

谭晓伟,徐枝芳,龚建东. 2016. 风廓线雷达资料对 GRAPES\_MESO 数值预报系统影响的初步研究. 气象,42(1):26-33.

# 风廓线雷达资料对 GRAPES\_MESO 数值 预报系统影响的初步研究<sup>\* 1</sup>

谭晓伟 徐枝芳 龚建东  
中国气象局数值预报中心,北京 100081

**提 要:** 针对一个南方切变线系统降水个例,通过观测系统模拟试验(OSSEs)对我国拟建风廓线雷达观测网内的不同类型风廓线雷达观测资料在 GRAPES\_MESO 系统中的影响、对风廓线雷达观测和探空观测及两者混合使用时在 GRAPES\_MESO 系统中的影响差异进行了初步分析和讨论。试验结果表明,在 GRAPES\_MESO 系统中,风廓线雷达资料对 500 hPa 高度以下水平风速分析场的修正作用明显优于探空资料;风廓线雷达资料对水平风速分析场的影响高度极限大约在 300 hPa 附近,经过 6 h 的传播,其影响可以向上继续传播至 250 hPa 以上高度;在 300 hPa 高度以下,同化对流层 II 型风廓线雷达资料对水平风速分析场的影响比边界层型风廓线雷达资料略大;单独同化风廓线雷达资料对降水预报的贡献较弱,与探空观测混合使用时有助改进降水预报。

**关键词:** 观测系统模拟试验, 风廓线雷达, 资料同化  
**中图分类号:** P413      **文献标志码:** A      **doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2016. 01. 003

## Impact of Wind-Profiling Radar Data Assimilation on GRAPES\_MESO Model System

TAN Xiaowei XU Zhifang GONG Jiandong  
Numerical Weather Prediction Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081

**Abstract:** A wind-profiling radar network of China is designed. The assimilation of wind-profiling radar observations anticipated from this network is conducted as a series of observing system simulation experiments (OSSEs) to study its impact on the GRAPES\_MESO model system in a case of south shear line weather. In this OSSEs study, a control simulation without any data assimilated is compared to four OSSE simulations that assimilated wind-profiling radar or sounding data. The root-mean-square error (RMSE) of wind analysis is compared against the control simulation. A significant increase of RMSE of wind analysis is found obviously below 500 hPa level when the wind profile data are used in the assimilation system. The obvious improvement from inclusion of wind profile for RMSE of wind analysis is below 300 hPa roundly. When the wind profile data of troposphere II type are assimilated RMSE of wind analysis is a little larger than that when the wind profile data of boundary layer type are assimilated. The results show the two types of wind-profiling radar neither improve the rainfall prediction obviously, but the rainfall prediction is improved when the sounding data are also assimilated together.

**Key words:** observing system simulation experiments (OSSE), wind-profiling rada, data assimilation

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406006)资助  
2015 年 5 月 4 日收稿; 2015 年 7 月 8 日收修定稿  
第一作者:谭晓伟,主要从事目标观测、数值模拟方面的工作. Email: xwtan@mail. iap. ac. cn

## 引 言

风廓线雷达是利用大气湍流对电磁波的散射作用来对大气风场等物理量进行探测的遥感设备。风廓线雷达的探测方式为连续的无人值守的遥感方式,探测资料具有时空分辨率高、准确度高的特点。与其他探测手段相比,风廓线雷达探测还具有连续获取资料、自动化程度高、业务运行成本低等优势。风廓线雷达技术在 20 世纪 80 年代中期开始进入气象业务使用,风廓线雷达观测网的建设随后得到不断发展。美国海洋大气局(NOAA)所布设的国家风廓线雷达网(NPN)从 1992 年开始业务运行,该观测网由美国中部的 32 部 404 MHz 的风廓线雷达(包括两种类型:一类探测高度为地面上方 500~9250 m,一类探测高度为地面上方 7500~16250 m)和阿拉斯加的 3 部 449 MHz 的风廓线雷达组成(Weber et al, 1990; van de Kamp, 1993; St-James et al, 2005)。早期,风廓线雷达资料主要被用来了解和研究中尺度天气结构。例如,用风廓线雷达资料来研究斜压带、重力波等大气结构特征(Bluestein et al, 1995; Trexler et al, 2000),进一步用风廓线雷达资料反演质量场诊断这些大气特征的结构(Kuo et al, 1985; Gal-Chen, 1988; Bus-singer et al, 2001)。风廓线雷达资料也对对流天气(如雷暴、龙卷、暴雪)主观预报有很大帮助(Benjamin et al, 2004b)。近年来,风廓线雷达资料被应用到中尺度和全球数值预报系统的资料同化中(Bouttier, 2001; Koch et al, 2004; Benjamin et al, 2004a),美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲中期天气预报中心(ECMWF)已经开始同化风廓线雷达资料,快速更新循环(RUC)资料同化系统也尝试同化风廓线雷达资料(Benjamin et al, 2004a; St-James et al, 2005)。但是,目前我国的相关研究工作主要集中在风廓线雷达组网观测数据之间的比对分析(邓闯等, 2012; 吴志根等, 2013; 董丽萍等, 2014; 王令等, 2014; 李喆等, 2015)、风廓线雷达反演技术研究(孙康远等, 2013; 何越等, 2014)、及风廓线雷达资料在主观预报中的应用研究(何平等, 2009; 吴志根, 2012; 汪学渊等, 2013; 施红蓉等, 2014),而风廓线雷达资料在我国业务数值预报系统中的应用却还很少。

