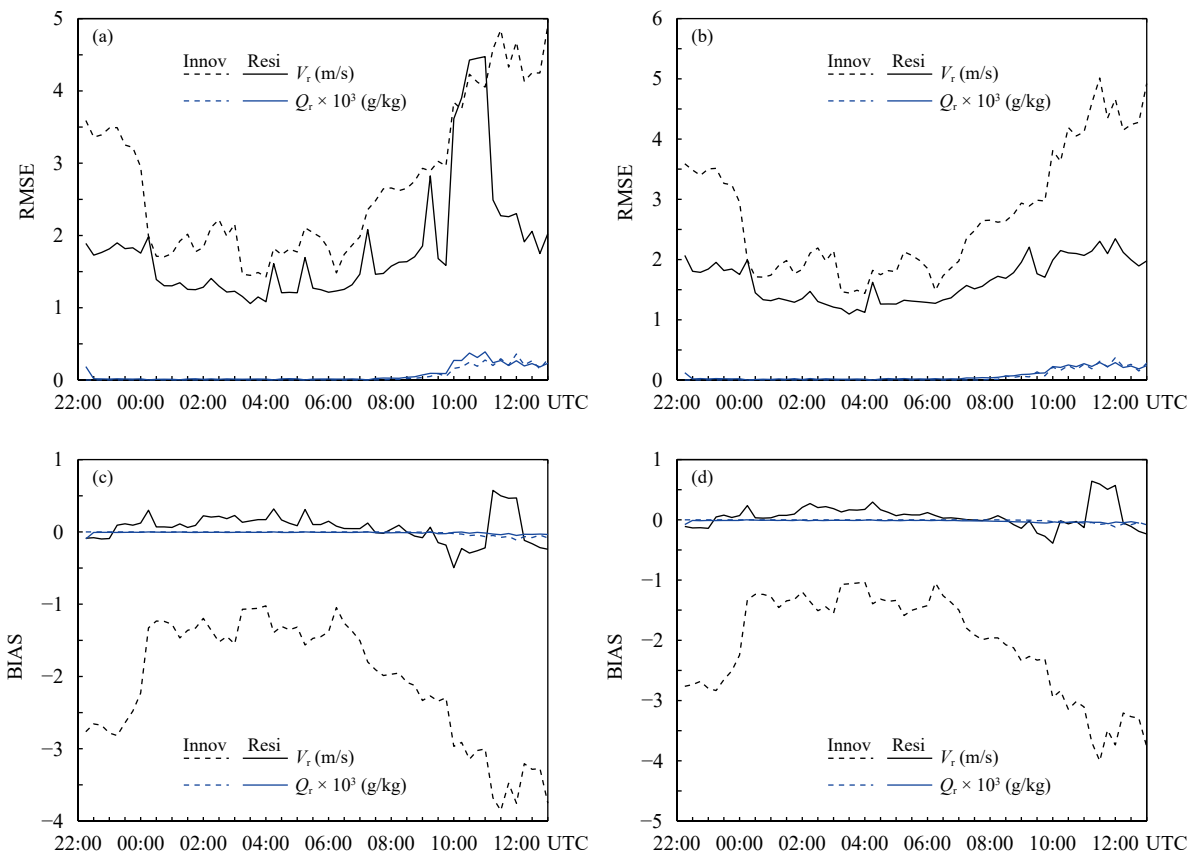


图4 SURF-MESO (a, c) 与 SURF-4DVar (b, d) 在同化分析循环中雷达径向速度 (单位: m/s, 黑色) 和雨水混合比 (单位: g/kg, 蓝色) 的观测与背景场 (Innov, 虚线)、观测与分析场 (Resi, 实线) 残差的均方根误差 (a, b) 以及平均偏差 (c, d) 统计

Fig. 4 RMSE(a, b) and BIAS(c, d) for innovation (observations minus background; Innov, dotted) and analysis residual (observations minus analysis; Resi, solid) for radial velocity (unit: m/s, black) and rain water mixing ratio (unit: g/kg, blue) with respect to analysis/forecast cycle for (a, c) SURF-MESO and (b, d) SURF-4DVar

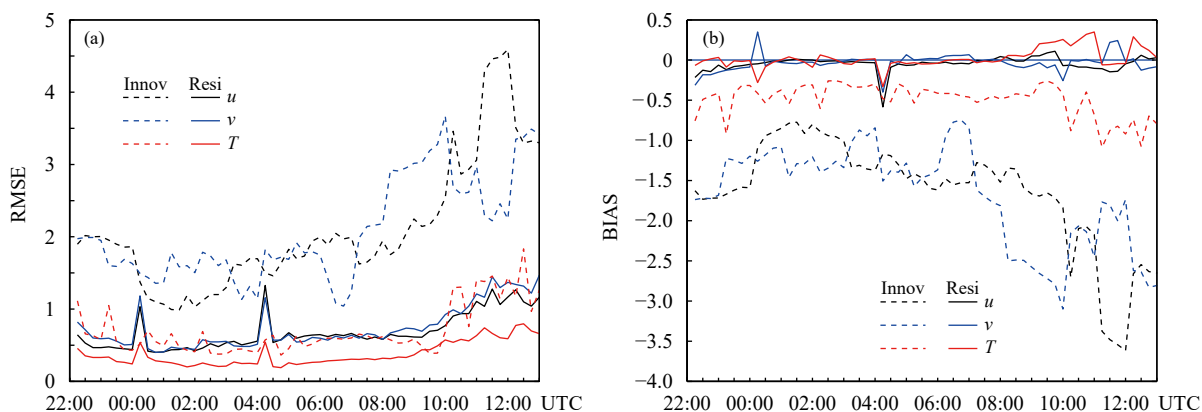


图5 SURF-4DVar 在同化分析循环中地面 U 风 (单位: m/s, 黑色)、V 风 (单位: m/s, 蓝色) 和气温 (单位: °C, 红色) 的观测与背景场 (Innov, 虚线)、观测与分析场 (Resi, 实线) 残差的均方根误差 (a) 和平均偏差 (b) 统计

Fig. 5 RMSE(a) and BIAS (b) for innovation (observations minus background; Innov, dotted) and analysis residual (observations minus analysis; Resi, solid) for surface U wind (unit: m/s, black), surface V wind (unit: m/s, blue) and surface air temperature (unit: °C, red) with respect to analysis/forecast cycle for SURF-4DVar

