

# 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究\*

杨璐 陈敏 陈明轩 高峰 秦睿 宋林烨 程丛兰

YANG Lu CHEN Min CHEN Mingxuan GAO Feng QIN Rui SONG Linye CHENG Conglan

北京城市气象研究院,北京,100089

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

2018-01-04 收稿,2018-07-11 改回.

杨璐,陈敏,陈明轩,高峰,秦睿,宋林烨,程丛兰. 2019. 高时空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究. 气象学报, 77(2):243-255

Yang Lu, Chen Min, Chen Mingxuan, Gao Feng, Qin Rui, Song Linye, Cheng Conglan. 2019. Fusion of 3D high temporal and spatial resolution wind field and its application in nowcasting of severe convective weather. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(2):243-255

**Abstract** The Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Integration (RMAPS-IN) is used in this study to merge the nowcasting three dimensional high spatial and temporal resolution wind field from Variational Doppler Radar Analysis System (VDRAS) with the wind field observed at automatic stations. The results show that the analysis results can obviously improve the wind field. (1)The long time series objective test results show that the absolute errors of  $U/V$  components are 0.05 and 0.06 m/s, respectively; the absolute errors of  $U/V$  components increase with the forecast lead time for the 10 m ground wind field. (2)For the cases of strong convection, the root mean square errors of the 10 m ground wind speed and wind direction are respectively reduced by 0.3 m/s and  $13^\circ$ , and the root mean square errors of wind speed and wind direction are respectively reduced by 0.8 m/s and  $10^\circ$  for the 3-D high resolution wind field. The wind speed and wind direction have been greatly improved in plain sites and the improvements are relatively small in mountain sites. (3)A detailed analysis of the rainstorm occurred on 20 July 2017 and the thunderstorm gale occurred on 7 July 2017 is given. The results show that the RMAPS-IN wind field fusion products can provide more detailed and quantitative description of meso-scale systems.

**Key words** RMAPS-IN integration system, 4-D variational analysis system, Nowcasting wind field, Data fusion, Verification, Application

**摘要** 以业务应用为目标,开展高时、空分辨率三维风场在强对流天气临近预报中的融合应用研究。运用北京快速更新多尺度分析和预报系统集成子系统(RMAPS-IN, Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Integration),对雷达四维变分分析系统(VDRAS)30 min 临近预报的高时、空分辨率三维风场作为数据源与自动气象站风场观测进行快速融合处理。结果表明,以 VDRAS 临近预报风场取代数值模式预报场作为融合初猜场后形成的分析结果对于风场有明显的改善:(1)长时间序列客观检验结果表明,地面 10 m 高风场  $U/V$  分量绝对误差分别为 0.05 和 0.06 m/s。实时融合对未来预报的影响随着预报时效的延长, $U/V$  分量的绝对误差不断增大。(2)对于 11 个强对流个例,地面 10 m 高风场风速均方根误差降低 0.3 m/s,风向均方根误差降低  $13^\circ$ ;边界层三维风场,风速均方根误差降低 0.8 m/s,风向均方根误差降低  $10^\circ$ 。平原站点融合以后风速、风向预报效果有较大改善,山区站点融合以后改善相对较小。(3)通过对 2017 年 7 月 20 日暴雨和 7 月 7 日雷暴大

\* 资助课题:国家重点研发计划(2017YFC1502104)、国家自然科学基金青年基金(41705091)、中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金(IUMKY201706、IUMKY201705)、北京自然科学基金(8164056)。

第一作者:杨璐,主要从事多源资料融合分析与应用研究。E-mail: lyang@ium.cn

通信作者:陈敏,主要从事数值模式预报研究。E-mail: mchen@ium.cn

风个例的详细分析,发现融合基于雷达资料四维变分同化获得的高分辨率临近预报风场对各对流系统中的中尺度结构特征给出了更加细致准确的描述。

**关键词** RMAPS-IN 集成系统, 雷达四维变分分析系统, 临近预报风场, 数据融合, 检验, 应用

**中图法分类号** P425

## 1 引言

对流风暴的新生和发展演变与低层三维风场和温度场及其相互作用存在紧密联系。低层三维风场可以指示风暴发生前环境的辐合上升、风垂直切变、入流等低层动力特征,一定程度上也决定了风暴及其所产生的强天气类型(Weisman, et al, 2000; Xin, et al, 1996; Kirkpatrick, et al, 2011; 陈明轩等, 2011, 2012a, 2012b; 张立祥等, 2009; 戴建华等, 2012)。观测和数值模拟研究均发现,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导致近地面动力不稳定和辐合上升明显加强有利于对流风暴的新生和快速增强(Wilson, et al, 2006; Xue, et al, 2006; 漆梁波等, 2006; 王彦等, 2011)。

北京地处华北平原西北边缘,西北、东北和北部群山环抱,形成平均海拔 1000 m 的天然屏障,而东南部是平均海拔 20—60 m 的平原地带,低层风场在复杂地形的强迫作用下容易出现局地环流及不稳定上升气流,进而与已有的边界层辐合线相互作用并导致强对流天气的局地突发和快速演变(矫梅燕等, 2005; 孙继松, 2005; 孙继松等, 2006)。因此,如何获取复杂地形下更高时、空分辨率的低层三维风场,并与中、上层大气背景风场进行有效集成,从而综合研究三维风场的精细化特征,对于中小尺度大气信息和强对流天气过程的临近预报、预警就显得尤为重要。数据融合是处理这一问题的有效方法之一。目前有许多学者开展了这方面的研究工作(苗春生等, 2015; 张涛等, 2014; 齐亚琳等, 2012),苗春生等(2015)运用 LAPS 数据融合分析系统,将 HY-2 卫星获取的海面风场资料进行融合处理,提供规范化的区域再分析资料。

快速更新多尺度分析和预报系统集成子系统(RMAPS-IN)是基于多源观测及多系统产品融合技术、复杂地形模式订正技术和动力降尺度技术建立的资料快速融合及临近预报系统。该系统将格点分辨率降尺度到 1 km,能够更好地应用局地观测资料(Haiden, et al, 2011)进行数据融合,可以将大多数

站点观测值作为“真值”处理。目前该系统已经实现了 1 km 空间分辨率、10 min 更新循环的京津冀地区网格化三维气象要素客观分析和未来 0—12 h 地面要素及降水的快速更新精细集成预报,如对于地面 10 m 高风的分析场和 12 h 预报时效内的逐时预报场,利用 5 min 自动气象站观测资料进行了快速订正。但对于三维风场的分析,只是将快速更新多尺度分析和预报系统短期预报子系统(RMAPS-ST, Rapid-refresh Multi-scale Analysis and Prediction System-Short Term)的中尺度模式层风场通过三维插值法插值到了 1 km 分辨率、0—4 km 高度内的 RMAPS-IN 网格点上形成融合初猜场,融合后形成的对流尺度风场性能直接取决于模式在对流层中低层 0—4 km 高度风场的预报效果,三维精细风场结构与实况必然存在较大的误差,且不能有效体现对流尺度风场的三维精细结构。

雷达四维变分分析系统(VDRAS)是在 Sun 等(1997, 1998)研究基础上,通过改进雷达资料快速更新四维变分同化(RR4DVar)技术和三维云尺度数值模式,进一步发展的一个可实时运行的系统,该系统使用的数据包括京津冀地区 7 部新一代天气雷达径向速度和反射率因子资料,近 2000 个 5 min 自动气象站观测资料和中尺度数值模式结果,通过对数据的快速更新四维变分同化,可以分析临近预报 18 min 间隔的低层大气三维动力、热动力和微物理场的精细结构,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(如:低层入流、风垂直切变、低层小尺度辐合上升和暖舌等),以及风暴形成的冷池、出流等对流尺度热动力结构特征(Sun, et al, 2005, 2008, 2010; 陈明轩等, 2016)。

