doi:10.11676/qxxb2015.048 气象学报

多普勒雷达资料同化在“7.21”北京特大暴雨个例中的应用*

王 洪[1,2] 王东海[2] 万齐林[1]
WANG Hong[1,2] WANG Donghai[2] WAN Qilin[1]

1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所/中国气象局广东省区域数值天气预报重点实验室,广州, 510080
2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京, 100081
1. *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology/Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, CMA, Guangdong, Guangzhou* 510080, *China*
2. *State Key Laboratory of Severe Weather (LaSW), Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration, Beijing* 100081, *China*
2014-11-21 收稿,2015-03-13 改回.

王洪,王东海,万齐林. 2015. 多普勒雷达资料同化在“7.21”北京特大暴雨个例中的应用. 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. *Acta Meteorologica Sinica*, 73(4):679-696

Abstract Based on the WRF (Weather Research Forecast) model and the GSI (Gridpoint Statistical Interpolation) assimilation system, the impact of the assimilating four Doppler weather radars (DWR) reflectivity and radial velocity (V_r) for quantitative precipitation forecasts (QPFs) of the "7.21" Beijing excessive storm have been examined. The GSI directly assimilates V_r, while indirectly assimilates the reflectivity through the cloud analysis. The radar data are assimilated every 30 min from 21:00 UTC 20 Jul to 00:00 UTC 21 Jul 2012. The numerical experiments demonstrate that the DWR data assimilation can improve nowcast and short-term precipitation forecasts, whose ETS scores averagely increase by 0.2. The reflectivity data are used primarily in a cloud analysis that retrieves the amount of hydrometeors and adjusts the in-cloud temperature and moisture which have direct influence on generating precipitation. The assimilating reflectivity makes the root-mean-square error (RMSE) of the geopotential height averaged over between 650 and 250 hPa decreases by 8 gpm. The direct assimilation of DWR V_r in GSI exerts a sure influence in mesoscale wind fields. Through the quantitative verification of the simulation results, the forecast with reflectivity assimilation is better than that with the V_r assimilation.
Key words GSI system, Doppler weather radar data, "7.21" Beijing excessive storm

摘 要 基于WRF(Weather Research Forecast)模式和GSI(Gridpoint Statistical Interpolation)同化系统,研究了同化4部多普勒雷达探测资料对“7.21”北京特大暴雨过程中降水预报的改善作用。GSI系统直接同化径向风,而采用云分析的方式间接同化反射率。2012年7月20日21时—21日00时(世界时)雷达探测资料同化试验采用30 min循环同化径向风和反射率资料。结果表明,循环同化雷达探测资料改善了短时(0—6 h)和短期(0—24 h)降水预报,ETS评分提高了约0.2。同化反射率资料增加了初始场的水凝物,改善了温度场分布,直接影响了降水的形成,同时还使650—250 hPa位势高度的均方根误差平均降低了8 gpm。直接同化径向风资料对中尺度风场产生了一定影响。ETS评分结果表明:同化反射率资料的效果要优于同化径向风。

* 资助课题:国家自然科学基金(41475102)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406009)、广东省科技计划项目(2014A061400012)。
作者简介:王洪,主要从事资料同化方面的研究。E-mail:wangh29@mail3.sysu.edu.cn
通讯作者:王东海,E-mail:wangdh@cams.cma.gov.cn

关键词 GSI系统，多普勒雷达资料，“7.21”北京特大暴雨
中图法分类号 P456.7

1 引 言

在过去几十年里，不断提高的计算机能力和日臻完善的模式物理过程显著提高了数值模式的分辨率，目前大多数中小尺度数值模式（Alexander，et al，2010；Baldauf，et al，2011；Saito，et al，2006；Tang，et al，2013）的水平分辨率已不低于3 km。分辨率的提高使得数值模式能够模拟预报风暴尺度天气系统。然而，针对中尺度对流系统，可靠的数值预报不仅仅需要完善的高分辨率数值模式，同时还需要高效的同化系统提供精确的初始场。尽管目前种类繁多的观测平台能够为同化系统提供各种各样的观测资料，但能够满足高分辨率数值模式初始化要求的并不多。多普勒天气雷达正是少数能够满足要求的观测平台之一，同时也是这些观测手段中唯一一个实现了业务化的观测平台。自21世纪伊始中国开始布网新一代多普勒天气雷达，截至2010年年底已完成布设164部，计划未来建成包含216部地基多普勒天气雷达的观测网。多普勒天气雷达主要提供反射率、径向速度和速度谱宽3种观测信息。其观测资料的空间分辨率达到了1 km，时间分辨率为6 min，能够提供强对流系统内部三维结构信息。多普勒雷达观测无论是时间分辨率还是空间分辨率都能完全满足高分辨率数值模式初始化的要求，同时也是目前唯一可用于同化系统的高时空分辨率资料。

由于雷达径向风和反射率资料具有较高的时间分辨率，因此理想的同化系统是四维变分同化（顾建峰等，2004），但四维变分同化需要发展伴随模式，并且对计算条件要求也较高，因而当前大多数中尺度同化系统都采用相对简单的三维变分同化（Hu，et al，2006b；Xiao，et al，2005，2007a）或者半经验的云分析（Hu，et al，2006a，2007）同化雷达探测资料，同样取得了不错的效果（Xiao，et al，2007b；盛春岩等，2006a；徐广阔等，2009）。

目前绝大多数同化系统能够同化的多普勒雷达探测资料有径向风和反射率两类，针对这两类雷达探测资料的同化方法有反演同化和直接同化两种。

径向风的直接同化是指将模式空间风矢量直接投影到雷达坐标平面，计算观测增量。ARPS（Xue，et al，2003）、WRF（Xiao，et al，2007b）、MM5和GSI均采用直接同化的方式同化径向风资料。Xiao等（2005）更是在MM5-3Dvar系统的雷达观测算子中加入了垂直速度，并添加了基于理查森方程热、动力平衡的约束条件，因此提高了对暴雨预报的准确率。间接同化径向风也被称作反演同化，即先利用VAD（Velocity Azimuth Display）（Browning，et al，1968）、VVP（Volume Velocity Processing）（Boccippio，1995）等风场反演手段反演局地的平均水平风速廓线，最后将反演廓线放入同化系统同化。GSI和WRFDA等同化系统也都具备同化径向风反演风场的能力。但VAD、VVP等反演方法使用了一些假定条件，如水平风场呈线性分布、局地均匀风等。这会给反演风场带来一定的反演误差，而反演风场本就带有径向风的观测误差。两种误差相叠加，会增加变分同化时给定观测误差的难度。因此越来越多的研究选择直接同化径向风资料（Li，et al，2012；陈敏等，2014）。

同化反射率也分为直接同化和间接同化。MM5-3Dvar（Xiao，et al，2007a）和WRFDA使用的同化方式就属于直接同化，该方法采用总水物质作为控制变量，在极小化过程中通过暖云模式计算水汽、雨水和云水混合比的增量。但是，雷达反射率是雨水、云水、水汽以及云冰、雪、雹等水凝物的总体效应，简单的暖云模式只能体现部分粒子的分布特征。而另外一种半经验的间接同化反射率的方式——云分析则考虑了冰相水凝物对反射率的贡献，比较符合物理事实。Zhang等（1998）基于LAPS开发了ARPS的云分析系统。Xue等（2003）则利用该系统，用多普勒雷达探测资料进行初始场调整和云分析，发现同化雷达探测资料能够减少模式的起转时间，更精确地模拟出初始时刻的风暴。Hu等（2006a，2006b）在模拟龙卷过程中发现同化雷达探测资料能够更加准确地预报龙卷的位置，并且反射率的作用更加明显。中国早期大多使用Z-q_r关系、物理初始化方法等方案从反射率资料中反演得到雨水、云水等云微物理量，然后以此为依据对初始场中相关变量进行调整（郭霞等，1999；李永平等，2004；