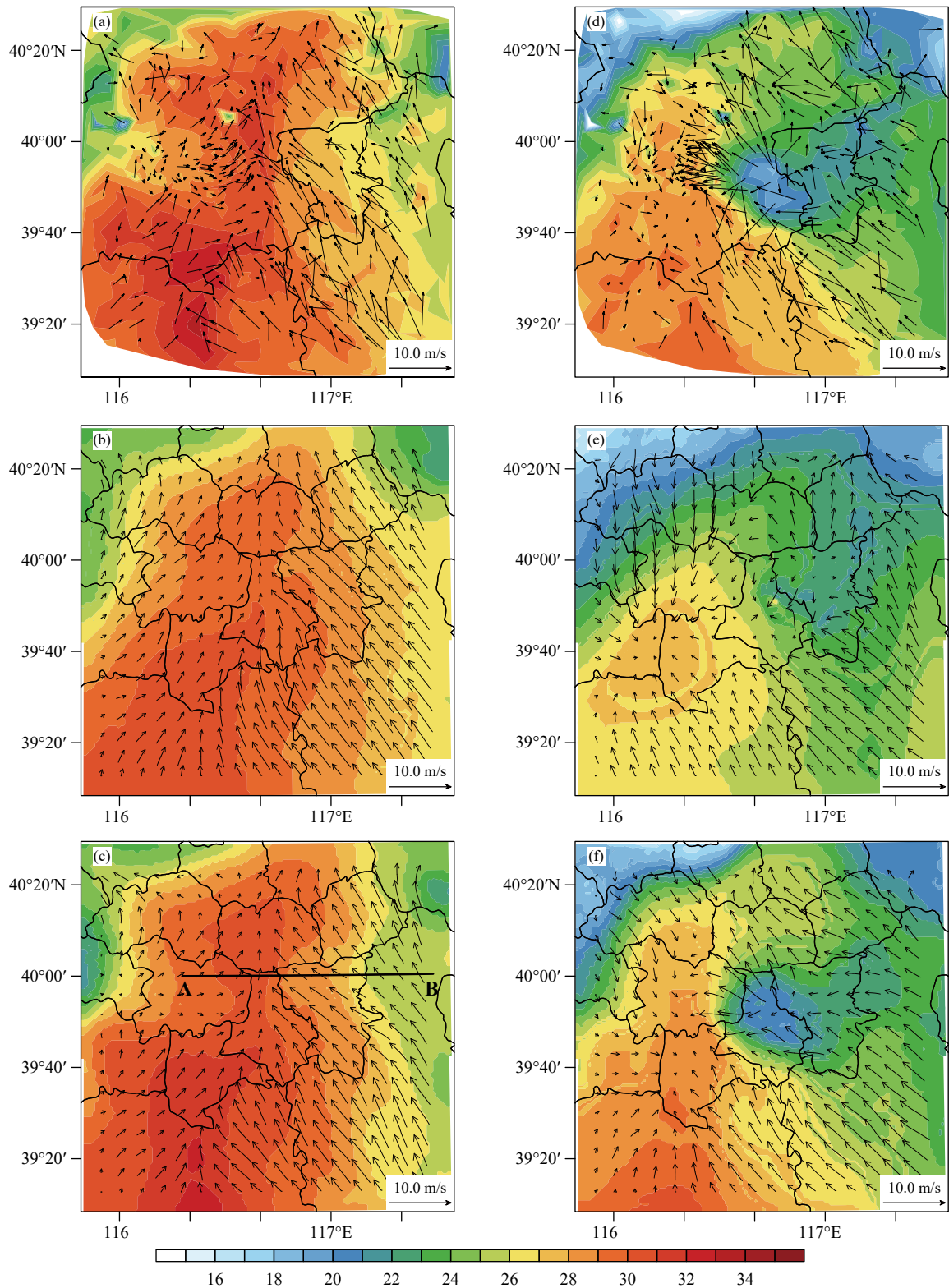


图 6 2019 年 5 月 17 日 08 时 30 分 (a—c) 和 10 时 30 分 (d—f) 的近地面温度 (色阶, 单位: °C) 和风场的分析场 (a, d, 地面自动气象站观测, b, e, SURF-MESO, c, f, SURF-4DVar; 黑色直线 AB 对应图 13 的垂直剖面位置)

Fig. 6 Surface temperature (shaded, unit: °C) and wind vectors (arrows) at 08:30 UTC (a—c) and 10:30 UTC (d—f) 17 May 2019 from (a, d) AWS observations, (b, e) SURF-MESO and (c, f) SURF-4DVar (the black line AB indicates the location of vertical cross section shown in Fig. 13)

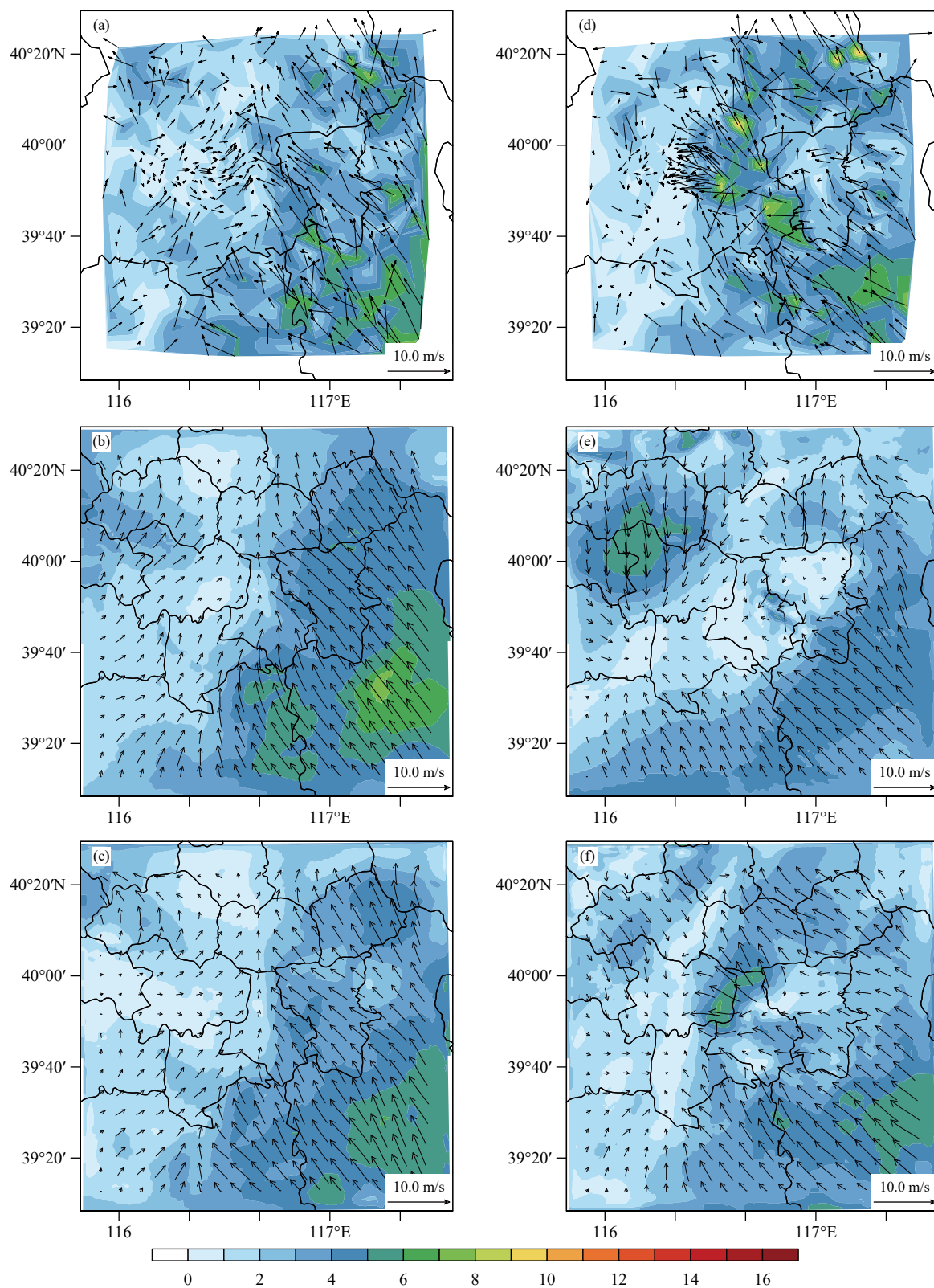


图7 2019年5月17日08时30分(a—c)和10时30分(d—f)的近地面风速大小(色阶,单位:m/s)和风场的分析场  
(a, d. 地面自动气象站观测, b, e. SURF-MESO, c, f. SURF-4DVar)

Fig. 7 Surface wind speed (shaded, unit: m/s) and wind vectors (arrow) at 08: 30 UTC (a—c) and 10: 30 UTC (d—f) 17 May 2019 from (a, d) AWS observations, (b, e) SURF-MESO and (c, f) SURF-4DVar

度仍较高。对比模式分析场发现, SURF-4DVar (图 6f) 的近地面温度和风场更接近实际观测, 尤其是对流单体的冷池强度和前方的暖空气强度, 而 SURF-MESO (图 6e) 使该冷、暖强度均偏弱。此外, SURF-4DVar 的冷池范围、风场出流和阵风锋位置也与自动气象站观测相近, 且能较好反映近地面风速大小的空间分布 (图 7f)。总体上, SURF-4DVar 使区域内地面风场和温度的均方根误差分别降低了 0.9 m/s、16.7°和 0.3℃。由以上分析可