如果在 RMAPS-IN 短时临近预报业务系统中以 VDRAS 临近预报风场取代数值模式预报场作为融合初猜场,能够将 VDRAS 临近预报三维风场进行强对流天气预报分析的优势和 RMAPS-IN 系统高时、空分辨率及对地面 10 m 高风场融合自动气象站观测资料精细集成预报的优势结合起来,得到快速更新的京津冀地区高分辨率的三维风场分析场,更好地反映环流的中小尺度特征,对于强对流天气的预报、预警更加有利。

本研究运用 RMAPS-IN 系统,用 VDRAS 30 min 临近预报的高时、空分辨率三维风场取代数值模式 RMAPS-ST 作为融合背景数据源与自动气象站风场观测资料进行快速融合处理。选取 2017 年 5 月 11 日—10 月 11 日长时间序列资料,分别以 RMAPS-ST 数值模式预报场及 VDRAS 临近预报风场作为融合初猜场,对 RMAPS-IN 地面 10 m 高风场分析场及其未来 12 h 预报场,开展客观检验。另外,为进一步探讨与强对流天气生消发展密切相关的高分辨率边界层三维风场的集成融合客观效果,选取了 2016—2017 年雷暴大风、冰雹、暴雨等 11 个强对流个例,利用京津冀 1429 个自动气象站观测资料 and 北京 6 部风廓线雷达探测资料、1 部探空探测资料,开展了客观检验。并针对 2017 年 7 月 20 日暴雨和 2017 年 7 月 7 日雷暴大风个例开展了详细分析,探讨了融合基于雷达资料四维变分同化获得的高分辨率临近预报风场在用于对地面辐合线、低空风垂直切变、对流风暴中下沉气流造成的雷暴大风等系统的分析和诊断中的优势。

## 2 RMAPS-IN 系统基本原理及风场数据融合方法

RMAPS-IN 系统是基于华北区域多源观测资料(雷达、自动气象站)及多系统产品(RMAPS-ST 数值模式产品、VDRAS 临近预报风场)融合技术、复杂地形模式订正技术和动力降尺度技术,实现 1 km 空间分辨率、10 min 更新循环的北京地区网格化三维气象要素客观分析和未来 0—12 h 地面要素及降水的集成预报。RMAPS-IN 系统主要有 4 个模块(降水、温度、湿度和风),不同种类观测资料通过不同功能模块输入 RMAPS-IN 进行融合分析。RMAPS-IN 中与风场分析场有关的融合模块主要算法步骤为:(1)读入数值模式预报初猜场  $X_{bg}$ ;(2)初猜场与地面观测的误差首先由地面观测站值和邻近格点初猜值来确定,然后通过距离反比权重来确定其他格点上的误差。计算地面 10 m 高风场的误差时先确定影响系数( $F_{10}$ ),将初猜场转换为地面观测站的 10 m 高风场。为避免高山测站对高层风场造成不合理影响,将垂直方向 300 m 以下, $F_{10}$  表示为  $F_{10}^{VAL}$ ,设定为 0.75,300 m 以上, $F_{10}$  表示为  $F_{10}^{MTN}$ ,设定为 1,将初猜场乘以  $F_{10}$  得到转换后的 10 m 高风场,然后再计算与地面 10 m 高风场观测数据  $U$ 、 $V$  分量的差值,最后将地面 10 m 高风场差分场分别

与初猜场相加得到 RMAPS-IN 的 10 m 高风场分析场。

$$F_{10}(i, j) = F_{10}^{VAL} + (F_{10}^{MTN} - F_{10}^{VAL}) \min \left[ 1, \max \left( 0, \frac{z_H(i, j)}{z_{scale}} \right) \right] \quad (1)$$

式中, $F_{10}(i, j)$ 为水平方向上 $(i, j)$ 格点的转化系数, $F_{10}^{VAL} = 0.75$ , $F_{10}^{MTN} = 1$ , $z_{scale} = 300$  m, $z_H(i, j)$ 为水平方向上 $(i, j)$ 格点的地形高度。

对于某个格点 $(i, j, m)$ ,它与第 $k$ 个地面测站的三维距离为 $r_{i, j, m, k}$ ,则三维空间上 $(i, j, m)$ 格点的风场差分为

$$\Delta X(i, j, m) = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{\Delta X_k}{r_{i, j, m, k}^2}}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{i, j, m, k}^2}} \quad (2)$$

式中, $n$ 为插值中所用到的相距最近的自动气象站的总数,本系统插值中 $n$ 取为 8。 $\Delta X_k$ 为第 $k$ 个测站的风场差分。

将三维的风场差分场  $\Delta X(i, j, m)$  分别与 RMAPS-ST 数值模式预报的风场或 VDRAS 预报风场初猜值  $X_{bg}(i, j, m)$  相加就可以得到 RMAPS-IN 的风场分析场  $X_{ANA}(i, j, m)$ 。

$$X_{ANA}(i, j, m) = X_{bg}(i, j, m) + \Delta X(i, j, m) \quad (3)$$

$$\Delta X = X_{k}^{OBS} - X_{bg} \quad (4)$$

风场 0—6 h 的临近预报模块将分析场与初猜场随时间权重融合,计算方法如下

$$X_{FORC}(t_i) = f_T X_{ANA}(t_0) + (1 - f_T) X_{bg}(t_i) \quad (5)$$

$$f_T(t_i) = \max \left( 1 - \frac{t_i}{6}, 0 \right) \quad (6)$$

式中, $X_{FORC}(t_i)$ 为第 $i$ 小时的风场预报值, $X_{ANA}(t_0)$ 为风场分析值, $X_{bg}(t_i)$ 为第 $i$ 小时初猜场的值, $f_T$ 为权重系数。

为了验证 VDRAS 临近预报风场在 RMAPS-IN 系统中的融合效果,设计了 2 种试验方案进行对比分析:(1)以 RMAPS-ST 数值模式预报场作为融合初猜场开展融合试验,文中统称为方案 a;(2)以 VDRAS 预报风场作为融合初猜场开展融合试验,文中统称为方案 b。

## 3 检验资料与方法

利用 2017 年 5 月 11 日—10 月 11 日京津冀地区自动气象站观测资料,分别对方案 a 和 b 得到的 10 min 更新的 RMAPS-IN 地面 10 m 高风场分析场及其未来 6 h 预报场,开展长时间序列客观检验。

另外,为评估与强对流天气生消发展密切相关的高分辨率边界层三维风场的集成融合分析效果,进一步选取 2016—2017 年 6—8 月雷暴大风、冰雹、暴雨等共 11 个强对流个例,利用京津冀 1429 个自动气象站观测资料 and 北京海淀、延庆、观象台、霞云岭、上甸子、平谷 6 部风廓线雷达、观象台探空资料,定量计算了自动气象站 10 m 高度风向、风速及各高度层实况观测资料与两种方案得到的风向、风速分析场的平均绝对误差、均方根误差和相关系数。因海拔高度原因,北京延庆、霞云岭、上甸子风向、风速分析场检验从 500 m 开始。并针对 2017 年 7 月 20 日暴雨和 2017 年 7 月 7 日雷暴大风个例开展了详细分析,探讨了融合雷达资料四维变分同化获得的高分辨率临近预报风场在用于对地面辐合线、低空风垂直切变、对流风暴中下沉气流造成的雷暴大风等系统的分析和诊断中的优势。用  $X_v$ 、 $X_r$  表示基于方案 a 和方案 b 得到的 RMAPS-IN 风场、 $X_o$  表示自动站、风廓线、探空实况风场,  $i$  表示统计时段内的样本序号,  $N$  为相应样本个数 ( $N = 792$ )。