刘红亚等,2007a,2007b;杨毅等,2008)。但上述反演方法都属于简单的暖云方案,与真实的物理过程有较大差距。因此,盛春岩等(2006a,2006b)较早引入了 ARPS 的同化系统,该同化系统包含一个复杂的云分析模块。随后徐广阔等(2009)将 ARPS 同化结果应用于 WRF 预报中,结果表明,雷达探测资料同化同样提高了定量降水预报评分。相对于直接同化反射率资料(陈力强等,2009;杨银等,2013;赵文斌等,2011),云分析包含相对完整的微物理过程,占用的计算机资源较少,是一种简单而有效的同化手段。因此,屈右铭等(2010)基于 ARPS 云分析模块开发了 GRAPES-Meso 模式的云分析系统,并通过个例试验验证了其分析效果。近年来发展十分迅速的 GSI 也拥有一套完整的云分析系统(Hu,et al,2007)。有关 GSI 云分析系统的信息将在 2.2 节详细介绍。

作为近年来 NCEP 主推的同化系统,GSI 在业务和科研方面都有着广泛的应用。NOAA 的北美资料同化系统(NDAS)和全球资料同化系统(GDAS)都先后采用 GSI 作为其同化核心,全球模式 T639(管成功等,2008)、北美区域业务系统 RAPid Refresh、台风模式 HWRF(Vijay,et al,2013)也都使用 GSI 作为其同化系统。国际上已经有较多与 GSI 有关的研究:Ma 等(2009)以 GSI 系统为框架测试评估了 GPS 掩星资料的局地和非局地观测算子的效果;Zou 等(2011)在 GSI 中实现了 GOES 成像仪辐射资料的直接同化;Xu 等(2009)则实现了 GSI 在西南亚复杂地形下的应用;还有一些基于 GSI 的混合同化系统(Pan,et al,2014;Wang,et al,2013,2014)、集合同化系统(Zhu,et al,2013)的研究。而中国关于 GSI 的研究工作还比较少(郝民等,2010;徐建军等,2011),关于多普勒雷达探测资料在 GSI 中的同化应用则更少。

2012 年 7 月 21 日 02—20 时(世界时,下同)北京市大部分地区出现了大暴雨、局地特大暴雨天气过程。截至 21 日 22 时,全市平均降水量 170 mm,其中主城区平均降水量 215 mm,最大降水量出现在房山区河北镇,达 460 mm。强降水造成北京市因灾死亡 78 人,经济损失达 116.4 亿元。尤其房山区及其附近强降水造成拒马河洪峰下泄,导致多人死亡。该过程是北京市自 1951 年有气象观测记录以来最强的一次天气过程。此次暴雨过程引起了气象学者的广泛关注,姜晓曼等(2014)检验分析了北京市气象局新的快速更新循环同化和预报系统(BJ-RUC v2.0)的 3 km 高分辨率模式分析场和预报场,分析探讨了此次极端暴雨预报不佳的原因。冉令坤等(2014)利用 NCEP 的全球预报系统的预报场资料计算和分析一系列动力因子。周玉淑等(2014)用 WRF 模式输出的高分辨率模拟资料分析了影响此次北京特大暴雨的辐合线及辐合线上生成的中尺度低涡的热、动力结构及其演变。李俊等(2015)采用多套扰动方案对此次过程进行了集合降水预报试验。这些研究工作从数值模式的多个方面入手,分析了"7.21"特大暴雨过程的降水预报情况。然而,关于多普勒雷达探测资料同化的研究则很少。

因此,本研究的主要目的是将中国的多普勒雷达探测资料应用到 GSI 系统中,并以"7.21"北京特大暴雨为例,研究同化多普勒雷达探测资料对降水预报的作用和效果。文中采用定性分析和 ETS、均方根误差等定量方法分析同化和预报结果。

2　GSI 及其云分析系统简介

2.1　GSI 三维变分同化简介

GSI 是由 NCEP 开发的全球/区域统一的三维变分同化系统,其目的是取代 SSI(Spectral Statistical Interpolation)(Parrish,et al,1992) 同化系统。本质上 GSI 系统是一个三维变分同化系统,其核心原理是通过迭代求解一个目标函数的极小值,获得分析时刻大气真实状态的最优估计。其目标函数的表达式为

$$J(X)=\frac{1}{2}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}_{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{-1}(\boldsymbol{X}-\boldsymbol{X}_{\mathrm{b}})+\frac{1}{2}[\boldsymbol{y}_{\mathrm{o}}-\boldsymbol{H}(\boldsymbol{X})]^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}^{-1}[\boldsymbol{y}_{\mathrm{o}}-\boldsymbol{H}(\boldsymbol{X})]+\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}} \quad (1)$$

式中,$\boldsymbol{X}$ 是分析场,$\boldsymbol{X}_{\mathrm{b}}$ 是背景场,$\boldsymbol{y}_{\mathrm{o}}$ 是观测值,$\boldsymbol{B}$ 为背景误差协方差矩阵,$\boldsymbol{R}$ 是观测误差,$\boldsymbol{H}$ 是观测算子,$\boldsymbol{J}_{\mathrm{c}}$ 是约束项。观测算子是模式空间向观测空间的投影函数。相对于 SSI,GSI 最大的进步是构建系统的基础由原来的谱空间变为现在的模式格点空间,这样使得背景误差协方差拥有更多的自由度,如非均匀性和各向异性(Wu,et al,2002),同时也使得增量信息能够依赖于地形或天气系统形式传播。背景误差协方差是由"NMC"方法估算的依纬度变化的矩阵。GSI 使用共轭梯度极小化算法作为其迭代

方法,同时在迭代过程中采用递归滤波将误差信息传播到周围点。另外,为减小分析增量的噪音,GSI系统还引入了切线性正则模约束作为动力约束项(Kleist,et al,2009)。

GSI中雷达径向风的观测算子为

$$V_r = u\cos\theta + v\sin\theta \tag{2}$$

式中,(u,v)是大气水平风场,θ是方位角。由于GSI的控制变量不包含垂直速度w,所以目前的径向风观测算子不包含w项。

2.2 云分析

云分析是同化雷达反射率资料的一种简单而有效的方法。近年来不少研究机构都发展了各自的云分析系统,例如英国气象局的Nimrod(Golding,1998)、NOAA的LAPS(Albers,et al,1996)、俄克拉荷马大学-风暴分析预报中心(CAPS/OU)的ARPS云分析系统(Hu,et al,2006a)、RUC的云分析系统(Weygandt,et al,2006)和GRAPES的云分析系统(屈右铭等,2010)等,其中较为成熟的是ARPS云分析系统和RUC云分析系统。ARPS云分析主要针对深对流系统,RUC云分析主要应用于层云降水系统中。GSI云分析系统(Hu,et al,2007)则融合了ARPS和RUC两者的优势,层云和对流云均可以处理。

GSI云分析系统综合地面云观测、卫星观测、闪电资料和多普勒雷达反射率等多种资料计算云量,反演计算云冰、云水、雨水、雪和霰等水凝物混合比,并且根据非绝热过程(RUC方案)或湿绝热过程(ARPS方案)两种方式调整云内温度。输出更接近真实情况的水凝物场、温度场,最终形成更完美的初始场。详细流程见图1。需要说明的是,GSI系统是在完成迭代极小化后才开启云分析模块,因此严格来说云分析不是三维变分同化的一部分,而只是传统意义的同化系统的一个补充而已。

GSI云分析系统在计算云冰、云水时可选择ARPS对流云方案或RUC层云方案;在根据雷达反射率反演计算雨水、雪和霰的混合比时有KRY(Kessler,1969)、Lin(Ferrier,1994)和Thompson(Thompson,et al,2004)三种方案可选;在进行云内温度调整时可选用ARPS对流云方案(假定云内温度垂直变化为湿绝热过程)或RUC层云方案(假定云内温度垂直变化是非绝热过程)。本研究配置的参数依次是ARPS对流云方案、Lin方案和ARPS温度调整方案。