知, 相对于地面资料融合, 地面观测与雷达观测资料的“同时同化”可以明显提高 VDRAS 对近地面气象要素的分析能力, 尤其是在近地面温度和风场快速变化时。

为了定量比较两组试验分析场的结果, 通过选取对流系统经过的 54511 地面自动观测站对长时间序列的模式分析场进行定量统计。54511 站位于北京大兴区的最北边, 记录了对流系统发展至该区域导致的气象要素变化。图 8a 的地面 2 m 气温观

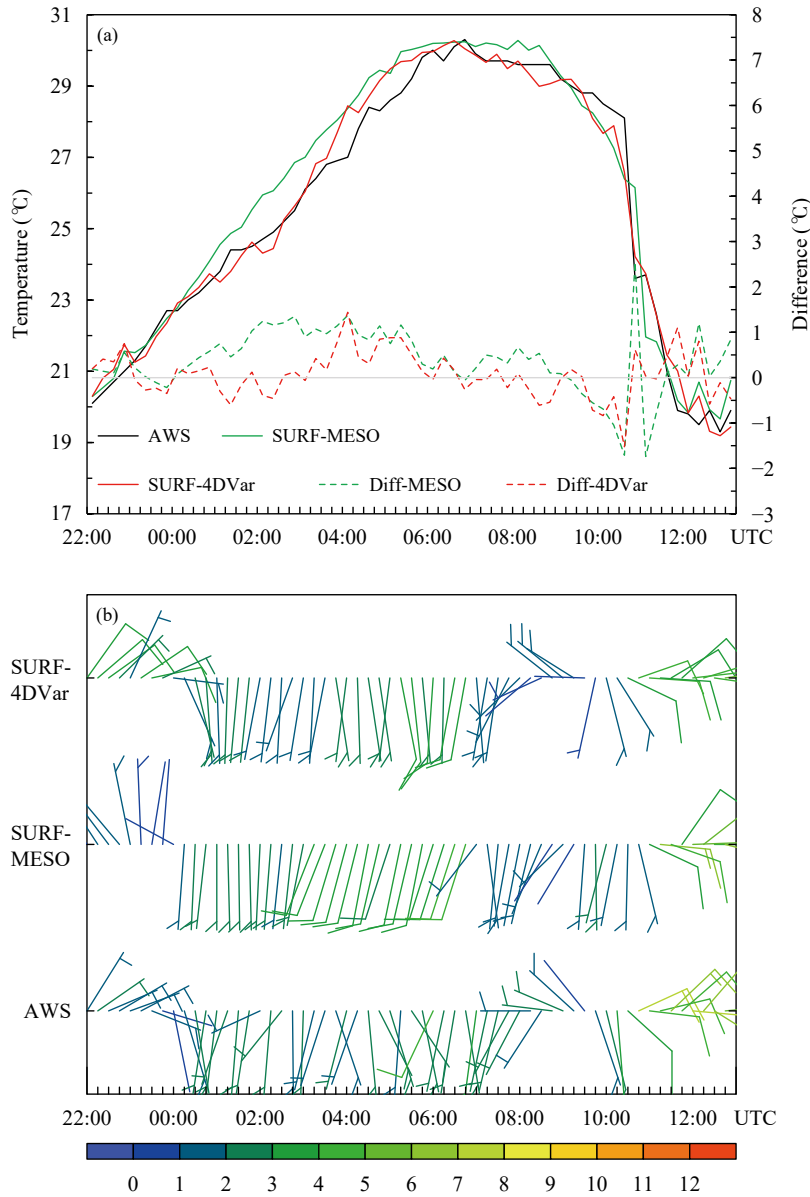


图 8 2019 年 5 月 17 日 54511 地面自动气象站观测和分析场 (a) 近地面温度 (左纵轴) 及与观测的温度差 (右纵轴) 时间序列 (单位: °C)、(b) 风场的时间序列 (全风羽代表 4 m/s)

Fig. 8 (a) Time series of observed and analyzed surface temperature (left Y-axis) and the difference (right Y-axis) between the observations and analysis (unit: °C), and (b) analyzed wind field (full barb = 4 m/s) at AWS 54511 on 17 May 2019

测(AWS)显示,对流单体触发前(16日22时—17日08时30分)近地面温度表现为明显的日变化,到07时温度升高到30.3℃,之后一直保持较高的温度。随着对流单体的触发和发展加强,10时30分温度开始急剧下降(幅度8.2℃),之后保持较低温度(19.5℃)。两组试验的结果对比显示,SURF-4DVar在对流单体触发前的地面2 m气温与实际观测更为接近,而且当对流单体增强时,虽然试验都显示近地面温度有下降的趋势,但SURF-4DVar的温度下降幅度(8.4℃)和下降时间都更为接近观测(SURF-MESO的温度下降幅度为7.7℃)。总体上,SURF-4DVar使温度的均方根误差和平均绝对误差均降低0.3℃。从近地面风场的对比(图8b)可以看出,SURF-MESO在08—10时维持

一致偏南风,风速基本不变,并未反映该时段实际风场的变化情况,而SURF-4DVar与观测的一致性较好,其与观测均显示08—09时由偏南风转为偏西(西北)风,10时逐渐转为偏东南风,到12时偏东风明显加强。总体上,SURF-4DVar使地面10 m风速的均方根误差降低0.3 m/s,风向的均方根误差降低23.4°。可见,SURF-4DVar能够更细致地反映近地面温度和风场的变化特征。

选取观象台的风廓线雷达和秒级探空仪的垂直廓线观测数据进行对比验证,从00时和12时3.0 km高度以下的观测和分析场垂直廓线(图9)可以发现,SURF-MESO和SURF-4DVar都能较好反映00时低层大气的温度和风场变化,两组试验的分析结果差异较小,低层为西南风;在对流系统加