到 2010 年 10 月底前,我国已布设了 33 部风廓线雷达,其中有 7 部对流层风廓线雷达和 26 部边界层风廓线雷达(包括 11 部固定式和 15 部移动式)。

我国计划在现有资源的基础上,建设一个包含 227 个风廓线雷达测站的观测网,其中包含 60 个已建风廓线雷达测站和 167 个拟建风廓线雷达测站。

拟建观测网中各测站的空间位置已经初步确定,面临的一个主要问题是风廓线雷达的选型。气象业务中应用较多的是对流层风廓线雷达和边界层风廓线雷达。在我国气象业务中,对流层风廓线雷达又分为对流层 I 型(也称为高对流层风廓线雷达)和对流层 II 型(也称为低对流层风廓线雷达),对流层 I 型探测高度要求达到 16 km,对流层 II 型探测高度应不小于 6 km(胡明宝等, 2010)。

促进风廓线雷达资料在我国业务数值预报系统(如 GRAPES\_MESO)中的应用也是拟建风廓线雷达观测网未来重要服务目标之一。鉴于风廓线雷达资料在我国业务数值预报系统中的应用较少,因此迫切需要一些定性和定量结果来做参考,以便初步了解这个拟建观测网对我国业务数值预报系统的可能影响作用。

观测系统模拟试验(OSSEs)(Arnold et al, 1986)已经被广泛地应用在评估观测策略对数值天气预报的影响研究中。本文设计了一系列观测系统模拟试验,初步估计拟建观测网中风廓线雷达不同选型对 GRAPES\_MESO 数值预报系统的可能影响,并比较了风廓线雷达资料、探空资料和两类资料混合使用时对 GRAPES\_MESO 系统影响的差别。

## 1 试验设计

选择 2012 年 7 月的一次伴随切变线天气系统降水过程作为研究个例,在 OSSEs 试验过程中,观测资料使用探空、边界层风廓线雷达和对流层 II 型风廓线雷达资料。

### 1.1 模拟真实大气

基于 WRF-ARW (V3.2)数值模式,使用 2012 年 7 月 11 日 1200 UTC 的 NCEP 的 GFS 分析场作为初始场,2012 年 7 月 11 日 1200 UTC 的 GFS 预报场作为边界条件,从 2012 年 7 月 11 日 1200 UTC 积分 84 h 至 15 日 0000 UTC,从初始时刻开始使用二重嵌套网格(D1 水平分辨率为 30 km, D2 水平分辨率为 10 km, D2 水平格点数为  $550 \times 430$ )。为了保证模拟有足够长时间生成中尺度信息,取模拟结果的 2012 年 7 月 12 日 0000 UTC 至 15 日 0000

UTC 来描述真实大气,并进一步使用 WRFcnv<sup>①</sup> 将模拟结果从 Lambert 坐标水平插值到经纬度网格坐标( $15^{\circ}\sim 64.35^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145.15^{\circ}\text{E}$ )中,作为真实大气(Nature Run, NR)。

## 1.2 模拟观测

基于 NR 模拟结果,对探空测站资料及拟建的 风廓线雷达网中测站水平风场资料进行模拟。产生虚拟观测资料的过程包括两步:根据各种类型观测特点,将格点资料插值为站点资料;并在插值后得到的站点资料中加入观测代表性误差和包含次网格尺度信息的高斯分布型随机误差。

对于已经存在的探空观测,从 GRAPES\_MESO 的变分同化系统预处理得到的 TEMP 文件中获取实时的探空站点的经度、纬度、观测层的气压或高度信息。对每个观测站点,使用 NR 资料(经纬度格点资料)依次进行垂直方向和水平方向插值。观测代表性误差在垂直方向根据气压值范围不同分为 16 种类型;加入观测代表性误差和随机扰动的变量为位势高度、纬向风、经向风和温度。