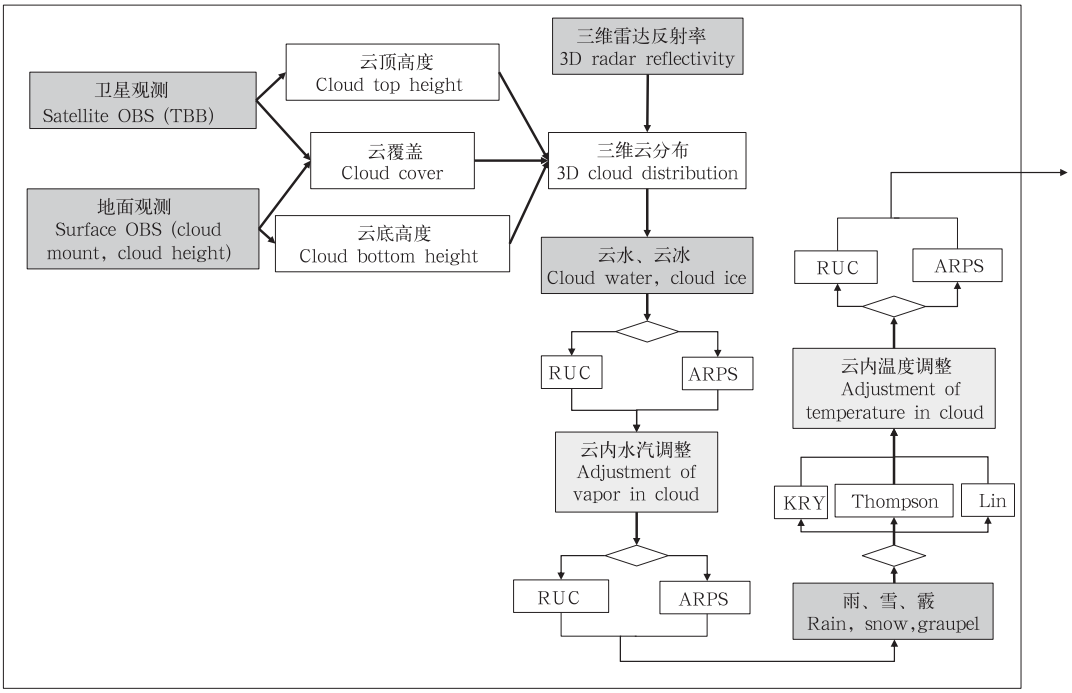


图1 GSI云分析流程示意

Fig. 1 Flow diagram of the GSI cloud analysis system

3　资料处理和试验设计

3.1　雷达探测资料处理

此次试验同化了北京、天津、石家庄和秦皇岛4部SA型多普勒雷达(站点位置见图3)的反射率和径向风资料。雷达探测资料的质量对最终的同化效果有重要的影响,因此在进行资料同化之前,必须对雷达探测资料进行一定的质量控制。不同于以往研究中以经验为主的质量控制(陈力强等,2009;杨银等,2013),首先采用CAPS/OU开发的自动雷达探测资料质量控制程序88D2GSI对径向风数据进行退模糊处理。为了达到节约机时的目的,88D2GSI采用二次曲面拟合将径向风资料稀释到模式网格点上。最后在GSI的质量控制模块里进行极值检验、标准差检查、与背景场的差值检验等。图2给出了一个质量控制前后径向风分布的例子。从图中可以看出经过质量控制后的径向风的分布范围同原始观测大致一致,观测站点西南象限粒子朝向观测站点运动,西北象限粒子远离观测站点运动。同时质量控制处理了观测站点西南象限速度模糊部分。本试验所用到的反射率资料是经过中国气象科学研究院-灾害天气国家重点实验室的拼图软件(王红艳等,2009a,2009b)组网的三维格点反射率数据。该三维格点数据已经做过地物杂波、鸟回波、系统噪声等非气象回波剔除,因此在本试验中不再单独做反射率的质量控制。

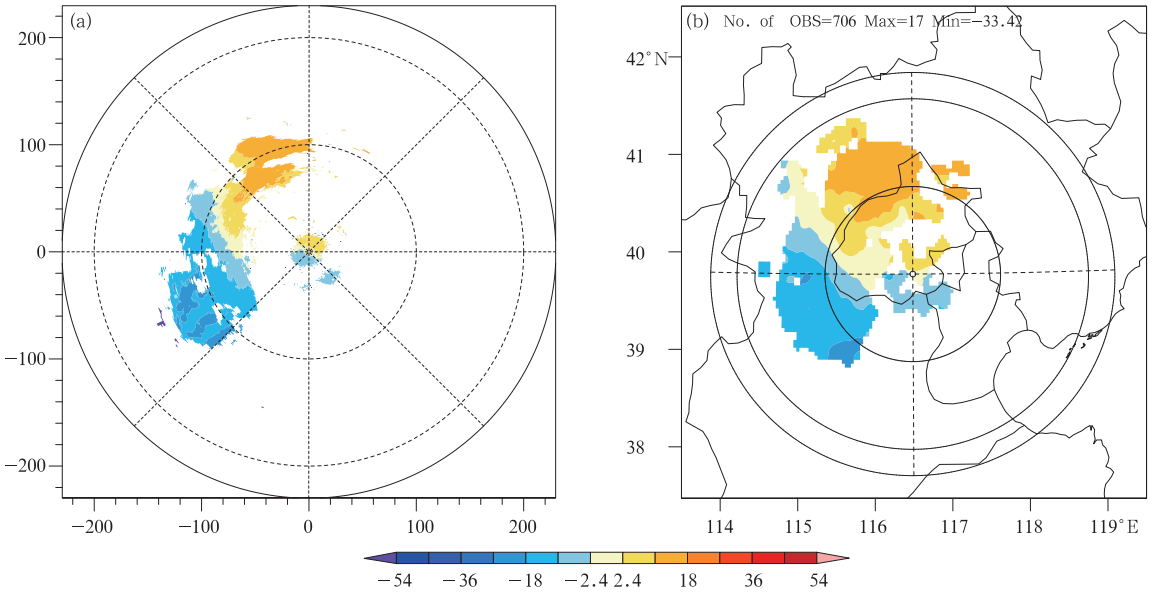


图2　21日00时北京站雷达3.16°仰角质量控制前(a)后(b)的径向风值(阴影,m/s)

Fig. 2　Radar radial wind at the elevation of 3.16° from the Beijing radar at 00:00 UTC 21 July 2012 (a. before QC, b. after QC)

3.2　个例环流背景介绍

从21日00时的500 hPa环流场(图7d)可以看出,“7.21”北京特大暴雨发生在深厚的贝加尔湖—蒙古冷涡底部的冷平流和西太平洋副热带高压西侧暖湿平流的交汇处;对流层低层(图略)有强烈的自孟加拉湾到华北的水汽输送;同时对流层中低层的低涡系统和地面的低压倒槽辐合区为暴雨发生提供了良好的动力抬升条件。

3.3　试验设计

本次同化试验使用WRFV3,水平区域为三重双向嵌套,水平分辨率分别为36、12和4 km,对应的水平网格点数为236×195、292×313和316×316(图3);垂直方向为57层,模式顶层气压为50 hPa。试验中物理过程均采用相同的设置:云微物理方案选用Lin方案,长波辐射方案采用RRTM方案,短波辐射方案使用Dudhia方案,近地面方案选用莫宁-奥布霍夫方案,对应的边界层方案采用YSU方案。初、边界条件均由3 h间隔的NCEP-GFS模式预报场提供。

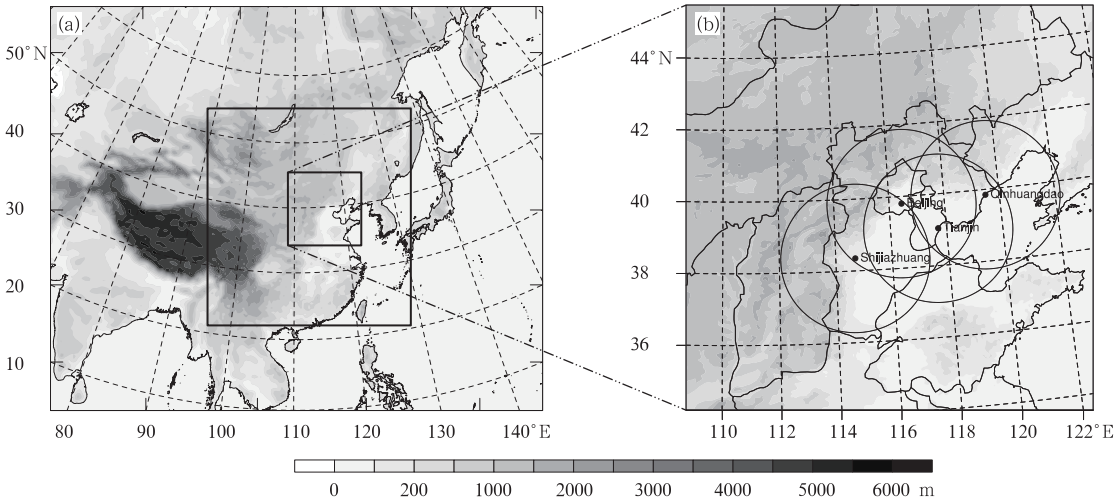


图 3 模拟区域设置(a)和同化雷达站点分布(b,黑色点表示雷达站点位置,黑色圆圈表示雷达的 230 km 探测范围)