平均绝对误差

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |(x_{r/v} - x_o)|_i \quad (7)$$

平均偏差

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{r/v} - x_o)_i \quad (8)$$

均方根误差

$$RMSE = \left( \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{r/v} - x_o)^2 \right)^{1/2} \quad (9)$$

相关系数

$$R(x_{r/v}, x_o) = \frac{\text{cov}(x_{r/v}, x_o)}{\sqrt{\text{var}[x_{r/v}] \text{var}[x_o]}} \quad (10)$$

## 4 客观检验结果

### 4.1 10 m 高风场分析场和预报场的客观检验结果

2017 年 5 月 11 日—10 月 11 日基于方案 a 和 b 形成的 10 min 更新的 RMAPS-IN 地面 10 m 高风场分析场和未来 6 h 预报场的长时间序列客观检验结果如表 1 所示,从分析场的平均绝对误差和均方根误差来看,基于方案 b 得到的 RMAPS-IN 10 m 高风场分析场相比方案 a,  $U/V$  分量绝对误差从 0.41 和 0.46 m/s 降低为 0.05 和 0.06 m/s,均方根误差从 1.10 和 1.22 m/s 降低为 0.43 和 0.45 m/s。由此可见,RMAPS-IN 系统通过复杂地形模式订正技术和动力降尺度技术将格点分辨率降尺度到 1 km,以 VDRAS 临近预报风场取代数值模式预报场作为初猜场融合自动气象站观测资料后形成的分析场能更好地反映观测的特征。

从预报的绝对误差和均方根误差来看,基于方案 a 和 b 形成的未来 6 h 预报场随着预报时效的延长,  $U/V$  分量的平均绝对误差和均方根误差不断增大。当预报时效  $t = 1$  h 时,基于方案 b 得到的  $U/V$  分量的平均绝对误差均为 0.46 m/s,均方根误差分别为 1.20 和 1.21 m/s;  $t = 6$  h 时,  $U/V$  分量的平均绝对误差分别为 1.07 和 1.23 m/s,均方根误差分别为 1.96 和 2.14 m/s。

表 1 地面 10 m 高风场分析场和预报场的客观检验结果(单位:m/s)

Table 1 Objective verification results of 10 m wind analysis and forecast (unit:m/s)

时间(h)	融合方案	U					
		平均偏差	均方根误差	平均绝对误差	平均偏差	均方根误差	平均绝对误差
0	RMAPS-ST+IN	0.09	1.10	0.41	0.03	1.22	0.46
	VDRAS+IN	0.00	0.43	0.05	0.00	0.45	0.06
1	RMAPS-ST+IN	0.16	1.94	0.97	-0.05	2.05	1.03
	VDRAS+IN	0.01	1.20	0.46	0.03	1.21	0.46
2	RMAPS-ST+IN	0.21	2.11	1.11	-0.12	2.21	1.17
	VDRAS+IN	0.06	1.61	0.75	0.02	1.64	0.76
3	RMAPS-ST+IN	0.29	2.11	1.13	-0.31	2.23	1.22
	VDRAS+IN	0.09	1.76	0.87	0.03	1.82	0.91
4	RMAPS-ST+IN	0.35	2.11	1.16	-0.45	2.28	1.30
	VDRAS+IN	0.13	1.83	0.94	0.01	1.92	1.02
5	RMAPS-ST+IN	0.39	2.14	1.19	-0.59	2.38	1.40
	VDRAS+IN	0.16	1.88	1.00	-0.01	2.02	1.13
6	RMAPS-ST+IN	0.43	2.19	1.24	-0.73	2.50	1.52
	VDRAS+IN	0.18	1.96	1.07	-0.03	2.14	1.23

### 4.2 10 m 高风场分析场强对流个例定量检验结果

方案 b 形成的分析结果对于强对流过程风场有一定的改善,其平均绝对误差及均方根误差小于方

案 a,风速均方根误差降低 0.3 m/s,风向均方根误差降低 13°,能更好地反映地面 10 m 高风场的中小尺度信息,客观检验结果如表 2 所示。

表 2 地面 10 m 高风场分析场强对流个例的客观检验结果  
Table 2 Objective verification results of 10 m wind analysis for convective weather cases

方案	风速			相关系数	风向			相关系数
	平均偏差 (m/s)	均方根误差 (m/s)	平均绝对误差(m/s)		平均偏差 (°)	均方根误差 (°)	平均绝对误差(°)	
RMAPS-ST + IN	-0.1	0.75	0.55	0.83	0.49	34.0	22.8	0.68
VDRAS+ IN	0.1	0.45	0.32	0.94	-0.09	21.0	13.0	0.81

### 4.3 三维风场分析场强对流个例定量检验结果

图 1 分别给出了基于方案 a 和 b 得到的 11 个强对流个例的 RMAPS-IN 风速、风向分析场与风廓线雷达观测的风速、风向绝对偏差和均方根误差。图 1a 和 b 分别为基于方案 a 和 b 得到的风速和风向在不同高度上的绝对偏差,图 1c 和 d 分别为基于方案 a 和 b 得到的风速和风向在不同高度上的均方根误差。

从图 1 和表 3 可以看出,基于方案 b 得到的 RMAPS-IN 三维风场分析场对于 3000 m 以下高空风场分析场改善效果明显,风速均方根误差降低 0.8 m/s,平均绝对偏差降低 0.59 m/s,风向均方根误差降低 10°,平均绝对偏差降低 10.18°。这也进一步证明中尺度模式在对流层中低层形成的对流尺度风场与实况存在较大的误差,不能有效体现对流尺度风场的三维精细结构,在 RMAPS-IN 系统中将 VDRAS 预报风场作为初猜场融合自动气象站观测资料,能够将 VDRAS 对于强对流天气过程低层大

气三维动力的精细结构模拟出来(陈明轩等,2016)的优势与 RMAPS-IN 系统高时、空分辨率及对地面 10 m 高风场融合自动气象站观测资料精细集成预报的优势结合起来,得到快速更新的京津冀地区高分辨率的三维风场分析场,更好地反映环流的中小尺度特征,对于强对流天气的预报、预警更加有利。

6 部风廓线雷达站点及 1 部探空站各高度层风速、风向平均绝对误差、均方根误差分析结果表明(表 4),平原站点基于方案 b 得到的 RMAPS-IN 风速、风向有较大改善,观象台表现最明显,与探空站资料的对比显示绝对偏差降低 0.92 m/s,风向误差降低 14.76°,与风廓线雷达资料的对比显示绝对偏差降低 1.18 m/s,风向误差降低 19.54°。由于在复杂地形下,VDRAS 的风场分析场和临近预报效果本身存在较大偏差(陈明轩等,2016),所以对于山区站点,如延庆、上甸子站基于方案 b 得到的 RMAPS-IN 分析场风速与风廓线雷达探测风速的绝对偏差和均方根误差相比平原站点改善较小。

表 3 三维风场分析场强对流个例的客观检验结果  
Table 3 Objective verification results of 3-D wind analysis field for convective weather cases