根据相关单位提供的拟建风廓线雷达网测站的经度、纬度信息,拟建观测网内共有 227 个测站。考

虑到有研究表明高对流层(相当对流层 I 型)和低对流层风廓线雷达(相当对流层 II 型)的同化效果基本一致(Benjamin et al, 2004a; 2010),这里只对低对流层(对流层 II 型)和边界层风廓线雷达进行分析。根据风廓线雷达的探测高度范围及分辨率信息,在模拟观测中将两类风廓线雷达的探测高度及分辨率做如下定义:

边界层风廓线雷达:探测高度为  $0.1\sim 5\text{ km}$ ,垂直分辨率为  $0.1\text{ km}$ ,共计 50 层。

对流层 II 型风廓线雷达:探测高度为  $0.15\sim 8.1\text{ km}$ ,垂直分辨率为  $0.15\text{ km}$ ,共计 54 层。

根据拟建风廓线雷达站点的经、纬度和雷达类型信息,基于 NR 资料,对每个观测站点依次进行垂直和水平方向插值,插值过程中仅使用高度插值。观测代表性误差在垂直方向根据气压值范围不同分为 16 种类型(与前文提到的探空类型误差值不同);加入观测代表性误差和随机扰动的变量为气压、纬向风和经向风。

图 1 中给出了虚拟探空测站(图 1a)和虚拟风廓线雷达测站(图 1b)的位置分布。其中,虚拟探空测站的位置是根据当时业务中使用的真实探空测站位置设定的。

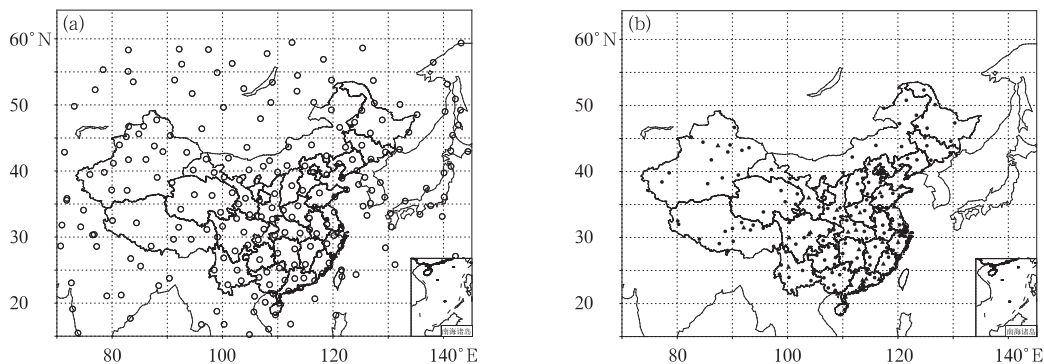


图 1 虚拟探空测站(a)和虚拟风廓线雷达测站(b)的位置分布

(在虚拟风廓线雷达测站分布图中,三角符表示已建好的 60 个风廓线雷达测站,实心圆表示拟建的 167 个测站)

Fig. 1 Distribution of simulated observation stations of the sounding (a) and wind-profiling radar (b)

(In Fig. 1b the solid triangles stand for 60 existing stations and solid circles represent 167 proposed stations)

## 1.3 同化系统和预报模式

预报模式使用 GRAPES\_MESO 系统(V3. 3. 2. 4)的模式部分,水平分辨率取  $0.15^{\circ}\times 0.15^{\circ}$ ,水平积分范围为  $15^{\circ}\sim 64.35^{\circ}\text{N}$ 、 $70^{\circ}\sim 145.15^{\circ}\text{E}$ 。同化系

统使用 GRAPES\_MESO 系统(V3. 3. 2. 4)中探空资料和 VAD 资料的 3DVar 同化系统(VAD 同化中只同化水平风场),并将 VAD 同化系统的气压插值改为高度插值。虚拟的风廓线资料以 VAD 资料格式同化进入 GRAPES\_MESO 模式中。

① WRFcnv 是由中国气象局数值预报中心的邓莲堂开发的一个 WRF 模式后处理程序包。

## 1.4 试验方案

为了考察分别同化探空、对流层 II 型风廓线雷达、边界层风廓线雷达、以及混合使用探空和(对流层 II 型)风廓线雷达资料对上述 GRAPES\_MESO 数值预报系统的影响,设计了以下参考试验(EXP-CTRL)和四个敏感性试验:

试验 EXP-CTRL:初猜场使用 T639 模式 2012 年 7 月 11 日 1200 UTC 的 12 h 预报场,边条件使用相应的 T639 模式预报场,用 GRAPES\_MESO 模式积分 72 h(即 2012 年 7 月 12 日 0000 UTC 至 15 日 0000 UTC)。