Fig. 3 Coverage area of the nested simulation domains (a), and also indicated are the Beijing, Tianjin, Shijiazhuang, Qinhuangdao SA radar locations (b, black dot) with the 230 km observation range of SA radar marked by the black circle

为探究多普勒雷达反射率和径向风资料在暴雨预报中的效果和作用,本次试验总共设置了 5 组同化试验,分别为 NODA、CONV、REF、VEL 和 RADAR(表 1)。

表 1 模拟试验设计

Table 1 List of the experiment schemes

试验名称	同化资料	细节描述
NODA	无	仅以 20 日 12 时 GFS 资料作为初始场
CONV	常规观测	20 日 12 时和 21 日 00 时两次同化常规观测
REF	反射率	在 CONV 基础上,20 日 21 时至 21 日 00 时进行反射率半小时循环同化
VEL	径向风	设置同 REF 试验,但仅循环同化径向风
RADAR	反射率 + 径向风	设置同 REF 试验,同时循环同化反射率和径向风

图 4 给出了具体的试验流程。试验 NODA 不同化任何观测资料,直接使用 GFS 预报场提供的初、边条件进行模拟;试验 CONV 分 2 次同化了以常规探空为主的常规观测资料;试验 REF、VEL 和 RADAR 在试验 CONV 的基础上,于 20 日 21 时至 21 日 00 时采用 30 min 循环同化的方式分别同化反射率、径向风、反射率 + 径向风。

4 同化效果分析(21 日 00 时)

一个尽量贴近真实大气状况的初始场是提高数值预报水平的关键之一。资料同化的主要目的就是利用一切信息(背景场、观测场)去优化初始场。文中针对不同类型的观测资料设计了一组对比试验,用以探究雷达探测资料在改善初始场方面的作用。在循环同化结束时刻(21 日 00 时的分析场),无论是各组试验初始场中的动力场、还是热力场或是水凝物场都有一定的改善。下面将具体分析各试验中

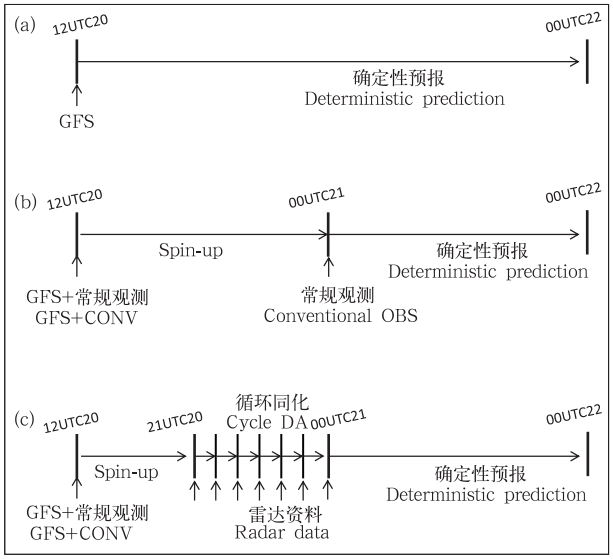


图 4 模拟试验流程(a)试验 NODA、(b)试验 CONV、(c)试验 REF、VEL 和 RADAR

Fig. 4 Flow charts for (a) NODA experiment, (b) CONV experiment, and (c) REF, VEL and RADAR experiment

初始场的改善情况。

4.1　单点(北京站)分析

首先对比同化结束时刻(21 日 00 时)试验 CONV 和 RADAR 中北京站(站号:54511)的探空曲线。从图 5 中可以看出,在 800—550 hPa 实况露点曲线较温度曲线低 20℃以上,是一个十分强的干区。试验 RADAR 的露点曲线比试验 CONV 的曲线(图 5 黑色虚线)更接近观测值,这是因为试验 RADAR 增加同化了雷达资料,改善了初始场的水凝物分布。另外,两组试验的北京站风廓线较为相似,均能较好地再现北京站的垂直风廓线。它们同观测一样,都是由低层的偏南风顺时针旋转为高层的偏西风。

4.2　水平场分析

华北地区的强降水过程常常伴随着剧烈的冷、暖空气活动(张文龙等,2012),而 2 m 气温、10 m 风场及海平面气压场则是分析冷、暖空气活动的主要载体,图 6 给出了试验 RADAR 和 CONV 相应变量场的分布。同化雷达资料明显加强了北京西部的海平

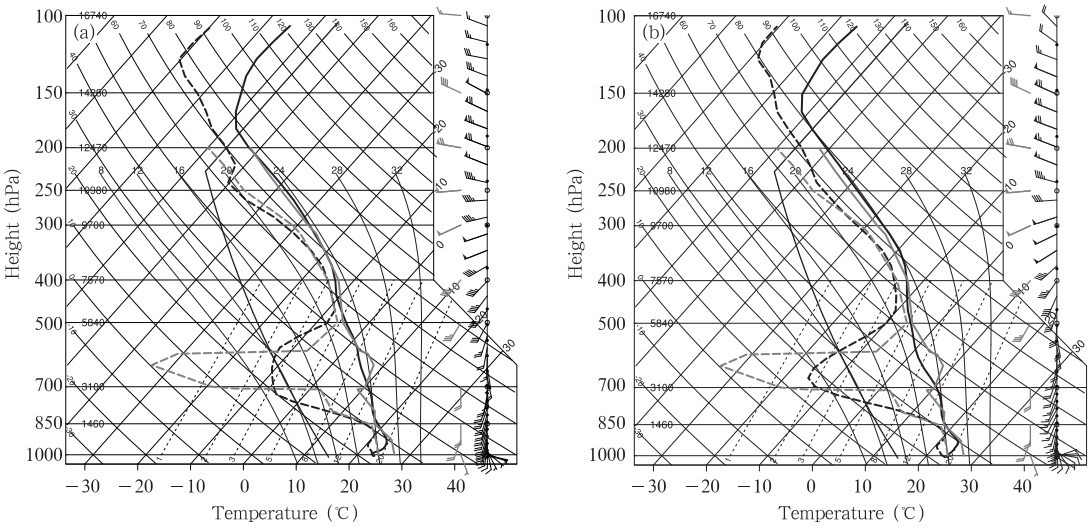


图 5　21 日 00 时北京站(54511)探空曲线(灰线:实况,黑线:分析值;a. 试验 CONV,b. 试验 RADAR)

Fig. 5　Soundings of the Beijing station (station ID: 54511) at 00:00 UTC 21 July 2012 (gray line: observation, black line: analysis; a. CONV experiment, b. RADAR experiment)