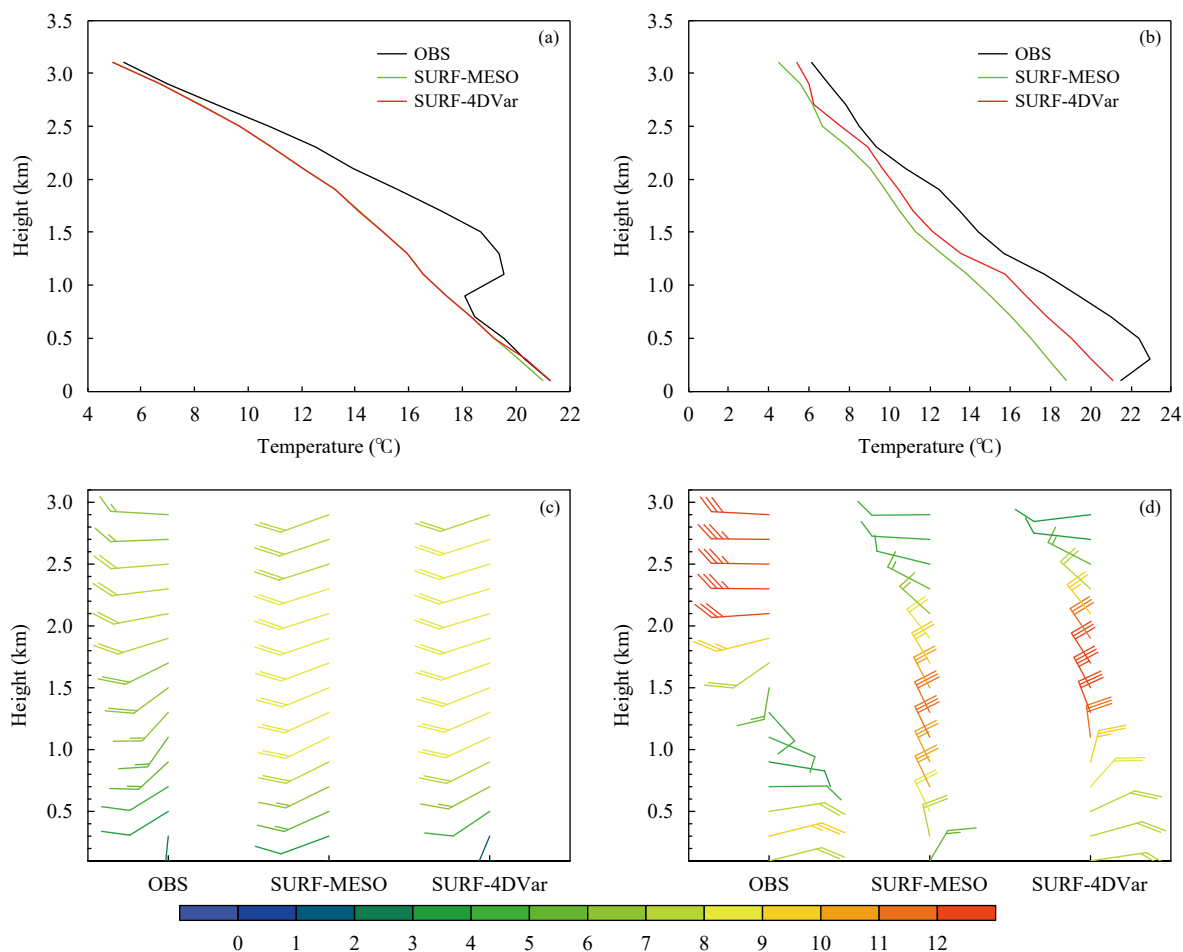


图9 2019年5月17日00时(a、c)和12时(b、d)的54511探空观测和分析场温度(a、b,单位:℃)、风场(c、d)的廓线(全风羽代表4 m/s)

Fig. 9 Vertical profiles of 54511 sounding observations and analyzed temperature (a, b; unit: °C) and wind field (c, d) at 00:00 UTC (a, c) and 12:00 UTC (b, d; full barb = 4 m/s) 17 May 2019

强后(12时), SURF-4DVar对1.5 km高度以下温度垂直廓线的分析能力明显提高,与实际观测廓线更为接近(图9b)。此外, SURF-4DVar的风场廓线也有所提高,1 km高度以下的风速和风向都与实际观测最为接近,为明显的偏东风,风速约为8 m/s。

利用北京雷达观测的径向速度( $V_r$ )对区域内VDRAS的风场进行均方根误差统计(图10)可见, SURF-4DVar使对流发展前后径向速度最低6个仰角的平均均方根误差明显降低,最低仰角的平均均方根误差缩小了0.5 m/s。由图10b可见,对流触发前SURF-MESO和SURF-4DVar最低仰角的均方根误差均接近1 m/s,当对流发展增强时SURF-MESO的均方根误差明显增加到6 m/s,而SURF-4DVar的均方根误差基本为2 m/s左右,显示了SURF-4DVar的风场更接近雷达观测的径向速度。

以上结果表明,地面观测与雷达观测资料的“同时同化”不仅可以改善VDRAS的近地面气象要素,还可以提高大气低层三维气象场的分析能力,通过对大气低层热动力特征更细致准确的描述,进一步影响大气层结的不稳定性和对流的发生、发展。

图11、12分别对比了雷达和地面观测与SURF-MESO和SURF-4DVar在09时起报30 min(即09时30分)和1 h(即10时)临近预报的组合反射率因子、近地面温度和水平风场。总体上, SURF-

4DVar预报的近地面温度和风场与实际观测更为接近,其分布特征都有利于对流的发展加强。与观测对比发现, SURF-MESO可以预报30 min后北京通州地区的对流单体回波,但位置整体偏东北,而且1 h预报的对流逐渐减弱消散; SURF-4DVar对30 min预报的对流单体强度和位置都与实际观测更接近(图11c),而且1 h预报的对流仍在发展加强。因此,地面资料同化还可以通过改善低层气象要素的预报,进一步提升VDRAS对局地强对流发展的临近预报能力。

### 5.3 对流单体局地触发的机理分析

上述分析反映了地面资料同化方法可以更好反映VDRAS系统的大气低层三维气象要素分析场,在此基础上进一步探究对流单体局地触发的机理。

图13给出地面资料同化的分析结果沿图6c中直线AB的垂直剖面。由08—09时依次间隔半小时的扰动温度、垂直风速、水汽混合比叠加组合反射率因子和风场的垂直剖面可以看出,08时北京城区和通州交界附近地区的扰动温度(0.6—1.2℃)明显高于周边,且低层风场有辐合抬升,3 km以下的垂直上升速度约为0.4 m/s;北京以东有沿海地区带来的湿冷偏东气流,2 km以下的水汽含量较高,其前沿有弱抬升,与扰动温度低值区(-2.4℃)相对应(图13a、d、g)。08时30分随着海风锋不断向北京

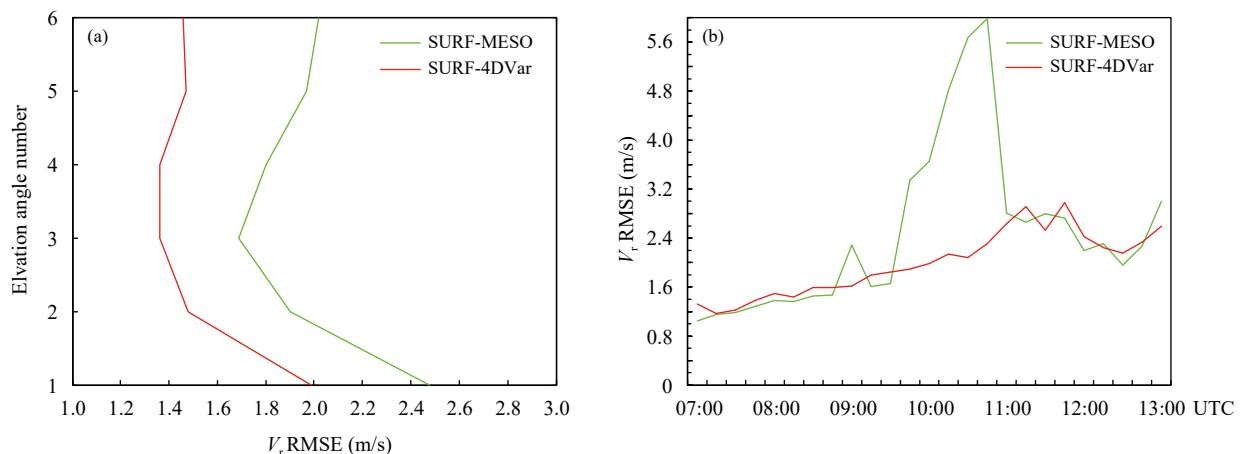


图10 2019年5月17日VDRAS分析场和雷达观测(a)最低6个仰角平均的径向速度均方根误差和(b)雷达最低仰角径向速度均方根误差的时间序列

Fig. 10 (a) Root mean square error (RMSE) of radial velocity ( $V_r$ ) between VDRAS analysis and observations at the lowest six elevation angles and (b) RMSE variation of VDRAS analyzed radial velocity verified at the lowest elevation angle from 07:00 UTC to 13:00 UTC 17 May 2019