试验 EXP-TEMP:初猜场使用 T639 模式 2012 年 7 月 11 日 1200 UTC 的 12 h 预报场,只同化虚拟的探空观测(215 个测站),边条件使用相应的 T639 模式预报场,用 GRAPES\_MESO 模式积分 72 h。

试验 EXP-WPR1:与试验 EXP-TEMP 的差别是只同化虚拟的对流层 II 型风廓线雷达资料的水平风场,其他与 EXP-TEMP 都相同。

试验 EXP-WPR2:与试验 EXP-TEMP 的差别是只同化虚拟的边界层型风廓线雷达资料的水平风场,其他与 EXP-TEMP 都相同。

试验 EXP-TW1:与试验 EXP-TEMP 的差别是同时同化虚拟探空观测资料和对流层 II 型风廓线雷达资料的水平风场,其他与 EXP-TEMP 都相同。

## 2 结果分析

### 2.1 水平风场分析

图 2 给出了初始时刻 850 hPa 高度上(相对参考试验 EXP-CTRL)的水平风场分析增量。同化风廓线雷达资料后(图 2b,2c),在我国大陆上,6 m·s<sup>-1</sup> 以上的水平风速增量范围远大于仅同化探空资料的情况(图 2a),水平风速增量主要位于长江流域一带和内蒙古中部、陕西、山西附近;同化对流层 II 型风廓线雷达资料(EXP-WPR1,图 2b)比同化边界层风廓线雷达资料(EXP-WPR2,图 2c)的水平风速增量强度略大;EXP-WPR2 的水平风速增量的影响范围在长江流域以南地区较 EXP-WPR1 略大,3 m·s<sup>-1</sup> 以上的水平风速增量已经覆盖广西、湖南、江西等地;与仅同化风廓线雷达资料相比,同时同化探空和风廓线雷达资料

(EXP-TW1,图 2d)对风速增量有减弱作用,特别是在长江流域及其以南地区。

850~400 hPa 的水平风场分析增量分布结果显示,EXP-WPR1 与 EXP-WPR2 相似,但是 EXP-WPR2 的影响范围在低层(如 850 hPa)略大,而 EXP-WPR1 的影响范围和强度在中高层(如 500 和 400 hPa)较大(图略)。

在 400 hPa 高度上,同化风廓线雷达资料的试验(EXP-WPR1 和 EXP-WPR2)在初始时刻仍可以明显看到超过 3 m·s<sup>-1</sup> 水平风速分析增量的存在,而 300 hPa 高度以上的水平风速分析增量达不到 3 m·s<sup>-1</sup> (图略),这说明风廓线雷达资料同化分析的影响高度极限可能在 300 hPa 附近。图 3a 计算了南方切变气流上游地区附近(25.05°~34.5°N、92.2°~100°E)相对参考试验的水平风速均方根误差

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\omega s_i^{\text{exp}} - \omega s_i^{\text{ctrl}})^2}{n}} \quad (1)$$

式中, $\omega s^{\text{ctrl}}$  表示参考试验 EXP-CTRL 的水平风速, $\omega s^{\text{exp}}$  表示各敏感性试验的水平风速, $n$  是计算区域内的水平格点数。在图 3a 中, RMSE 在 300 hPa 上方和 100 hPa 上方各有一次较明显的转折,再次表明风廓线雷达资料同化分析的影响高度极限在 300 hPa 附近。在同化探空的试验中,均方根误差在 100 hPa 上方也存在明显转折,这可能是数值模式或大气本身的物理特性造成的。

另外,也对我国大部分地区(20.1°~50.1°N、90.1°~130°E)的水平风速均方根误差 RMSE 进行了计算(图 3b)。比较探空资料和风廓线雷达资料对分析场的水平风速影响,同化风廓线雷达资料对 500 hPa 高度以下的水平风速修正作用更大,同化探空资料对 500 hPa 高度以上的水平风速修正作用更大(图 3a,3b)。同时同化两类观测(EXP-TW1)可以把两类资料在高、低空的优势更好地发挥出来。在 300 hPa 以下高度,同化对流层 II 型风廓线雷达资料对水平风速的分析场影响比同化边界层风廓线雷达略大(图 3)。

同化两类风廓线资料的试验(EXP-WPR1 和 EXP-WPR2)在积分 6 h 以后,水平风场的分析增量都随时间在垂直方向上进行了传播,在 250 hPa 高度上可以明显看到超过 3 m·s<sup>-1</sup> 的风速增量(图略)。EXP-WPR1 和 EXP-WPR2 在 200 hPa 上的