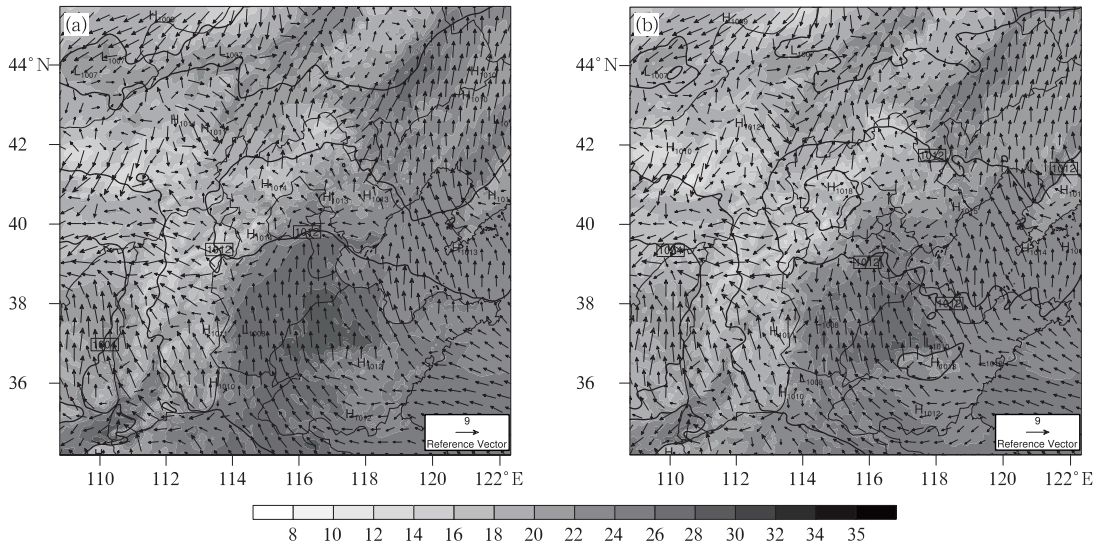


图 6　21 日 00 时 2 m 气温(阴影,℃)、10 m 风场(矢量,m/s)和海平面气压场(等值线,hPa)(a. 试验 CONV,b. 试验 RADAR)

Fig. 6　2 m air temperature (shade, ℃), 10 m wind (vectors, m/s) and sea level pressure (contour, hPa) at 00:00 UTC 21 July 2012 (a. CONV experiment, b. RADAR experiment)

面气压和冷空气强度,海平面气压场表现为一个1018 hPa的高压闭合中心,该高压中心的2 m气温也由试验CONV的20℃降为试验RADAR的18℃。另外,河北山东交界处的暖空气强度也有所降低,从试验CONV的30℃以上降到试验RADAR的28℃左右。因此,在试验RADAR中,冷空气的加强和暖空气的减弱将会使降水系统更迅速地在北京东南部生成,能够一定程度的改善试验CONV短时降水(21日00—06时)不足的现象(图12)。

除地面冷、暖空气外,同化雷达资料也会对中高层环流场产生一定影响。在对流层低层(700 hPa),增加同化雷达资料一是激发了北京房山区西南方向的中心强度达到1.6 m/s的上升运动(图7b、c),该中心位置与观测的强回波中心(图8)较为匹配;二是将绝对涡度由试验CONV的50×10^{-5} s^{-1}提升到了100×10^{-5} s^{-1},但分布较为零乱,并不成系统。进一步分析试验REF和试验VEL(图略)发现,前者是由同化反射率带来的,后者则是由同化径向风造成的。在对流层中层(500 hPa),试验RADAR的贝加尔湖—蒙古冷涡底部(以位势高度场5840 gpm为特征线)移动更快,21日00时已位于北京东南方,这与FNL资料(图7d)更加接近。

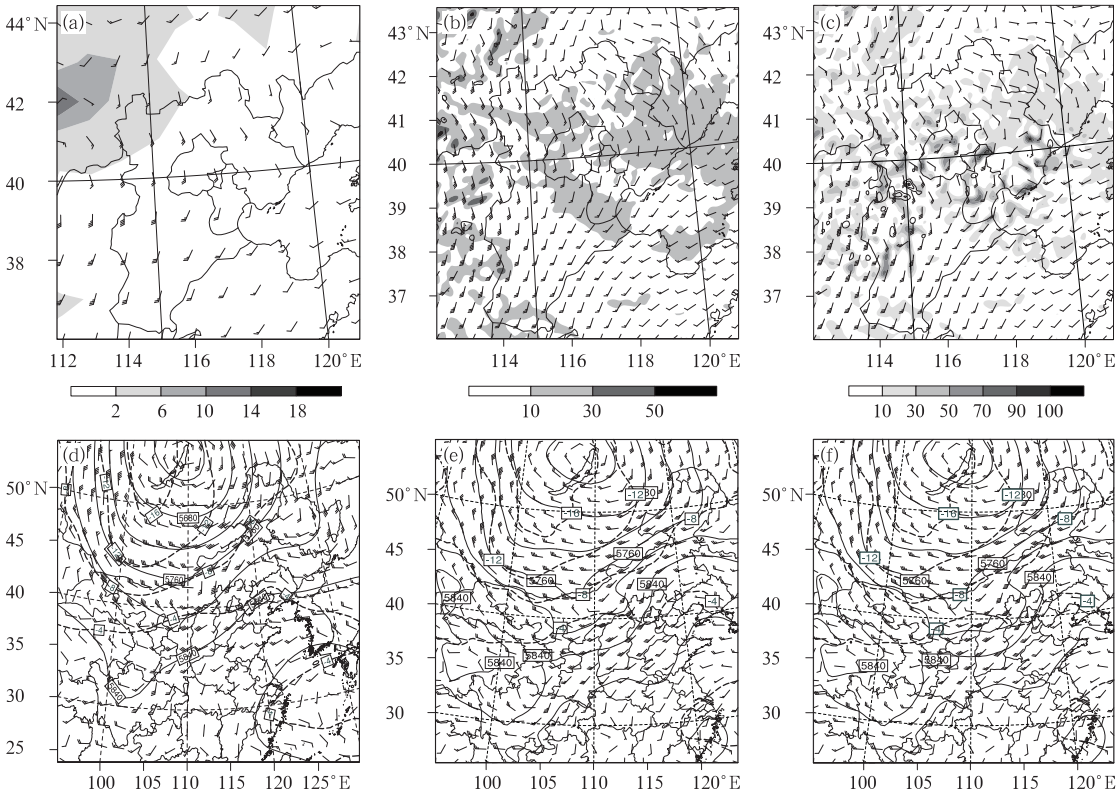


图7 21日00时700 hPa(a—c. 风矢,水平风场,m/s;等值线,上升速度,m/s;阴影,绝对涡度,$10^{-5}s^{-1}$)和500 hPa(d—f. 风矢,水平风场,m/s;实线,位势高度,gpm;虚线,温度,℃)形势场

(a、d. FNL资料,b、e. 试验CONV;c、f. 试验RADAR)

Fig. 7 Patterns of 700 hPa winds (a-c. barbed arrow, horizontal wind, m/s; contour, vertical velocity, m/s; shade, absolute vorticity, 10^{-5} s^{-1}) and 500 hPa charts (d-f. solid line, geopotential height, gpm; dashed, temperature, ℃) at 00:00 UTC 21 July 2012

(a,d. FNL; b, e. experiment CONV; c, f. experiment RADAR)

4.3 垂直剖面分析

水凝物的准确分布对数值模式精确预报微物理发展过程至关重要。GSI云分析系统则利用雷达反射率反演计算云物质(云水和云冰)和水物质(雨、雪和雹),然后进行温度调整和水汽调节,最后输出更加接近实况的水凝物场和温度场。图8a和b给出了21日00时的实况雷达组合反射率和对应的剖面,可以看到房山西南方向有一个45dBz以上的对流单体。