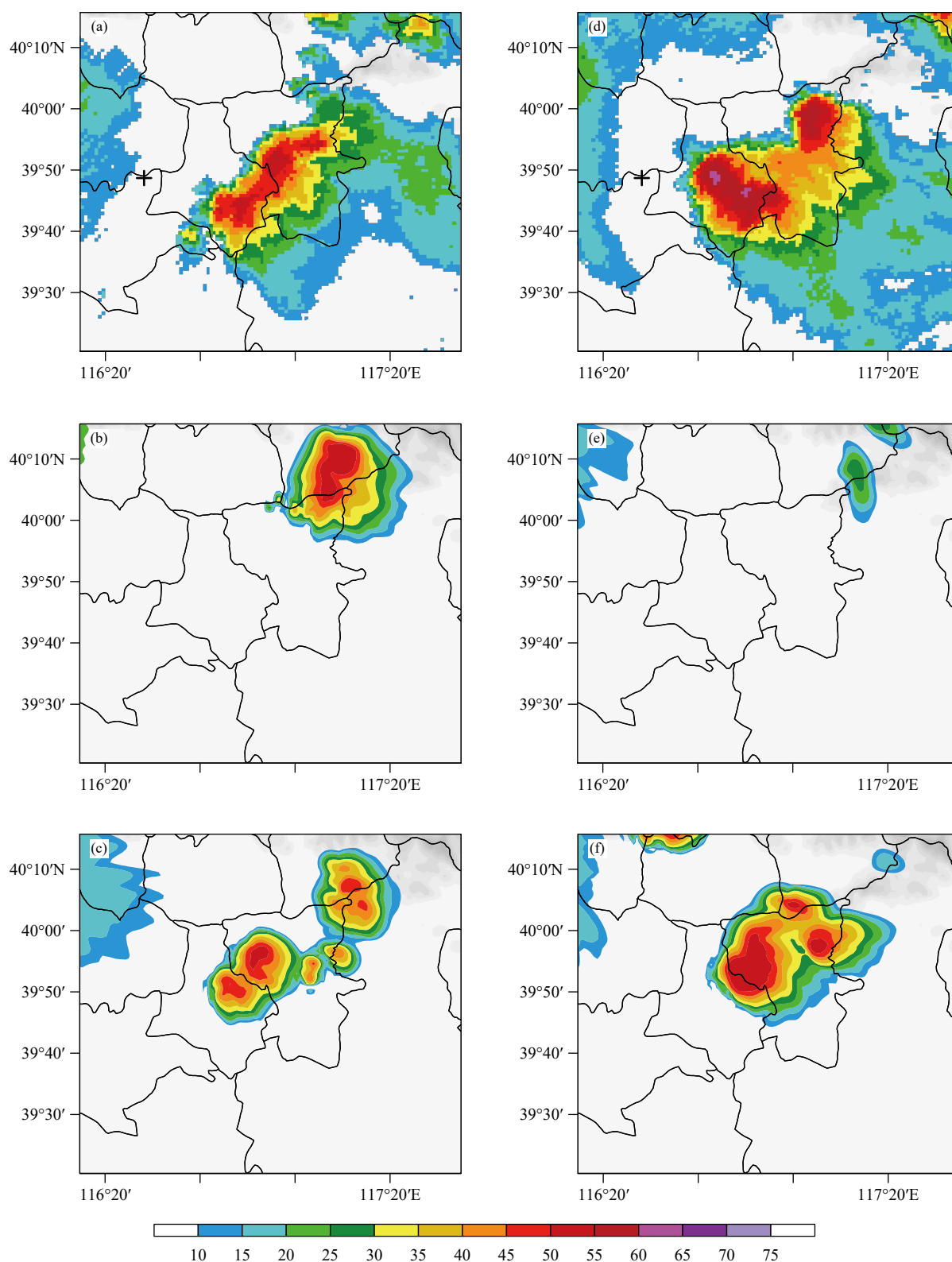


图 11 2019 年 5 月 17 日 09 时起报的 30 min (b, c) 和 1 h (e, f) 组合反射率因子 (色阶, 单位: dBz) 预报和雷达观测 (a, d)(a. 09 时 30 分, d. 10 时, b, e. SURF-MESO, c, f. SURF-4DVar)

Fig. 11 Composite radar reflectivity (color shaded, unit: dBz) for the 30 min (b, c) and 1 h (d, e) forecasts initialized from 09: 00 UTC on 17 May 2019 and for radar observation (a, d)(a. 09: 30 UTC, d. 10: 00 UTC; b, e. SURF-MESO; c, f. SURF-4DVar)

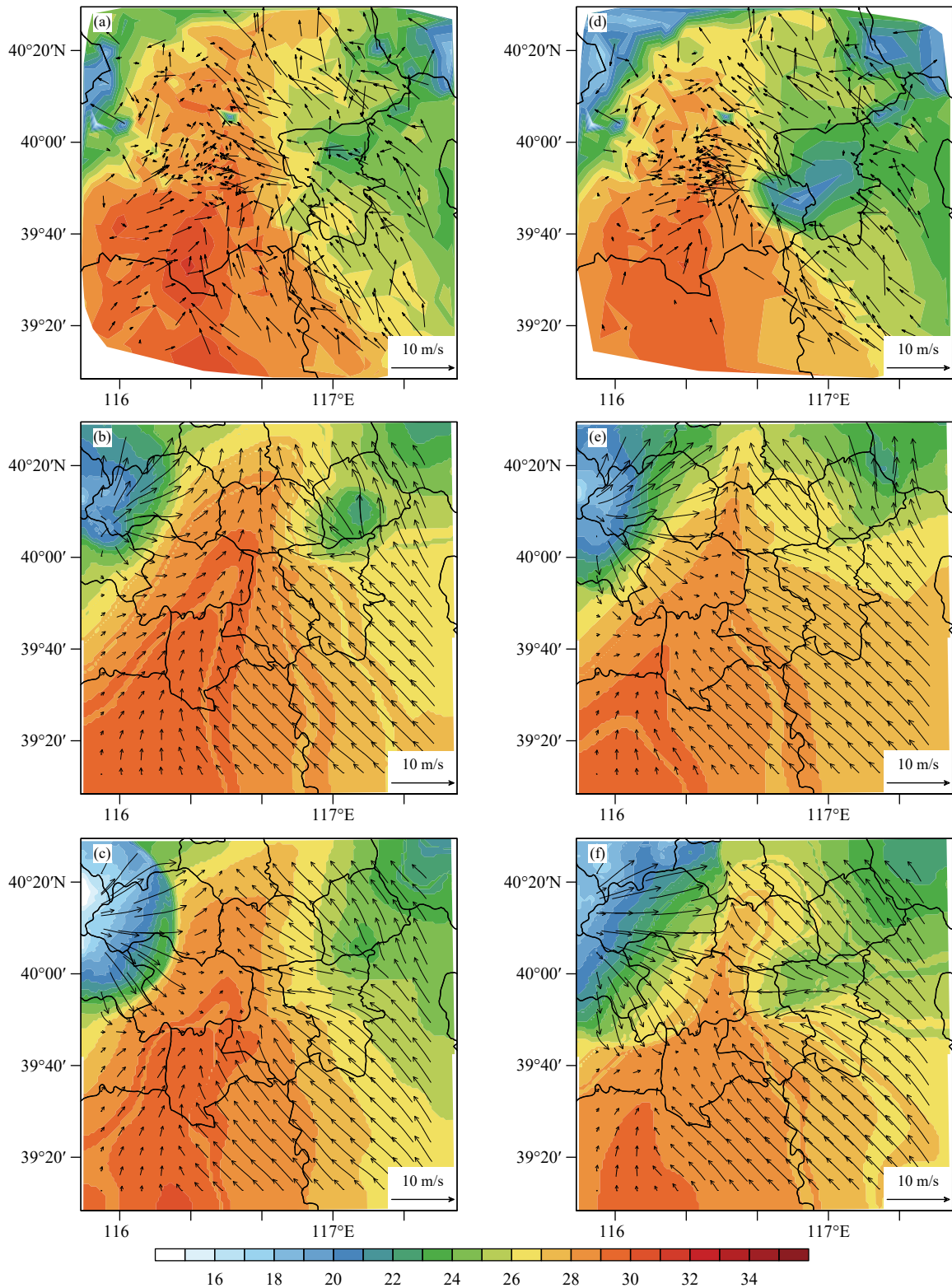


图 12 2019 年 5 月 17 日 09 时起报的 30 min (b、c) 和 1 h (e、f) 温度 (色阶, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ) 和风场预报 (风矢) 及地面自动气象站观测 (a、d) (a. 09 时 30 分, d. 10 时, b、e. SURF-MESO; c、f. SURF-4DVar)