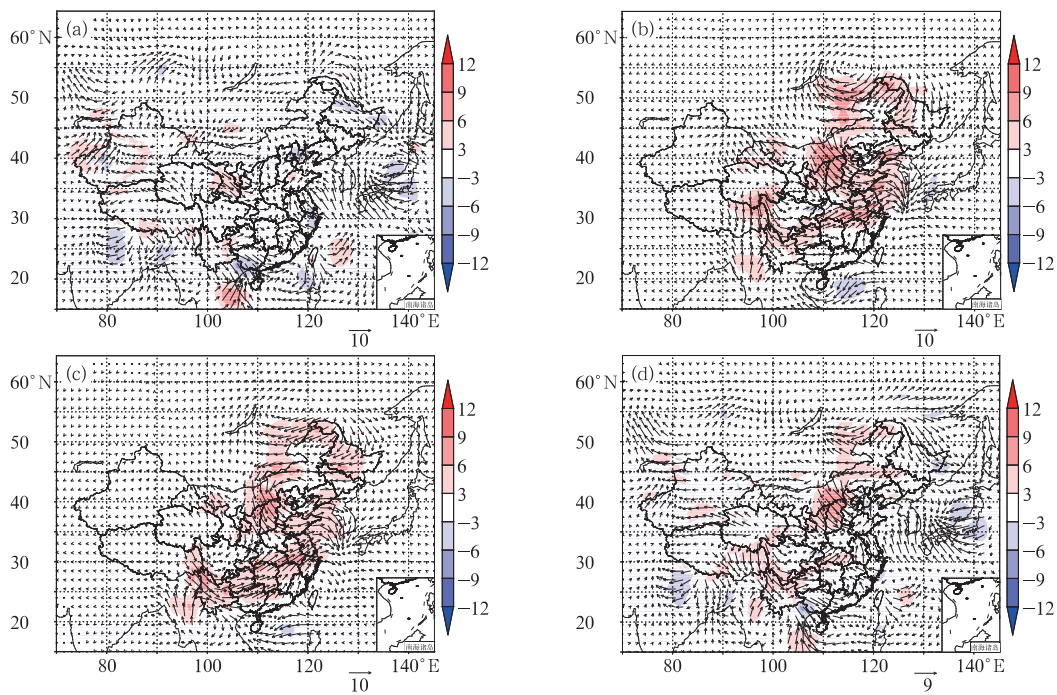


图 2 2012 年 7 月 12 日 0000 UTC 初始时刻 850 hPa 层的水平风速分析增量(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)同化探空 EXP-TEMP, (b)同化对流层 II 型风廓线雷达资料 EXP-WPR1,  
(c)同化边界层风廓线雷达资料 EXP-WPR2, (d)同时同化探空和风廓线雷达资料 EXP-TW1

Fig. 2 The horizontal wind velocity incremetn at 850 hPa  
at 0000 UTC 12 July 2012 (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a) EXP-TEMP, (b) EXP-WPR1, (c) EXP-WPR2, (d) EXP-TW1 and the EXP-CTRL experiment

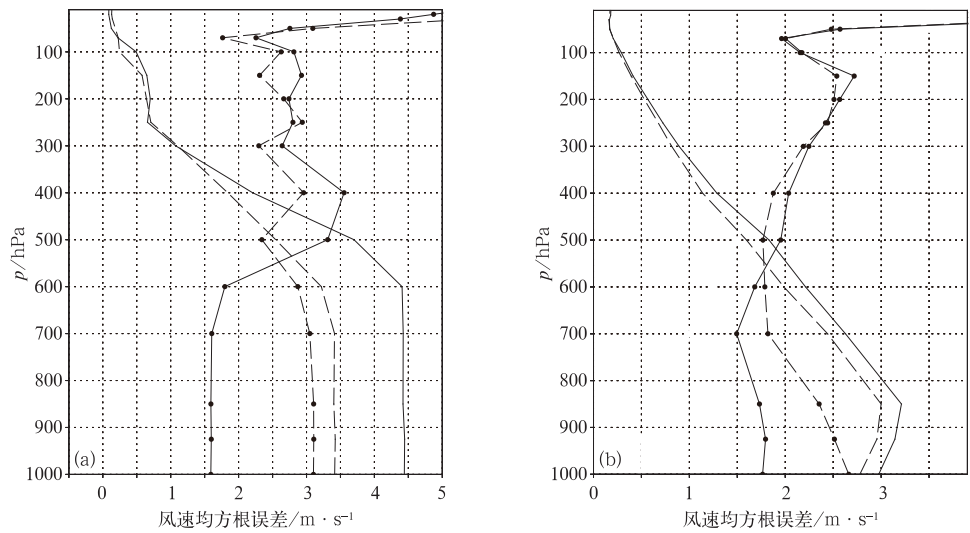


图 3 2012 年 7 月 12 日 0000 UTC 初始时刻的水平风速均方根误差 RMSE(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(a)25.05°~34.5°N,92.2°~100°E 区域, (b)20.1°~50.1°N,90.1°~130°E 区域  
(实心圆实线:EXP-TEMP,实线:EXP-WPR1,虚线:EXP-WPR2,实心圆虚线:EXP-TW1)