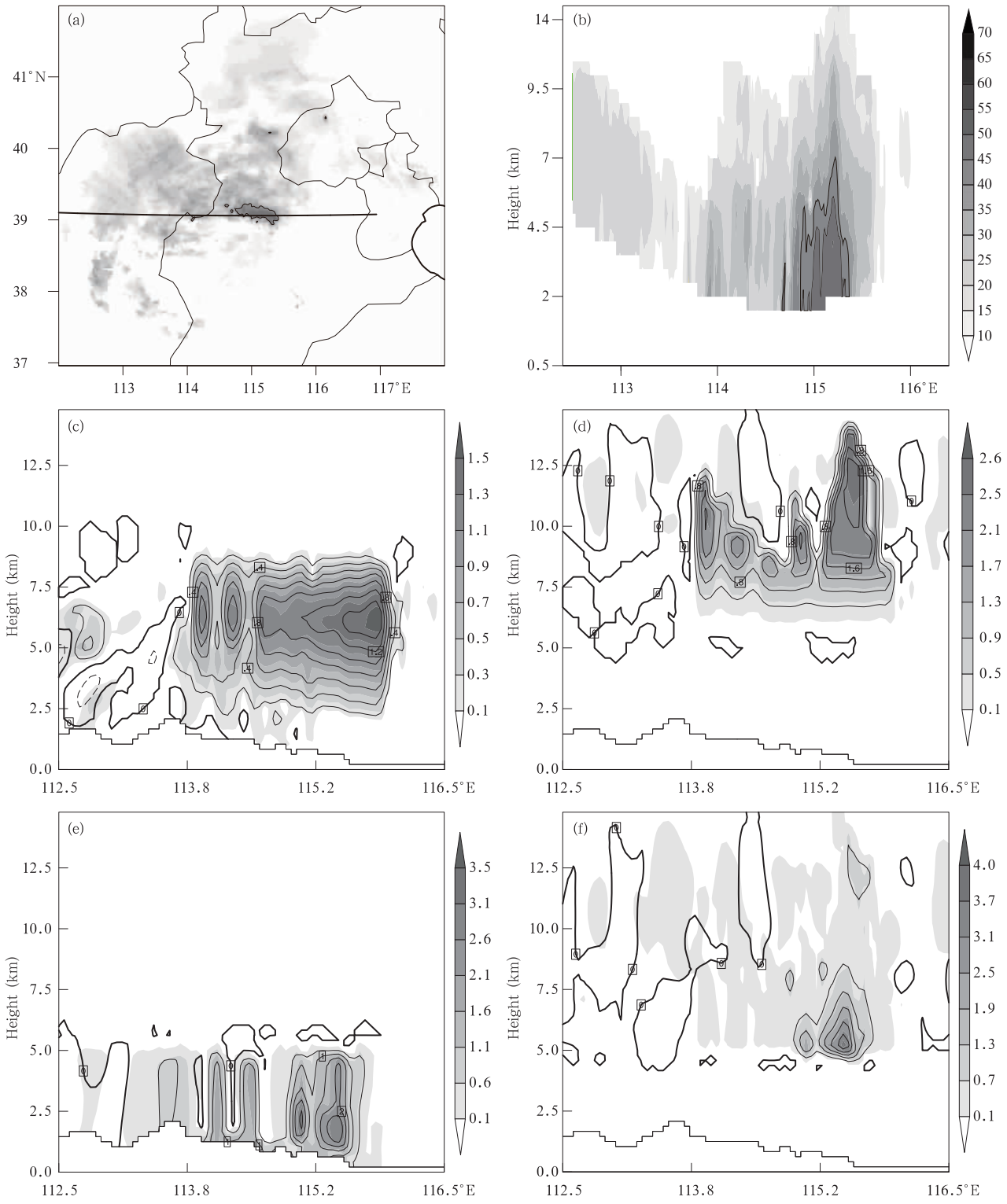


图 8　21 日 00 时观测反射率 (a、b,等值线:40 dBz)和试验 RADAR 的云水(c)、云冰(d)、雨水(e)、雪和霰(f)的纬向剖面(阴影,g/kg),试验 RADAR 与试验 CONV 水凝物差值剖面(c－f, 等值线,g/kg)(c－f, 沿 39.15°N;图 8a 中黑线)

Fig. 8　Observed reflectivity (a, b, isoline: 40 dBz) and the zonal height cross-section (c－f) of cloud water, cloud ice, rain, snow and graupel from RADAR (shade, g/kg) and the mixing ratio difference of the hydrometeors between RADAR and CONV (contour, g/kg)

图 8c—f 中的阴影分别是试验 RADAR 的初始场云水、云冰、雨水和雪沿 39.15°N 的纬向-高度剖面。从图中可以看出云水、云冰、雨水和雪的大值中心位置同反射率的极值中心对应较为一致,都位于 115°E 附近。云水主要分布于113.8°—115.6°E,垂直高度 2.5—8 km的范围内,主要由 3 个大值中心组成,中心混合比浓度达到了1.60 g/kg。云冰集中分布在 7 km 以上,最高扩展至 13 km,纬向分布范围同云水基本一致,混合比浓度极大值为 2.65 g/kg。雨水分布于地面至5 km范围内,纬向分布同云水一样跨越了 2 个经距,中心强度为 3.63 g/kg。雪的分布范围较窄,垂直方向上从5 km扩展到 8 km,纬向仅仅占据 115°E 附近的 1 个经距。并且无论是量级、还是分布形态,试验 RADAR 的水凝物(图 8c—f 阴影)同试验 RADAR 与 CONV 水凝物的差值(图 8c—f 等值线)相差都很小,说明试验 RADAR 中增加的水凝物基本是由同化雷达资料带来的。进一步对比分析试验 REF 和 VEL 的水凝物分布(图略)可以发现水凝物的增加主要原因是反射率资料的同化。这表明采用云分析同化反射率资料对初始场中水凝物的准确分布有重要作用。

4.4 定量分析(均方根误差和平均误差)

为定量化对比分析试验 CONV、REF、VEL 和 RADAR 分析场的精确度,将上述 4 组试验的位势高度、相对湿度、U 风和 V 风同 FNL 1°×1°再分析资料计算均方根误差(图 9)和平均误差(图略),计算水平范围为试验 d04 区域,高度范围是 1000—100 hPa。

4 组试验的位势高度的均方根误差都是先随高度减小,然后再略微升高。近地面层的均方根误差较大,高达 40—50 gpm,中高层较小,基本在20 gpm以下。试验 REF 和 RADAR 在同化了反射率之后,650—250 hPa 的均方根误差明显比不同化反射率的试验 VEL 和 CONV 低,大约低 8 gpm。位势高度的平均偏差低层呈现明显负偏差,然后随高度逐渐趋向于 0,到 150 hPa 方转为正偏差。同均方根误差一样,同化反射率能够减小对流层中层位势高度的平均误差。

相对湿度的均方根误差从近地面到 400 hPa 维持在 12%—20%,然后急剧升高,200 hPa 高度上的均方根误差甚至超过 40%,这可能是因为此高度为对流层顶附近,而模式对对流层顶的描述能力还十分有限。除 1000—800 hPa 内试验 CONV 的相对湿度均方根误差略小于其他 3 组试验外,其余高度上 4 组试验差别不大。相对湿度的平均误差从低层的负偏差随高度逐渐减小,800 hPa 以上即转为正偏差。

U 和 V 风的均方根误差都是先随高度缓慢增大,到 200 hPa 左右开始减小。4 组试验 U 的均方根误差是 2.7 m/s,略小于 V 风的 2.9 m/s。同化雷达资料对 U 和 V 风的均方根误差没有明显改善,在对流层中层反而是试验 CONV 略优于其他 3 组试验。

5 预报结果分析

文中使用华北地区逐时自动站观测降水以及雷达反射率对 5 组试验的预报结果进行对比诊断分析。这两类资料是当前评估高分辨率数值模式最常用的,也是最容易获取的观测资料。在这部分中,将首先评估所有试验短期降水(21 日 00 时—22 日 00 时)和短时降水(21 日 00—03 时)的预报水平,以探究雷达资料同化对降水预报的改善情况。

5.1 24 h 累计降水

"7.21"北京特大暴雨之所以能造成巨大的损失,主要是因为此次天气过程中降水强度大、持续时间长。从 24 h 累计观测降水(图 10)的分布中可以发现,大暴雨雨带呈西南—东北走向,北京大部分地区、天津北部以及河北部分地区达到大暴雨量级,其中房山地区的中心降水量更是超过了 200 mm。

5 组试验都预报出了大暴雨雨带的中心位置和走向,雨带均呈西南—东北走向,覆盖了北京及其周边地区。但各试验结果仍存在差异。试验 NODA 预报的雨带位置偏西北最严重,大暴雨雨带没有覆盖到天津北部,并且 200 mm 以上雨带横跨北京中部,同实况相差最多。试验 CONV 有较多的虚假降水,其大暴雨覆盖区域是实况偏大 2 倍以上;200 mm以上降水范围也偏大,但位置与实况接近,都位于房山及其附近的河北地区。无论是增加同化反射率资料(试验 REF)或是径向风资料(试验 VEL),试验 CONV 严重的虚假大暴雨降水现象都得到了改善,其中,试验 VEL 同实况更加接近,试验 REF 的雨带则更加狭长,同观测有一定差距;而对于 200 mm 以上的降水预报,试验 REF 预报的位置更接近房山地区,优于试验 VEL 的预报结果。试验 RADAR 预报的大暴雨雨带比较狭长,200 mm 以上降水位于房山附近,整体预报效果同试验 REF 比较接近。