方案	风速			相关系数	风向			相关系数
	平均偏差 (m/s)	均方根误差 (m/s)	平均绝对误差(m/s)		平均偏差 (°)	均方根误差 (°)	平均绝对误差(°)	
RMAPS-ST + IN	-1.03	4.54	3.33	0.60	8.32	67.84	50.89	0.33
VDRAS+ IN	0.59	3.74	2.74	0.76	6.77	57.87	40.71	0.43

需要指出,风廓线雷达探测资料本身由于大气不均匀、强降水、垂直上升等会存在一定的观测误差(邓闯等,2012)。另外,廓线资料的插值也会带来一些误差,为定量评估该误差对检验存在的不确定性影响,选取本研究中强对流个例的北京观象台探空站资料与该站风廓线雷达资料同时次数据进行了对

比,但由于探空资料时间分辨率较低,所以检验样本数较少。从检验结果来看,探空与风廓线雷达风速均方根误差为 1.87 m/s,风向均方根误差为 28°,该误差会导致检验存在的不确定性,但对于检验融合试验前、后结果的相对好坏的定量评估具有参考意义。

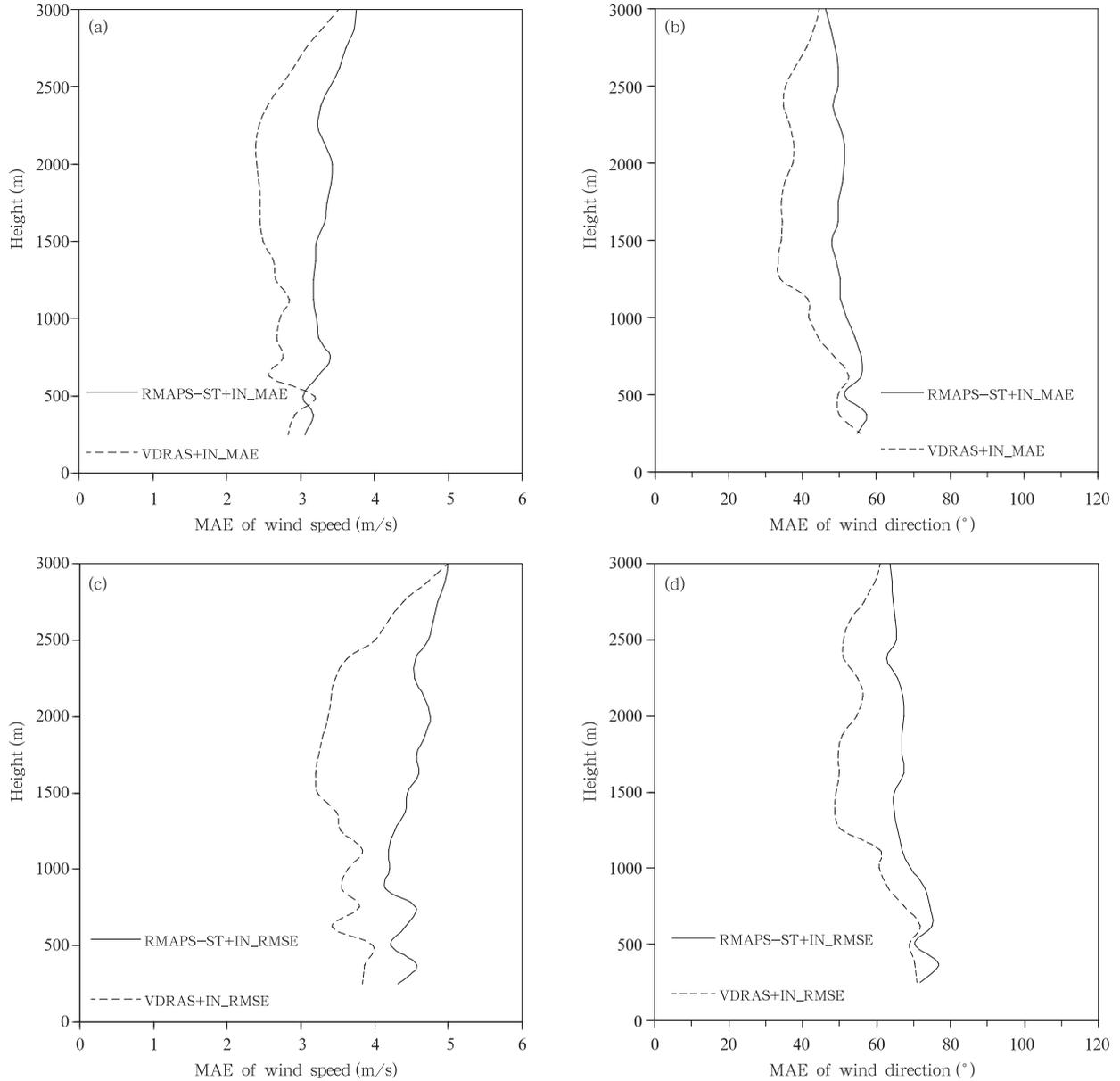


图 1 基于方案 a(a,b)和 b(c,d)的 RMAPS-IN 风速、风向分析场与风廓线雷达观测的风速、风向绝对偏差(a,b)和均方根误差(c,d)  
 Fig. 1 Absolute deviations (a, b) and root mean square errors (c, d) of wind speed and wind direction of RMAPS-IN based on Scheme a(a,b) and b(c,d) and wind profile radar observations

表 4 各站点基于方案 a 和 b 得到的 RMAPS-IN 风速、风向分析场与风廓线雷达/探空观测的风速、风向绝对偏差和均方根误差  
 Table 4 Absolute deviations and root mean square errors of wind speed and wind direction of RMAPS-IN based on schemes a and b and observations of wind profile radar/sounding in different sites

站点	观测资料	风速绝对偏差(m/s)		风向绝对偏差(°)		风速均方根误差(m/s)		风向均方根误差(°)	
		RMAPS-ST+IN	VDRAS+IN	RMAPS-ST+IN	VDRAS+IN	RMAPS-ST+IN	VDRAS+IN	RMAPS-ST+IN	VDRAS+IN
观象台	探空	2.68	1.76	30.70	15.94	3.22	2.09	41.44	22.62
	风廓线	3.48	2.30	46.10	26.56	4.61	2.98	62.55	41.22
海淀	风廓线	3.61	2.67	59.89	46.01	4.83	3.48	76.71	63.43
平谷	风廓线	3.06	2.74	38.04	34.29	4.14	3.74	52.53	48.30
上甸子	风廓线	2.98	2.96	49.46	44.53	4.16	3.89	65.18	61.08
霞云岭	风廓线	3.32	2.46	56.63	46.04	4.43	3.18	71.73	62.70
延庆	风廓线	3.62	3.27	55.61	45.68	4.92	4.72	73.40	61.51

## 5 个例应用分析

### 5.1 局地强降水临近预报中的应用效果

受副热带高压外围暖湿气流和冷空气的共同影响,2017年7月20日下午到夜间北京地区出现中到大雨,延庆、昌平、密云、平谷、顺义、城区等局部地区出现暴雨,其中延庆、房山和顺义个别地点出现大暴雨,并伴有雷电和短时大风。

图2分别为2017年7月20日16和18时(世界时,下同)北京地区基于方案a和b得到的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场(图2a和b及图2d和e)、自动气象站实况风场(图2c和f)及京津冀地区与自动气象站实况风场的差值场(图2g和h)。从中可以看出,基于方案a得到的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场在北京西部北部如怀柔、房山、密云地区及河北北部和南部地区比自动气象站实况风场大(图2a、e、g),且风场分布比较杂乱,地面辐合线不太清晰,1500 m 风场分析场(图略)基本为一致的西北偏西气流,无法分析出触发降水的机制。