Fig. 3 The wind RMSE for analyses in (a) 25.05°—34.5°N, 92.2°—100°E and (b) 20.1°—50.1°N,  
90.1°—130°E regions on 0000 UTC 12 July 2012 (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

(Analysese are verified against the EXP-CTRL experiment; EXP-TEMP: solid with real cycle,  
EXP-WPR1: solid, EXP-WPR2: dashed, EXP-TW1: dashed with cycle)



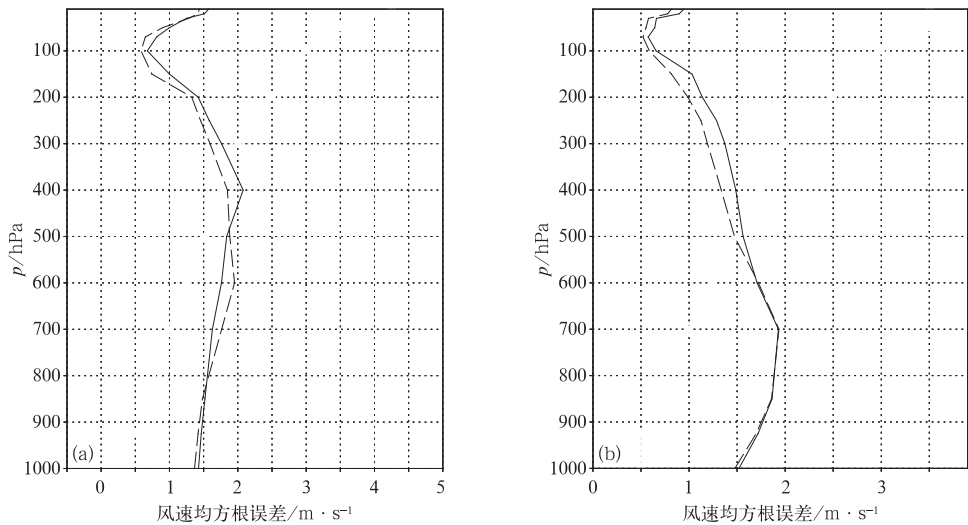


图 4 同图 3,但为 2012 年 7 月 12 日 0600 UTC EXP-WPR1 和 EXP-WPR2

Fig. 4 Same as in Fig. 3, but for EXP-WPR1 and EXP-WPR2 on 0600 UTC 12 July 2012

水平风速均方根误差初始时刻大约为  $0.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 3),积分 6 h 增加到约  $1.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  或  $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (图 4)。

2.2 6 h 累积降水预报分析

2012 年 7 月 12 日 0000—0600 UTC,长江中下

游一带存在一条明显降水带,60 mm 以上的强降水中心主要位于湖北省东部和重庆东北部(图 5a)。参考试验(EXP-CTRL)对该降水带的模拟几乎是失败的(图 5b)。同化探空资料之后,基本上模拟出了该降水带,只是降水强度偏弱(图 5c)。同化对流层 II 型风廓线雷达资料之后,模拟结果仅显示重庆东