Fig. 12 Surface temperature (shaded, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) and wind vectors (arrow) for 30 min (b, c) and 1 h (e, f) forecasts initialized from 09:00 UTC on 17 May 2019 and for AWS observation (a, d) (a. 09:30 UTC, d. 10:00 UTC; b, e. SURF-MESO; c, f. SURF-4DVar)

市推进, 偏东海风自身的抬升气流与暖区产生的辐合上升气流逐渐靠近, 导致垂直上升速度进一步增大(1.0 m/s), 触发对流的再生(图 13b、e、h)。09 时, 冷暖温度仍对峙, 携带水汽和上升速度的偏东海风与对流单体碰并, 对流强度进一步增强。垂直上升速度加大到 6.0 m/s, 水汽含量明显增加到 13—14 g/kg, 低层冷池强度增强。可见, 海风锋辐合线与城市暖区的相互作用一定程度上影响了北

京地区局地对流的新生和发展, 与其可提供有利的水汽和热动力不稳定条件相关。这也进一步表明, 地面观测资料同化能够通过更细致准确分析低层大气的热动力特征, 进而对低层的气象要素甚至边界层辐合线的预报产生一定的正反馈作用, 一定程度上有助于提高 VDRAS 对北京地区局地对流回波的临近预报能力。

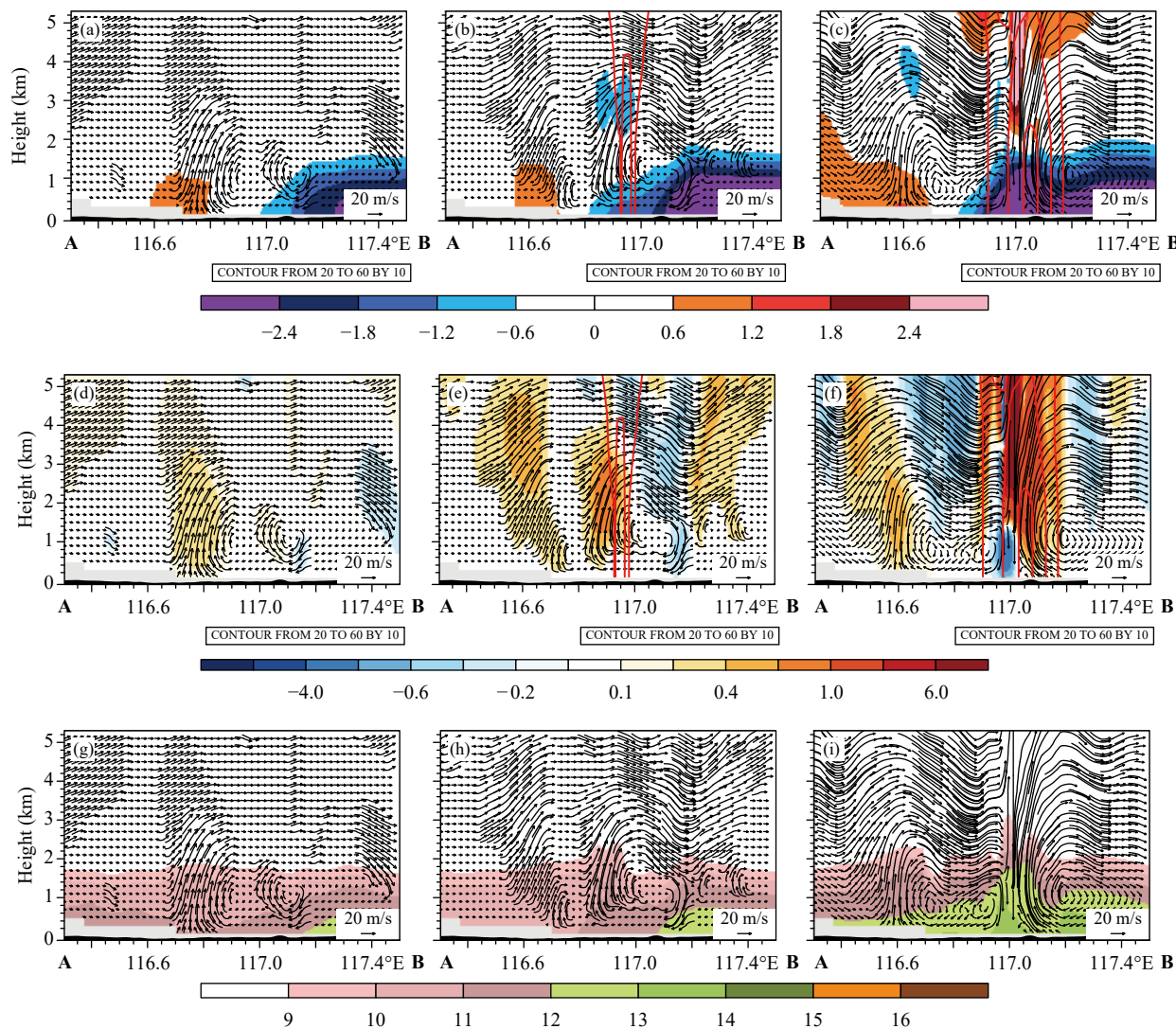


图 13 2019 年 5 月 17 日 08 时 (a、d、g)、08 时 30 分 (b、e、h) 和 09 时 (c、f、i) 的扰动温度 (a—c, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )、垂直速度 (d—f, 单位: m/s) 及水汽含量 (g—i, 单位: g/kg) 分析场叠加风场 (垂直速度扩大 100 倍) 和组合反射率因子 (等值线, dBz) 沿图 6 中所示直线 AB 的垂直剖面 (灰色阴影为地形)

Fig. 13 Vertical cross sections of low level temperature perturbation (a—c, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ), vertical velocity (d—f, unit: m/s) and water vapor content (g—i, unit: g/kg) with wind vectors (arrows, vertical velocity  $\times 100$ ) and composite radar reflectivity (red contour, unit: dBz) along crossline AB shown in Fig. 6 at 08: 00 UTC (a, d, g), 08: 30 UTC (b, e, h) and 09: 00 UTC (c, f, i) 17 May 2019 (the gray shaded areas denote the terrain across the section)

## 6 结论与讨论

本研究基于雷达资料快速更新四维变分同化(RR4DVar)技术和三维数值云模式发展的快速更新雷达四维变分分析系统(VDRAS),通过在系统中新加入地面自动气象站观测资料的同化方法,选取2017—2020年夏季发生在北京地区的10个强对流个例,对地面资料同化的结果进行了分析和检验评估。在此基础上,针对2019年5月17日强对流过程进一步开展了雷达资料和地面观测资料的“同时同化”对北京地区局地强对流新生和增强的模拟和预报研究。

利用风廓线雷达、地基微波辐射计和观象台秒级探空仪的垂直廓线观测数据以及区域内地面自动气象站的观测资料分别开展了强对流个例的三维温度和风的分析场定量检验,地面分析场和预报场的定量检验。研究表明,VDRAS系统的地面资料同化相对于融合方法可以更好地反映强对流天气过程中低层大气三维热力场的精细结构和快速变化,能更好地反映地面温度和风场的中小尺度信息,从而提高数值模式在低层热力和动力的分析和预报能力。总体上,边界层1 km高度以下的分析场改善最为明显,风速和风向的均方根误差分别平均降低0.1 m/s和7.2°,温度也有改善(均方根误差降低0.2°C)。模式最低层100 m高度的风速均方根误差降低0.5 m/s,风速的误差随高度逐渐增大。模式最低层风向的均方根误差降低15.5°,温度均方根误差降低0.4°C,1.5 km高度以下的温度偏差都减小。地面资料同化使区域内地面10 m风速和风向的均方根误差分别平均降低0.2 m/s和10.8°,地面2 m气温的偏差也进一步降低。从预报的平均误差来看,随着预报时效的延长,区域内地面温度和风场的误差不断增大,但地面资料同化在一定程度上可以提高1 h内地面气象要素的预报效果。