方案b对于三维风场改进很大,降水区和低层动力场更加匹配。16时(图2b),基于方案b得到的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场在密云、怀柔附近为西北风与偏东风的弱切变,地面辐合较弱,对应1500 m 高风场分析场为西北风与偏西风的低槽切变辐合区(图略);17时,1500 m 高风场分析场(图2j)上北京北部受冷空气控制,南部为偏南暖湿气流,切变线明显,低层动力条件很好,房山大兴一带的降雨区主要是受1500 m 高切变线和前侧偏南风影响,同时次雷达 $1.5^\circ$ 平均径向风场图上(图2m),北京南部中低层为弱的西南气流,东北部地区为西北风与偏西风的辐合带。18时,10 m 高风场(图2e),降水范围扩大,降水增强,1500 m 高偏南风急流的向北推进,使得在急流轴的左前方、1500 m 高切变线南侧造成强降水回波的显著加强。以上分析说明通过融合VDRAS临近风场预报数据,可以有效地将天气雷达径向速度和反射率因子资料融合到RMAPS-IN系统中,进而改善中尺度模式在对流层中低层风场的预报效果,更好地分析低层动力条件对降水发生、发展的影响机制。

图3和4分别为16和18时海淀(a)、延庆(b)、

观象台(c)、霞云岭(d)、上甸子(e)、平谷(f)等6站对应的基于方案a和b得到的RMAPS-IN风场垂直廓线(分别对应为NoVdras和WithVdras)及风廓线资料(VWP)。从中可以看出,方案a的RMAPS-IN风场垂直廓线在延庆、海淀、观象台、上甸子站整层都为一致的偏北风,没有反映出低层风场的垂直切变和冷暖平流情况,不利于分析降水的开始、结束以及加强和减弱趋势。方案b得到的风向与风廓线资料的一致性要远优于方案a的RMAPS-IN垂直风场。16时融合VDRAS风场后低层以偏东风或偏南风为主,高层基本为一致的西南风,低层风垂直切变明显,低层偏东风利于水汽的输送,且风向随高度顺时针旋转,说明有暖平流发展,利于大气层结不稳定性的加强,到18时,北京北部和东北部如延庆、上甸子和平谷低层转为受偏北风控制,大气层结趋于稳定,南部如房山和大兴,还处于切变线南侧的偏南气流控制中。

### 5.2 雷暴大风临近预报中的应用效果

2017年7月7日傍晚到夜间受自西北向东南移动的飑线影响,北京地区出现雷阵雨天气,并伴有短时大风,局地冰雹和短时强降水等强对流天气。全市大部分地区出现6—9级短时大风,其中延庆、昌平、怀柔、门头沟、平谷等区局地出现10级以上短时大风,平谷玻璃台站和怀柔桥梓站瞬时风力达11级。

图5分别为2017年7月7日13时基于方案a(图5a)和b(图5b)得到的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场、自动站实况风场(图5d)及09时起报的方案b的RMAPS-IN 10 m 高风场13时预报场(图5c)。整体来说,此次过程基于两种方案得到的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场及预报场都反映了飑线后部强的下沉冷空气在地面形成的强辐散气流与暖湿的环境大气层之间形成的边界层辐合线(出流边界的位置)。方案a的RMAPS-IN风场分析场对于密云、平谷、房山附近风速相比实况明显偏大。方案b对于风速有很大的调整,大风区位置及风速大小与实况基本一致。09时起报的RMAPS-IN 10 m 高风场的13时预报场,虽然相比实况大风区域范围较大,但总的来说对于边界层辐合线及大风区的位置有很好的预报,对于预报员有很高的参考和指示价值。

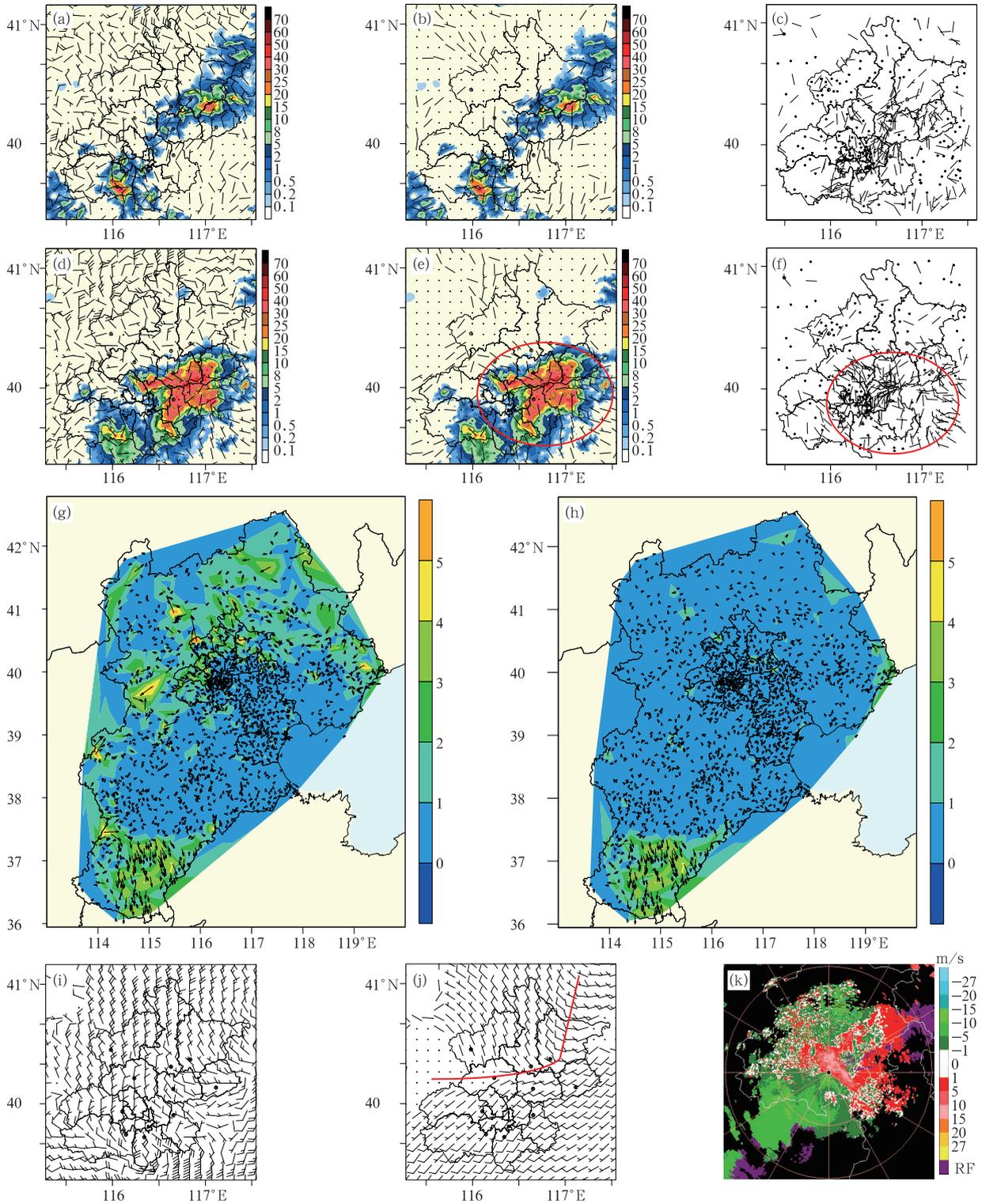


图2 2017年7月20日16和18时方案a(a,b)和b(d,e)北京10 m高风场分析场和降水量(色阶,单位:mm)、自动气象站实况风场(c,f)、京津冀风场差分场(g,h,填色图为风速差值,单位:m/s;矢量为风矢量差值)及2017年7月20日17时北京1500 m高风场分析场(i,j)、平均径向速度产品(1.5°)(k)