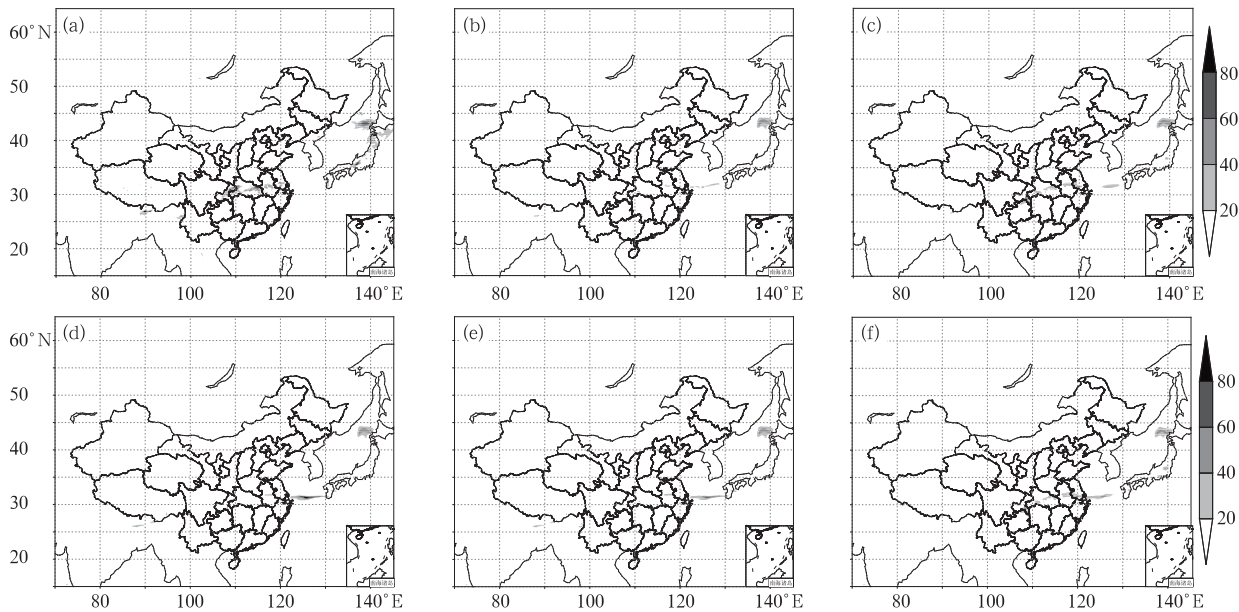


图 5 2012 年 7 月 12 日 0000—0600 UTC 累积降水的模拟(单位: mm)

(a)真实大气 EXP-NR, (b)参考试验 EXP-CTRL, (c)同化探空试验 EXP-TEMP,  
(d)同化对流层 II 型风廓线雷达资料试验 EXP-WPR1, (e)同化边界层风廓线雷达资料  
试验 EXP-WPR2, (f)同时同化探空和风廓线雷达资料试验 EXP-TW1

Fig. 5 The 6 h precipitation simulations from 0000 UTC 12 to 0600 UTC 12 July 2012 (unit: mm)

(a) EXP-NR, (b) EXP-CTRL, (c) EXP-TEMP, (d) EXP-WPR1, (e) EXP-WPR2, (f) EXP-TW1

部和长江下游有较弱降水(不超过 40 mm)(图 5d);而同化边界层风廓线雷达资料之后,重庆东部的降水几乎消失(图 5e)。同时同化探空和对流层 II 型风廓线雷达资料,整个雨带降水强度模拟偏弱,湖北东部和重庆东部的降水位置较 EXP-TEMP 略有所调整、长江流域下游雨带范围略有增大(图 5f)。

### 3 结论和讨论

风廓线雷达的选型是计划建设风廓线雷达观测网时需要考虑的一个重要问题,风廓线雷达资料在数值预报系统中的应用也是风廓线雷达观测网未来服务的重要目标之一。为了初步考查我国拟建风廓线雷达观测网在 GRAPES\_MESO 系统中的影响作用,我们通过观测系统模拟试验(OSSEs)对一个南方切变线系统降水个例进行了初步模拟和分析。在观测系统模拟试验中,参考试验不同化任何观测资料,并设计了四个进行资料同化分析的敏感性试验与参考试验进行比较,试验结果表明:

(1) 同化分析对流层 II 型和边界层型风廓线雷达资料,虽然两者初始时刻的水平风场分析增量分布相类似,但从水平风场分析增量的均方根误差来看,同化对流层 II 型风廓线雷达资料对 300 hPa 以下水平风场的修正比边界层型风廓线雷达资料略大。

(2) 风廓线雷达资料对 500 hPa 以下高度水平风场分析影响较大,探空资料对 500 hPa 以上高度水平风场分析影响较大;同时同化这两类观测资料有助于修正整层分析场的水平风速。

(3) 初始时刻,风廓线雷达资料的同化分析影响高度可上传到 300 hPa 附近;经过 6 h 的传播,其影响向上可以传播至 250 hPa 高度以上。这与前人使用观测系统试验(OSE)获得的结果相类似(Benjamin et al, 2004a; 2010)。

(4) 同化分析风廓线雷达资料对 6 h 累积降水预报有一定的影响,但是这种影响相对于同化分析探空资料的影响明显偏弱。风廓线雷达资料与探空资料混合进行同化分析对降水位置的调整略有改进。风廓线雷达资料同化对降水预报的贡献偏弱的原因是因为其仅包含了风场信息,而探空资料还包含了水汽、温度、气压等信息。