采用 ETS 评分进一步定量评估各试验 24 h 累计

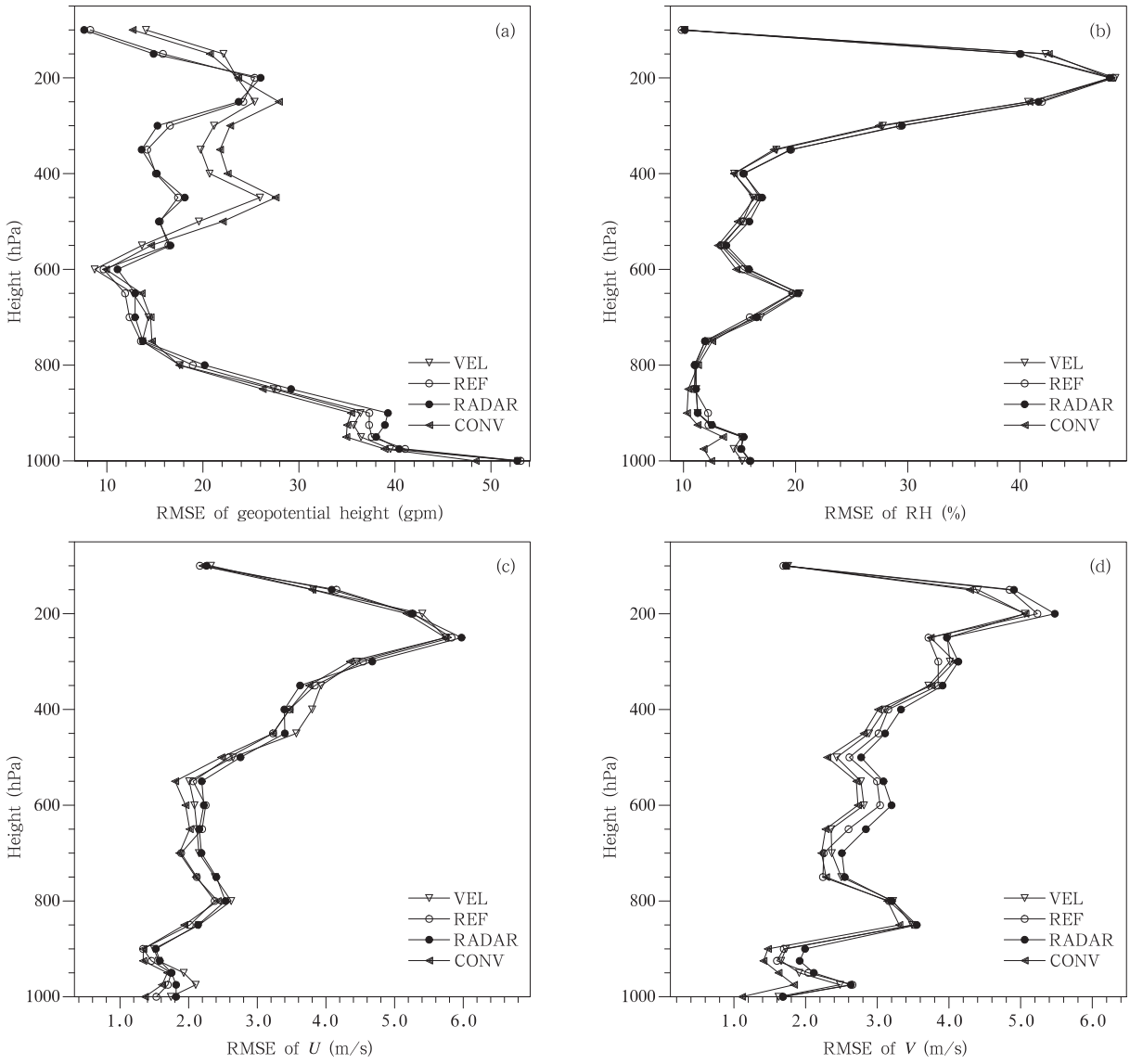


图 9　21 日 00 时 4 个试验分析场同 FNL 资料的均方根误差

(a. 位势高度,gpm;b. 相对湿度,%;c. U 风场,m/s;d. V 风场,m/s)

Fig. 9　RMSE of the analysis field from the experiments of CONV, REF, VEL and RADAR verified against FNL at 00:00 UTC 21 July 2012

(a. geopotential height, gpm; b. Relative humidity, %; c. U-wind, m/s; d. V-wind, m/s.)

降水的预报水平。ETS 评分的计算公式为

$$\mathrm{ETS_K} = \frac{N_{A_K} - \mathrm{Random}}{N_{A_K} + N_{B_K} + N_{C_K} - \mathrm{Random}} \tag{3}$$

$$\mathrm{Random} = \frac{(N_{A_K} + N_{B_K})(N_{A_K} + N_{C_K})}{N_{\mathrm{total}}} \tag{4}$$

式中,K 表示小雨、中雨、大雨、暴雨和大暴雨几种降水量级,N_{A_K} 是预报正确站数,N_{B_K} 是空报站数,N_{C_K} 是漏报站数,N_{total} 是总站点数。图 11a 给出了 24 h 累计降水的 ETS 评分。从图中可见,4 组同化观测资料的试验在各个降水量级均优于不同化任何资料的试验 NODA,每个量级的 ETS 评分都提高了 0.2 左右。在 50—100 mm 和 200 mm 以上中,试验 RADAR 是 5 组试验中预报最好的,ETS 评分分别为 0.4 和 0.55;试验 CONV 在 100—200 mm 预报结果最优,评分超过 0.65,但其空报率(图略)也是最高的。仅同化反射率(试验 REF)或仅同化径向风(试验 VEL)对 25—50、50—100 mm 的预报效果相当。但对于超强降水(200 mm 以上)的预报,试验 REF 的 ETS 评分为0.4,