Fig. 2 10 m wind analysis fields at 16:00 UTC and 18:00 UTC 20 July 2017 based on Scheme a (a, b) and b (d, e), wind field observed at automatic weather stations (c, f), wind difference fields in Beijing-Tianjin-Hebei (g, h, the color fillings show wind speed difference, unit: m/s), 1500 m wind analysis field at 17:00 UTC 20 July 2017 (i, j) and the mean radial velocity (k) at 17:00 UTC (1.5°)

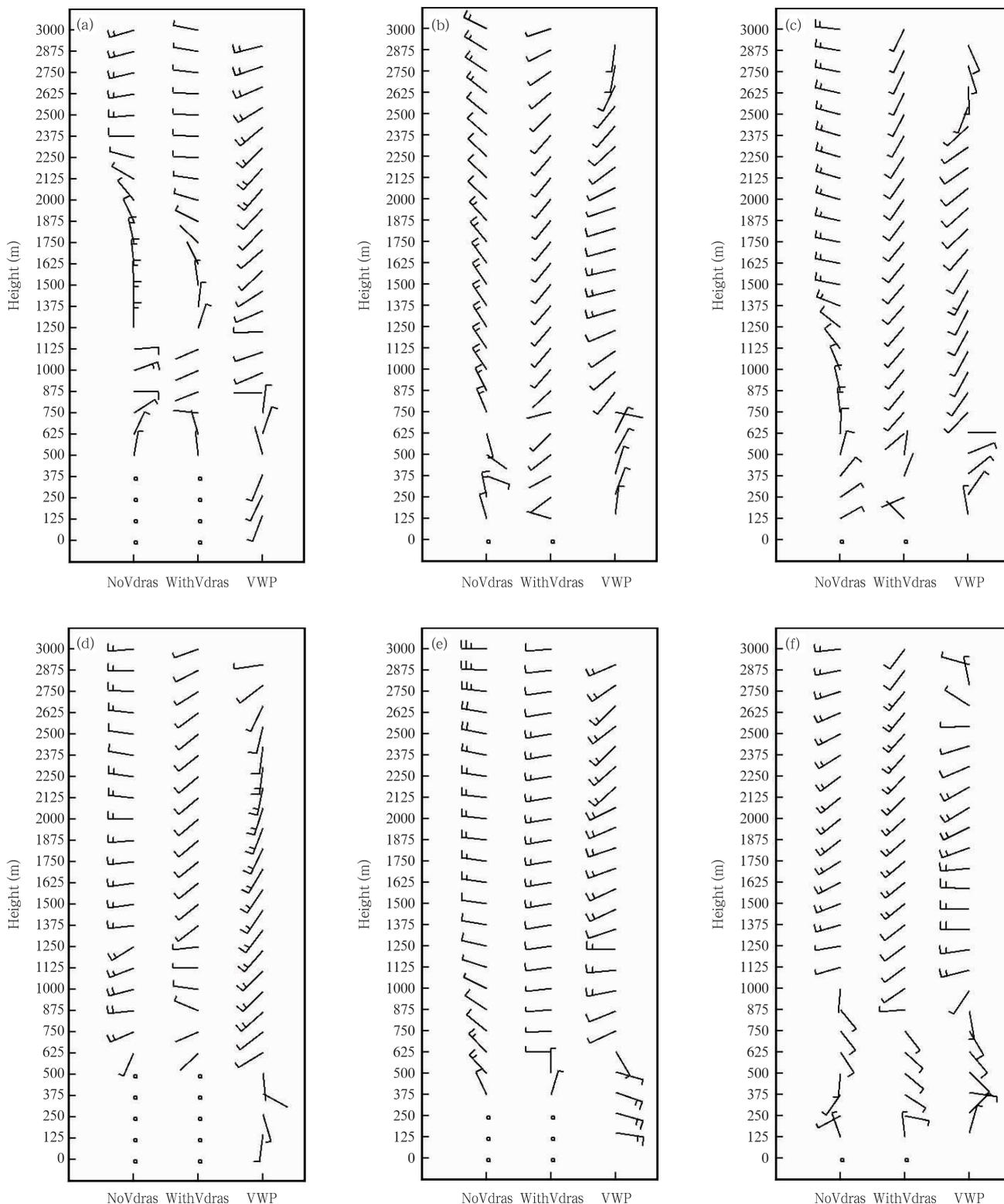


图3 2017年7月20日16时延庆(a)、海淀(b)、观象台(c)、霞云岭(d)、上甸子(e)、平谷(f)基于方案a和b得到的RMAPS-IN风场垂直廓线(分别对应为NoVdras和WithVdras)及风垂直廓线(VWP)

Fig.3 Vertical profiles based on Scheme a and b and VWPs in Yanqing (a), Haidian (b), Guanxiangtai (c), Xiayunling (d), Shangdianzi (e), Pinggu(f) at 16:00 UTC 20 July 2017