选取2019年5月17日北京地区局地强对流新生和增强的过程,对比分析低层热力特征,结果表明,相对于地面资料融合,地面观测与雷达观测资料的“同时同化”可以明显提高VDRAS低层大气的分析和预报能力。将该结果应用于对流单体局地触发机理分析时发现,海风锋辐合线与城市的相互作用一定程度上影响了北京地区局地对流的

新生和发展。海风锋辐合线充沛的水汽和辐合上升气流,加上城市暖中心的抬升作用,可提供有利的水汽和热力不稳定条件。地面资料同化可以通过更细致准确的分析低层大气三维的热动力特征,进而改善低层气象要素的预报,有助于提高北京地区局地突发强对流的临近数值预报能力。

## 参考文献

- 陈明轩,高峰,孔荣等. 2010. 自动临近预报系统及其在北京奥运期间的应用. *应用气象学报*, 21(4): 395-404. Chen M X, Gao F, Kong R, et al. 2010. Introduction of auto-nowcasting system for convective storm and its performance in Beijing Olympics meteorological service. *J Appl Meteor Sci*, 21(4): 395-404 (in Chinese)
- 陈明轩,王迎春,高峰等. 2011. 基于雷达资料4DVar的低层热力反演系统及其在北京奥运期间的初步应用分析. *气象学报*, 69(1): 64-78. Chen M X, Wang Y C, Gao F, et al. 2011. A low-level thermo-dynamical retrieval system based on the radar data 4DVar and a preliminary analysis of its applications in support of the Beijing 2008 Olympics. *Acta Meteor Sinica*, 69(1): 64-78 (in Chinese)
- 陈明轩,王迎春,肖现等. 2013. 北京“7.21”暴雨雨团的发生和传播机理. *气象学报*, 71(4): 569-592. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2013. Initiation and propagation mechanism for the Beijing extreme heavy rainstorm clusters on 21 July 2012. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 569-592 (in Chinese)
- 陈明轩,高峰,孙娟珍等. 2016. 基于VDRAS的快速更新雷达四维变分分析系统. *应用气象学报*, 27(3): 257-272. Chen M X, Gao F, Sun J Z, et al. 2016. An analysis system using rapid-updating 4-D variational radar data assimilation based on VDRAS. *J Appl Meteor Sci*, 27(3): 257-272 (in Chinese)
- 陈明轩,肖现,高峰. 2017. 出流边界对京津冀地区强对流局地新生及快速增强的动力效应. *大气科学*, 41(5): 897-917. Chen M X, Xiao X, Gao F. 2017. Dynamical effect of outflow boundary on localized initiation and rapid enhancement of severe convection over Beijing-Tianjin-Hebei region. *Chinese J Atmos Sci*, 41(5): 897-917 (in Chinese)
- 陈耀登,陈海琴,孙娟珍等. 2018. 雷达观测对应模式变量非线性特征及对四维变分同化的影响. *热带气象学报*, 34(6): 721-732. Chen Y D, Chen H Q, Sun J Z, et al. 2018. Nonlinear characteristics of model variables corresponding to radar observations and its effects on 4D-VAR assimilation. *J Trop Meteor*, 34(6): 721-732 (in Chinese)
- 李鹏,田景奎. 2011. 不同下垫面近地层风速廓线特征. *资源科学*, 33(10): 2005-2010. Li P, Tian J K. 2011. Characteristics of surface layer wind speed profiles over different underlying surfaces. *Resour Sci*, 33(10): 2005-2010 (in Chinese)
- 吕美仲,彭永清. 1990. 动力气象学教程. 北京: 气象出版社, 86-106. Lü M Z, Peng Y Q. 1990. *Dynamic Meteorology Course*. Beijing: China Meteorological Press, 86-106 (in Chinese)

- 冉令坤, 齐彦斌, 郝寿昌. 2014. “7.21”暴雨过程动力因子分析和预报研究. *大气科学*, 38(1): 83-100.
- Ran L K, Qi Y B, Hao S C. 2014. Analysis and forecasting of heavy rainfall case on 21 July 2012 with dynamical parameters. *Chinese J Atmos Sci*, 38(1): 83-100 (in Chinese)
- 孙继松, 何娜, 郭锐等. 2013. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制. *大气科学*, 37(1): 137-148.
- Sun J S, He N, Guo R, et al. 2013. The configuration change and train effect mechanism of multi-cell storms. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 137-148 (in Chinese)
- 王华, 孙继松. 2008. 下垫面物理过程在一次北京地区强冰雹天气中的作用. *气象*, 34(3): 16-21.
- Wang H, Sun J S. 2008. Effects of underlying surface physical process on a severe hail event occurred in Beijing area. *Meteor Mon*, 34(3): 16-21 (in Chinese)
- 王彦, 于莉莉, 李艳伟等. 2011. 边界层辐合线对强对流系统形成和发展的作用. *应用气象学报*, 22(6): 724-731.
- Wang Y, Yu L L, Li Y W, et al. 2011. The role of boundary layer convergence line in initiation of severe weather events. *J Appl Meteor Sci*, 22(6): 724-731 (in Chinese)
- 肖现, 陈明轩, 高峰等. 2015. 弱天气系统强迫下北京地区对流下山演变的热动力机制. *大气科学*, 39(1): 100-124.
- Xiao X, Chen M X, Gao F, et al. 2015. A thermodynamic mechanism analysis on enhancement or dissipation of convective systems from the mountains under weak synoptic forcing. *Chinese J Atmos Sci*, 39(1): 100-124 (in Chinese)
- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷等. 2007a. 复杂地形下地面观测资料同化 I: 模式地形与观测站地形高度差异对地面资料同化的影响研究. *大气科学*, 31(2): 222-232.
- Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007a. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part I: Influence of the elevation difference between model surface and observation site. *Chinese J Atmos Sci*, 31(2): 222-232 (in Chinese)
- 徐枝芳, 龚建东, 王建捷等. 2007b. 复杂地形下地面观测资料同化 II: 模式地形与观测站地形高度差异代表性误差. *大气科学*, 31(3): 449-458.
- Xu Z F, Gong J D, Wang J J, et al. 2007b. A study of assimilation of surface observational data in complex terrain. Part II: Representative error of the elevation difference between model surface and observation site. *Chinese J Atmos Sci*, 31(3): 449-458 (in Chinese)
- 张文龙, 崔晓鹏, 王迎春等. 2013. 对流层低层偏东风对北京局地暴雨的作用. *大气科学*, 37(4): 829-840.
- Zhang W L, Cui X P, Wang Y C, et al. 2013. Roles of low-level easterly winds in the local torrential rains of Beijing. *Chinese J Atmos Sci*, 37(4): 829-840 (in Chinese)
- 张鑫宇, 陈敏, 孙娟珍等. 2021. WRF-DA 中地面观测资料同化方案的改进与应用. *气象学报*, 79(1): 104-118.
- Zhang X Y, Chen M, Sun J Z, et al. 2021. Improvement and application of the ground observation data assimilation scheme in WRF-DA. *Acta Meteor Sinica*, 79(1): 104-118 (in Chinese)
- 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳等. 2014. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究. *高原气象*, 33(1): 261-269.
- Zheng Y Y, Zhang X C, Zhu H F, et al. 2014. Study of squall line genesis with northeast cold vortex. *Plateau Meteor*, 33(1): 261-269 (in Chinese)
- Atkins N T, Wakimoto R M, Weckwerth T M. 1995. Observations of the sea-breeze front during CaPE. Part II: Dual-Doppler and aircraft analysis. *Mon Wea Rev*, 123(4): 944-969
- Barnes S L. 1964. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J Appl Meteor*, 3: 396-409
- Chang S F, Liou Y C, Sun J Z, et al. 2016. The implementation of the ice-phase microphysical process into a four-dimensional Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) and its impact on parameter retrieval and quantitative precipitation nowcasting. *J Atmos Sci*, 73(3): 1015-1038
- Chen X C, Zhao K, Sun J Z, et al. 2016. Assimilating surface observations in a four-dimensional variational Doppler radar data assimilation system to improve the analysis and forecast of a squall line case. *Adv Atmos Sci*, 33(10): 1106-1119
- Dawson II D T, Xue M. 2006. Numerical forecasts of the 15–16 June 2002 Southern Plains mesoscale convective system: Impact of mesoscale data and cloud analysis. *Mon Wea Rev*, 134(6): 1607-1629
- Dong J L, Xue M, Droegemeier K. 2011. The analysis and impact of simulated high-resolution surface observations in addition to radar data for convective storms with an ensemble Kalman filter. *Meteor Atmos Phys*, 112(1-2): 41-61
- Fierro A O, Wang Y H, Gao J D, et al. 2019. Variational assimilation of radar data and GLM lightning-derived water vapor for the short-term forecasts of high-impact convective events. *Mon Wea Rev*, 147(11): 4045-4069
- Hou T J, Kong F Y, Chen X L, et al. 2013. Impact of 3DVAR data assimilation on the prediction of heavy rainfall over southern China. *Adv Meteor*, 2013: 129642
- Kaimal J C, Finnigan J J. 1994. Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. New York: Oxford University Press, 11-13
- Koch S E, Ray C A. 1997. Mesoanalysis of summertime convergence zones in central and eastern North Carolina. *Wea Forecast*, 12(1): 56-77
- Li H Q, Cui X P, Zhang D L. 2017a. Sensitivity of the initiation of an isolated thunderstorm over the Beijing metropolitan region to urbanization, terrain morphology and cold outflows. *Quart J Roy Meteor Soc*, 143(709): 3153-3164
- Li H Q, Cui X P, Zhang D L. 2017b. On the initiation of an isolated heavy-rain-producing storm near the central urban area of Beijing metropolitan region. *Mon Wea Rev*, 145(1): 181-197
- Lombardo K, Colle B A. 2013. Processes controlling the structure and longevity of two quasi-linear convective systems crossing the southern New England coast. *Mon Wea Rev*, 141(11): 3710-3734
- Markowski P, Richardson Y. 2010. Mesoscale Meteorology in Midlatitudes. Hoboken: Wiley-Blackwell, 183-188
- Marquis J, Richardson Y, Markowski P, et al. 2014. An investigation of the Goshen County, Wyoming, tornadic supercell of 5 June 2009 using EnKF assimilation of mobile mesonet and radar observations collected during VORTEX2. Part I: Experiment design and verification of the EnKF analyses. *Mon Wea Rev*, 142(2): 530-554
- Mueller C K, Wilson J W, Crook N A. 1993. The utility of sounding and