综上,在我国数值天气预报系统(GRAPES-MESO 系统)中,风廓线雷达资料若要发挥最大的

作用,可能需要与其他观测仪器配合使用;对于拟建观测网中所布风廓线雷达型号,从数值预报应用的角度出发,建议考虑以对流层 II 型风廓线雷达为主进行布局。

### 参考文献

- 董丽萍,吴蕾,王令,等. 2014. 风廓线雷达组网资料初步对比分析. 气象, 40(9):1145-1151.
- 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.
- 何平,朱小燕,阮征,等. 2009. 风廓线雷达探测降水过程的初步研究. 应用气象学报, 20(4):465-470.
- 何越,何平,林晓萌. 2014. 基于双高斯拟合的风廓线雷达反演雨滴谱. 应用气象学报, 25(5):570-580.
- 胡明宝,李妙英. 2010. 风廓线雷达的发展与现状. 气象科学, 30(5):724-729.
- 李喆,何平,潘新民,高玉春,吴蕾. 2015. 风廓线雷达回波强度和速度标定问题研究. 气象, 41(8):1023-1027.
- 施红蓉,李峰,吴蕾,等. 2014. 风廓线雷达对降水相态变化的观测分析. 气象, 40(10):1259-1265.
- 孙康远,阮征,魏鸣,等. 2013. 风廓线雷达反演大气比湿廓线的初步试验. 应用气象学报, 24(4):407-415.
- 汪学渊,李栋,任雍,等. 2013. 风廓线雷达资料在台风苏拉登陆过程中的应用初探. 气象, 39(11):1431-1436.
- 王令,王国荣,古月,李宏宇,马莉,郭金兰,乔林. 2014. 风廓线雷达垂直径向速度应用初探. 气象, 40(3):290-296.
- 吴志根. 2012. 边界层风廓线雷达在降水时段中的在线分析应用研究. 气象, 38(6):758-763.
- 吴志根,徐同,丁若洋,等. 2013. 上海组网边界层风廓线雷达与宝山二次雷达测风数据比较分析. 气象, 39(3):370-376.
- Arnold C, Dey C. 1986. Observing-Systems Simulation Experiments: Past, Present, and Future. Bull Amer Meteor Soc, 67:687-695.
- Benjamin S G, Schwartz B E, D Dezső, et al. 2004a. An hourly assimilation-forecast cycle: The RUC. Mon Wea Rev, 132:495-518.
- Benjamin S G, Schwartz B E, Szoke E J, et al. 2004b. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting. Bull Amer Meteor Soc, 85:1871-1886.
- Benjamin S G, Schwartz B E, B D Jamison, et al. 2010. Relative Short-Range Forecast Impact from Aircraft, Profiler, Radiosonde, VAD, GPS-PW, METAR, and Mesonet Observations via the RUC Hourly Assimilation Cycle. Mon Wea Rev, 138:1319-1343.
- Bluestein H B, Speheger D A. 1995. The dynamics of an upper-level trough in the baroclinic westerlies: Analysis based upon data from a wind profiler network. Mon Wea Rev, 123:2369-2383.
- Bouttier F. 2001. The use of profiler data at ECMWF. ECMWF Research Department Tech. Memo. 331, 22pp. [Available from ECMWF, Shinfield Park, Reading RG2 9AX, United

- Kingdom. ]
- Bussinger S, Adams M E, Koch S E, et al. 2001. Extraction of geopotential height and temperature structure from profiler and rawinsonde winds. *Mon Wea Rev*, 129:1729-1739.
- Gal-Chen T. 1988. A theory of the retrievals of virtual temperature from remote measurements of horizontal winds and thermal radiation. *Mon Wea Rev*, 116:1302-1319.
- Koch S E, Benjamin S G, Schwartz B E, et al. 2004. The value of wind profiler data in U. S. weather forecasting. Preprints, 20th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/16th Conf. on Numerical Weather Prediction, Seattle, WA, Amer Meteor Soc, CD-ROM, 6. 1.
- Kuo Y H, Anthes R A. 1985. Calculation of geopotential and temperature fields from an array of nearly continuous wind observation data. *J Atmos Oceanic Technol*, 2:22-34.
- St-James J S, Stéphane Laroche. 2005. Assimilation of Wind Profiler Data in the Canadian Meteorological Centre's Analysis Systems. *J Atmos Oceanic Technol*, 22:1181-1194.
- Trexler B L, Koch S E. 2000. The life cycle of a mesoscale gravity wave as observed by a network of Doppler wind profilers. *Mon Wea Rev*, 128:2423-2446.
- van de Kamp D W. 1993. Current status and recent improvements to the Wind Profiler Demonstration Network. Preprints, 26th Int. Conf. on Radar Meteorology, Norman, OK, Amer Meteor Soc, 552-554.
- Weber B L, Coauthors. 1990. Preliminary evaluation of the first NOAA demonstration network profiler. *J Atmos Oceanic Technol*, 7:909-918.