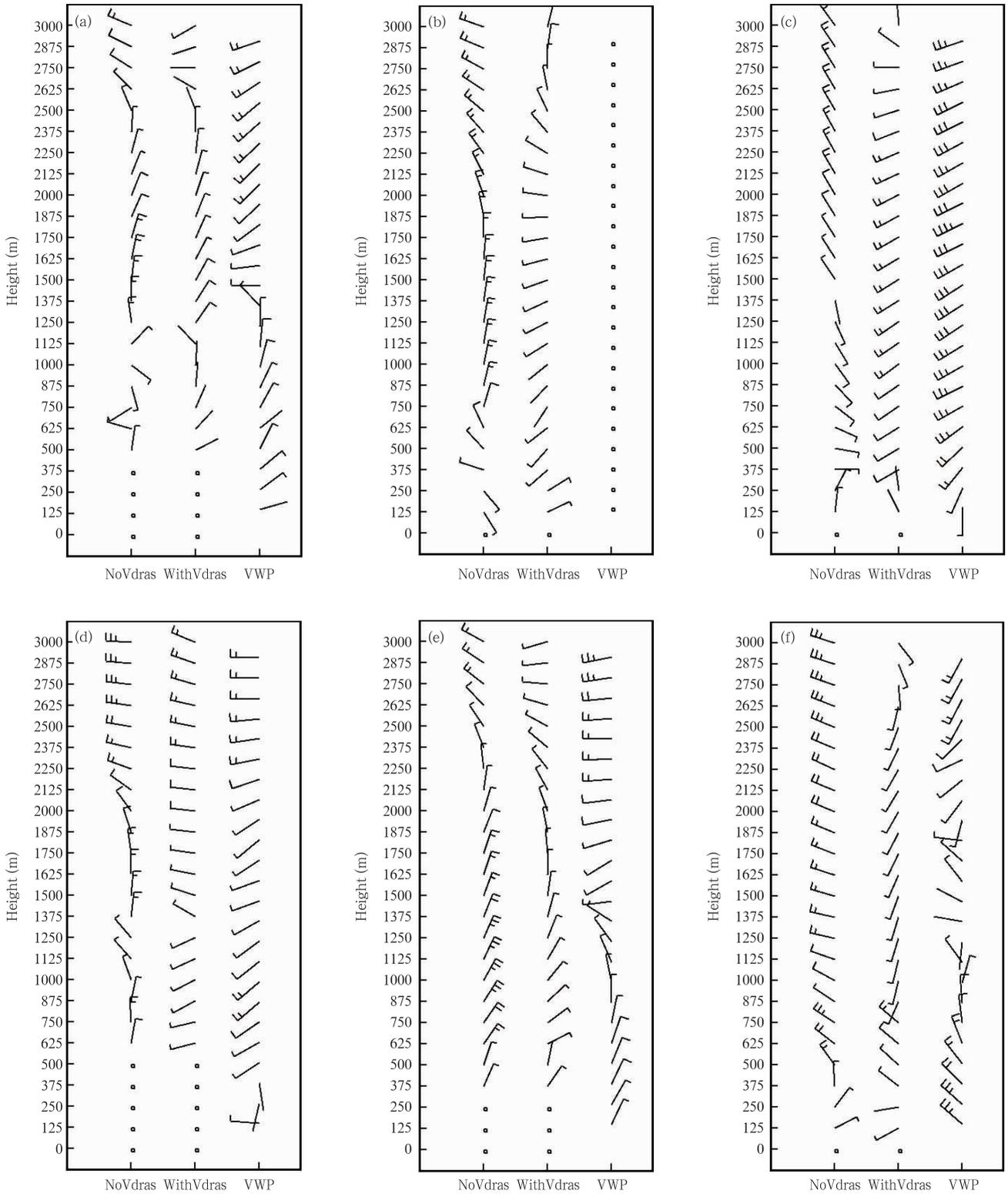


图 4 2017 年 7 月 20 日 18 时延庆(a)、海淀(b)、观象台(c)、霞云岭(d)、上甸子(e)、平谷(f)基于方案 a 和 b 得到的 RMAPS-IN 风场垂直廓线(分别对应为 NoVdras 和 WithVdras)及风垂直廓线(VWP)

Fig. 4 Vertical profile based on Scheme a and b and VWP in Yanqing (a), Haidian (b), Guanxiangtai (c), Xiayunling (d), Shangdianzi (e), Pinggu (f) at 18:00 UTC 20 July 2017

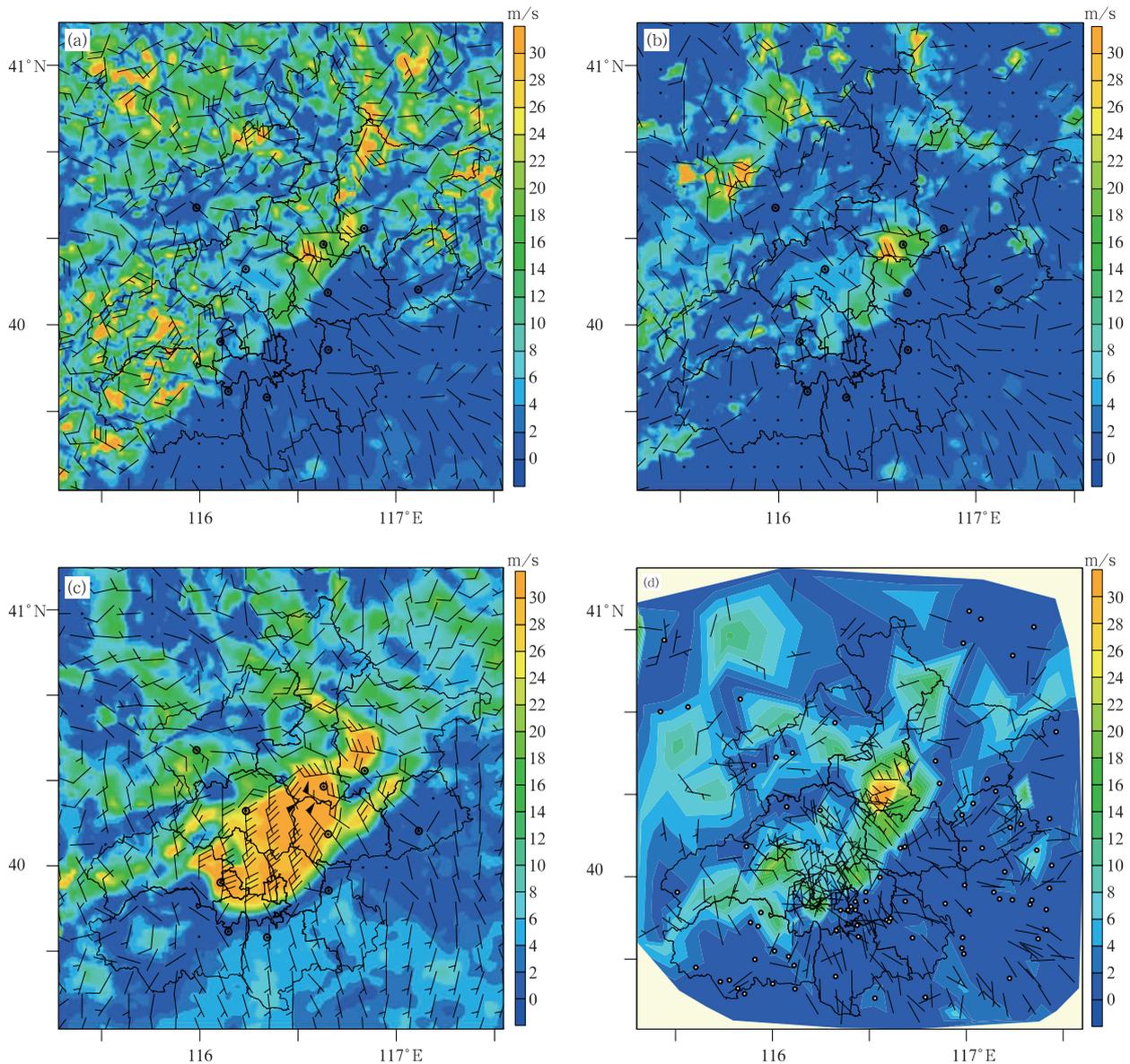


图5 2017年7月7日13时基于方案a(a)和b(b)得到的RMAPS-IN 10 m高风场分析场、自动气象站实况风场(d)及基于方案b的RMAPS-IN 10 m高风场13时预报场(c)  
 Fig.5 Analysis fields (a,b) based on Scheme a and b, actual wind field from automatic weather stations (d) and forecast field (c) based on Scheme b at 13:00 UTC 7 July 2017

## 6 结论与讨论

运用RMAPS-IN集成系统,探讨将VDRAS临近预报的高时、空分辨率三维风场作为数据源进行快速融合处理,提升与强对流天气生消发展密切相关的高分辨率边界层三维风场的综合集成及融合分析应用效果。选取2017年5月11日—10月11日,以RMAPS-ST数值模式预报场作为融合初猜

场及以VDRAS临近预报风场取代数值模式预报场作为融合初猜场得到的10 min更新的RMAPS-IN地面10 m高风场分析场及其未来6 h预报场,开展了长时间序列客观检验。为进一步探讨与强对流天气生消发展密切相关的高分辨率边界层三维风场的集成融合客观效果,选取2016—2017年雷暴大风、冰雹、暴雨等11个强对流个例,利用京津冀1429个自动气象站观测资料和北京6部风廓线雷达、1部