- mesonet data to nowcast thunderstorm initiation. *Wea Forecast*, 8(1): 132-146
- Parker M D, Johnson R H. 2004. Structures and dynamics of quasi-2D mesoscale convective systems. *J Atmos Sci*, 61(5): 545-567
- Putnam B J, Xue M, Jung Y, et al. 2014. The analysis and prediction of microphysical states and polarimetric radar variables in a mesoscale convective system using double-moment microphysics, multinet radar data, and the ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 142(1): 141-162
- Schenkman A D, Xue M, Shapiro A, et al. 2011. The analysis and prediction of the 8–9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR. *Mon Wea Rev*, 139(1): 224-246
- Snook N, Xue M, Jung Y. 2015. Multiscale EnKF Assimilation of radar and conventional observations and ensemble forecasting for a tornadic mesoscale convective system. *Mon Wea Rev*, 143(4): 1035-1057
- Sobash R A, Stensrud D J. 2015. Assimilating surface mesonet observations with the EnKF to improve ensemble forecasts of convection initiation on 29 May 2012. *Mon Wea Rev*, 143(9): 3700-3725
- Sun J Z, Crook N A. 1997. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part I: Model development and simulated data experiments. *J Atmos Sci*, 54(12): 1642-1661
- Sun J Z, Crook N A. 1998. Dynamical and microphysical retrieval from Doppler radar observations using a cloud model and its adjoint. Part II: Retrieval experiments of an observed Florida convective storm. *J Atmos Sci*, 55(5): 835-852
- Sun J Z, Zhang Y. 2008. Analysis and prediction of a squall line observed during IHOP using multiple WSR-88D observations. *Mon Wea Rev*, 136(7): 2364-2388
- Tai S L, Liou Y C, Sun J Z, et al. 2011. Precipitation forecasting using Doppler radar data, a cloud model with adjoint, and the weather research and forecasting model: Real case studies during SoWMEX in Taiwan. *Wea Forecast*, 26(6): 975-992
- Tong M J, Xue M. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. *Mon Wea Rev*, 133(7): 1789-1807
- Wakimoto R M, Murphey H V. 2010. Analysis of convergence boundaries observed during IHOP\_2002. *Mon Wea Rev*, 138(7): 2737-2760
- Weckwerth T M, Wilson J W, Wakimoto R M. 1996. Thermodynamic variability within the convective boundary layer due to horizontal convective rolls. *Mon Wea Rev*, 124(5): 769-784
- Weisman M L, Rotunno R. 2004. "A theory for strong long-lived squall lines" revisited. *J Atmos Sci*, 61(4): 361-382
- Weygandt S S, Shapiro A, Droegemeier K K. 2002a. Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part I: Single-Doppler velocity retrieval. *Mon Wea Rev*, 130(3): 433-453
- Weygandt S S, Shapiro A, Droegemeier K K. 2002b. Retrieval of model initial fields from single-Doppler observations of a supercell thunderstorm. Part II: Thermodynamic retrieval and numerical prediction. *Mon Wea Rev*, 130(3): 454-476
- Wilson J W, Schreiber W E. 1986. Initiation of convective storms at radar-observed boundary-layer convergence lines. *Mon Wea Rev*, 114(12): 2516-2536
- Wilson J W, Meigenhardt D L. 1997. Thunderstorm initiation, organization, and lifetime associated with Florida boundary layer convergence lines. *Mon Wea Rev*, 125(7): 1507-1525
- Wilson J W, Crook N A, Mueller C K, et al. 1998. Nowcasting thunderstorms: A status report. *Bull Ame Meteor Soc*, 79(10): 2079-2100
- Xiao X, Sun J Z, Chen M X, et al. 2017. The characteristics of weakly forced mountain-to-plain precipitation systems based on radar observations and high-resolution reanalysis. *J Geophys Res: Atmos*, 122(6): 3193-3213
- Xiao X, Sun J Z, Qie X S, et al. 2021. Lightning data assimilation scheme in a 4DVAR system and its impact on very short-term convective forecasting. *Mon Wea Rev*, 149(2): 353-373
- Xu Z F, Wang Y, Fan G Z. 2013. A two-stage quality control method for 2-m temperature observations using biweight means and a progressive EOF analysis. *Mon Wea Rev*, 141(2): 798-808
- Zhang F, Snyder C, Sun J Z. 2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. *Mon Wea Rev*, 132(5): 1238-1253
- Ziegler C L, Lee T J, Pielke S R A. 1997. Convective initiation at the dryline: A modeling study. *Mon Wea Rev*, 125(6): 1001-1026
- Ziegler C L, Rasmussen E N. 1998. The initiation of moist convection at the dryline: Forecasting issues from a case study perspective. *Wea Forecast*, 13(4): 1106-1131