探空探测资料,开展了客观检验。并针对2017年7月20日暴雨和2017年7月7日雷暴大风个例开展了详细分析,探讨了融合基于雷达资料四维变分同化获得的高分辨率临近预报风场在用于对地面辐合线、低空风垂直切变、对流风暴中下沉气流造成的雷暴大风等系统的分析和诊断中的优势。结果表明,以VDRAS临近预报风场取代RMAPS-ST数值模式风场作为初猜场后形成的分析结果对于风场有明显的改善,可以提供更高准确性和格点分辨率的天气分析和预报产品:

(1)长时间序列的常规检验发现,方案b形成的RMAPS-IN 10 m 高风场分析场相比方案a, $U/V$ 分量绝对误差从0.41和0.46 m/s降低为0.05和0.06 m/s,均方根误差从1.10和1.22 m/s降低为0.43和0.45 m/s。从预报的平均绝对误差来看,实时融合对未来预报的影响随着预报时效的增加, $U/V$ 分量的绝对误差不断增大。

(2)11个强对流个例检验发现,对于地面10 m高风场分析场,方案b形成的分析结果对于强对流过程风场有一定的改善,其平均绝对误差及均方根误差小于方案a,风速均方根误差降低0.3 m/s,风向均方根误差降低 $13^\circ$ ,能更好地反映地面10 m高风场的中小尺度信息。对于边界层三维风场,以VDRAS预报取代RMAPS-ST数值模式预报作为初猜场融合自动气象站观测资料的RMAPS-IN三维风场分析场改善效果明显,风速均方根误差降低0.8 m/s,平均绝对偏差降低0.59 m/s,风向均方根误差降低 $10^\circ$ ,平均绝对偏差降低 $10.18^\circ$ 。

(3)通过对2017年7月20日暴雨和7月7日雷暴大风个例的详细分析,发现融合基于雷达资料四维变分同化获得的高分辨率临近预报风场在用于对地面辐合线、低空风垂直切变、对流风暴中下沉气流造成的雷暴大风等系统的分析和诊断中给出了更加细致准确的描述,在强对流临近预报中具有显著优势和应用前景。

## 参考文献

- 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, 2011, 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. 2012a. 基于雷达资料四维变分同化和三维云模式对一次超级单体风暴发展维持热动力机制的模拟分析. 大气科学, 36(5): 929-944. Chen M X, Wang Y C, Xiao X, et al. 2012a. A case simulation analysis on thermodynamical mechanism of supercell storm development using 3-D cloud model and 4-D variational assimilation on radar data. Chinese J Atmos Sci, 36(5): 929-944 (in Chinese)
- 陈明轩,王迎春. 2012b. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飑线过程发展维持的数值模拟. 气象学报, 70(3): 371-386. Chen M X, Wang Y C. 2012b. Numerical simulation study of interactional effects of the low-level vertical wind shear with the cold pool on a squall line evolution in North China. Acta Meteor Sinica, 70(3): 371-386 (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)
- 戴建华,陶岚,丁杨等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析. 气象学报, 70(4): 609-627. Dai J H, Tao L, Ding Y, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line. Acta Meteor Sinica, 70(4): 609-627 (in Chinese)
- 邓闯,阮征,魏鸣等. 2012. 风廓线雷达测风精度评估. 应用气象学报, 23(5): 523-533. Deng C, Ruan Z, Wei M, et al. 2012. The evaluation of wind measurement accuracy by wind profile radar. J Appl Meteor Sci, 23(5): 523-533 (in Chinese)
- 矫梅燕,毕宝贵. 2005. 夏季北京地区强地形雨中尺度结构分析. 气象, 31(6): 9-14. Jiao M Y, Bi B G. 2005. Mesoscale structure analysis of topography-induced heavy rainfall in Beijing in summer. Meteor Mon, 31(6): 9-14 (in Chinese)
- 苗春生,高雅,王坚红. 2015. HY-2卫星近海面风场资料融合及在海上天气系统分析中的应用. 海洋预报, 32(4): 12-22. Miao C S, Gao Y, Wang J H. 2015. Fusion of HY-2 satellite sea surface wind and the application in weather system analysis. Marine Forecasts, 32(4): 12-22 (in Chinese)
- 漆梁波,陈春红,刘强军. 2006. 弱窄带回波在分析和预报强对流天气中的应用. 气象学报, 64(1): 112-120. Qi L B, Chen C H, Liu Q J. 2006. Application of narrow-band echo in severe weather prediction and analysis. Acta Meteor Sinica, 64(1): 112-120 (in Chinese)
- 齐亚琳,林明森. 2012. 数据融合技术在海洋二号卫星数据中的应用. 航天器工程, 21(3): 117-123. Qi Y L, Lin M S. 2012. Application of the data fusion technique in HY-2 satellite data. Spacecr Eng, 21(3): 117-123 (in Chinese)
- 孙继松. 2005. 气流的垂直分布对地形雨落区的影响. 高原气象, 24(1): 62-69. Sun J S. 2005. The effects of vertical distribution of the lower level flow on precipitation location. Plateau Meteor, 24(1): 62-69 (in Chinese)

- 孙继松, 石增云, 王令. 2006. 地形对夏季冰雹事件时空分布的影响研究. *气候与环境研究*, 11(1): 76-84. Sun J S, Shi Z Y, Wang L. 2006. A study on topography impacting on distribution of hail events. *Climatic Environ Res*, 2006, 11(1): 76-84 (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)
- 张立祥, 李泽椿. 2009. 一次东北冷涡 MCS 边界层特征数值模拟分析. *气象学报*, 67(1): 75-82. Zhang L X, Li Z C. 2009. The numerical simulative analysis on characteristic of boundary Layer in MCS on 5 July 2004. *Acta Meteor Sinica*, 67(1): 75-82 (in Chinese)
- 张涛, 苗春生, 王新. 2014. LAPS 与 STMAS 地面气温融合效果对比试验. *高原气象*, 33(3): 743-752. Zhang T, Miao C S, Wang X. 2014. Comparison tests of the integration effect of surface temperature by LAPS and STMAS. *Plateau Meteor*, 33(3): 743-752 (in Chinese)
- Haiden T, Kann A, Wittmann C, et al. 2011. The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) system and its validation over the Eastern Alpine region. *Wea Forecasting*, 26(2): 166-183, doi: 10.1175/2010WAF2222451.1
- Kirkpatrick C, McCaul E W Jr, Cohen C. 2011. Sensitivities of simulated convective storms to environmental CAPE. *Mon Wea Rev*, 139(11): 3514-3532
- 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. 2005. Initialization and numerical forecasting of a supercell storm observed during STEPS. *Mon Wea Rev*, 133(4): 793-813
- 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
- Sun J Z, Chen M X, Wang Y C. 2010. A frequent-updating analysis system based on radar, surface, and mesoscale model data for the Beijing 2008 forecast demonstration project. *Wea Forecasting*, 25(6): 1715-1735
- Weisman M L, Rotunno R. 2000. The use of vertical wind shear versus helicity in interpreting supercell dynamics. *J Atmos Sci*, 57(9): 1452-1472
- Wilson J W, Roberts R D. 2006. Summary of convective storm initiation and evolution during IHOP: Observational and modeling perspective. *Mon Wea Rev*, 134(1): 23-47
- Xin L, Reuter G W. 1996. Numerical simulation of the effects of mesoscale convergence on convective rain showers. *Mon Wea Rev*, 124(12): 2828-2842
- Xue M, Martin W J. 2006. A high-resolution modeling study of the 24 May 2002 dryline case during IHOP. Part I: Numerical simulation and general evolution of the dryline and convection. *Mon Wea Rev*, 134(1): 149-171