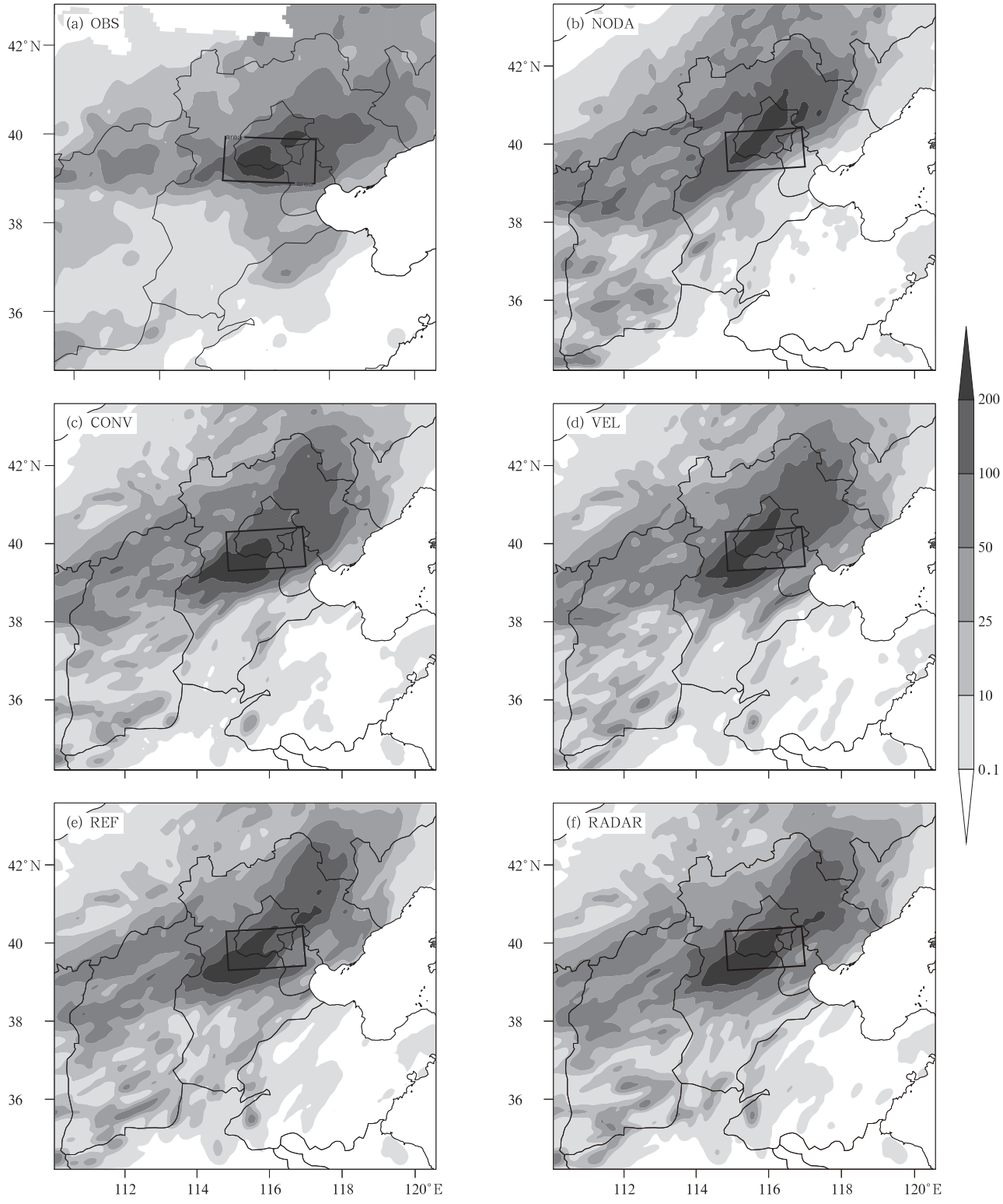


图 10 2012 年 7 月 21 日 00 时至 22 日 00 时 24 h 累计降水观测值和模拟值

(a. OBS,b. NODA,c. CONV,d. VEU,e. REF, f. RADAR;黑色方框区域用以计算区域逐时平均降水量和最大降水量)

Fig. 10 24 h accumulative rainfall (mm) from 00:00 UTC 21 to 00:00 UTC 22 July 2012 from the observation (a) and the various experiments (b) – (f) (The black box is used for calculating 1 h regional average precipitation and maximum precipitation)

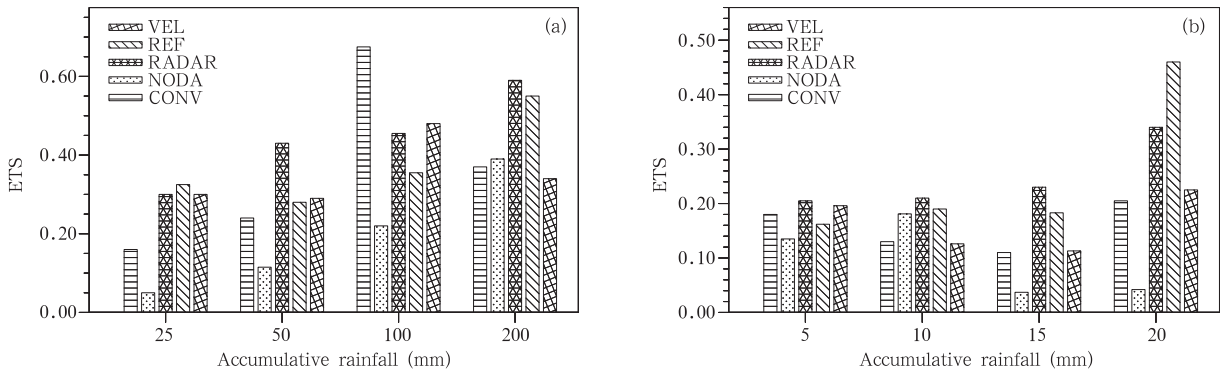


图 11　21 日 00 时至 22 日 00 时累计降水(a)和 21 日 00—03 时累计降水(b)ETS 评分

Fig. 11　Equitable threat score of accumulative rainfall from the experiments of NODA, CONV, REF, VEL and RADAR from 00:00 UTC 21 to 00:00 UTC 22 July 2012 (a) and from 00:00 UTC to 03:00 UTC 21 July 2012 (b)

试验 VEL 的评分仅有 0.24，说明同化反射率对此次过程的超强降水预报有更明显的改善作用。这从定量评分上表明 GSI 云分析系统虽然只是一种半经验的同化方法，但却是一种简单而有效的同化方法。并且此次同化试验通过循环同化反射率还能够导致位势高度等其他变量场的改善(图 9)。而对于径向风资料，则是由于 GSI 的径向风观测算子不够完整，导致其同化效果不太明显，因而对降水预报的改善也有限。

5.2　逐时降水

图 12 和 13 描述了 21 日 00 时至 22 日 00 时逐时降水的演变情况及其 ETS 评分。图 12a 是逐时区域平均降水量，计算区域为图 10 中黑色矩形框。从图中可以看出实况降水(黑色实线)主要集中在 21 日 01—23 时，期间出现了 3 次降水峰值。降水系统从 21 日 01 时开始影响该区域，降水量开始逐渐增大，至 21 日 07 时达到第一个降水峰值，为 7 mm/h。随后小时降水量略有下降，然后雨势于 09 时再次加强，2 h内雨强增至 15 mm/h 以上，并持续 8 h，期间于 12 和 14 时出现两次连续的降水峰值，分别为 17 和 19 mm/h。20 时以后降水系统开始远离，区域平均降水量开始下降，直至为 0。

5 组试验中，试验 NODA 的预报效果最差，逐时降水量的演变落后观测 5 h 以上，并且强度偏弱，18 时才达到极值 15 mm/h。另外，4 组试验的预报效果整体优于试验 NODA，都模拟出了 11—19 时期间 15 mm/h 以上的强降水，同时也都没有预报出 07 时的降水峰值。但 4 组同化试验的逐时区域平均降水量演变在一些细节上仍有一定的差异。首先试验 REF 和 RADAR 在 00—03 时有降水出现，而其他几组试验没有，该现象在区域最大降水量逐时演变(图 12b)中体现得更加明显。这是因为试验 RADAR 和 REF 同化了雷达反射率，从而增加了大气中的水凝物，进而快速地产生了降水。其次只有试验 RADAR 较好地模拟了观测中的连续 2 次降水峰值，只是时间滞后了 1 h，强度也偏弱 2—3 mm/h。

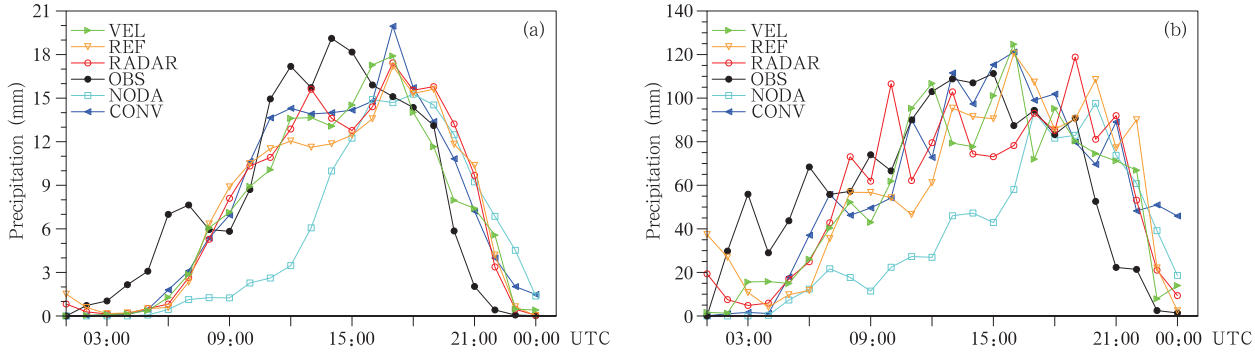


图 12　21 日 01 时—22 日 00 时逐时区域平均(a)和最大(b)降水量

Fig. 12　1 h regional average precipitation (a) and maximum precipitation (b) from 01:00 UTC 21 to 00:00 UTC 22 July 2012

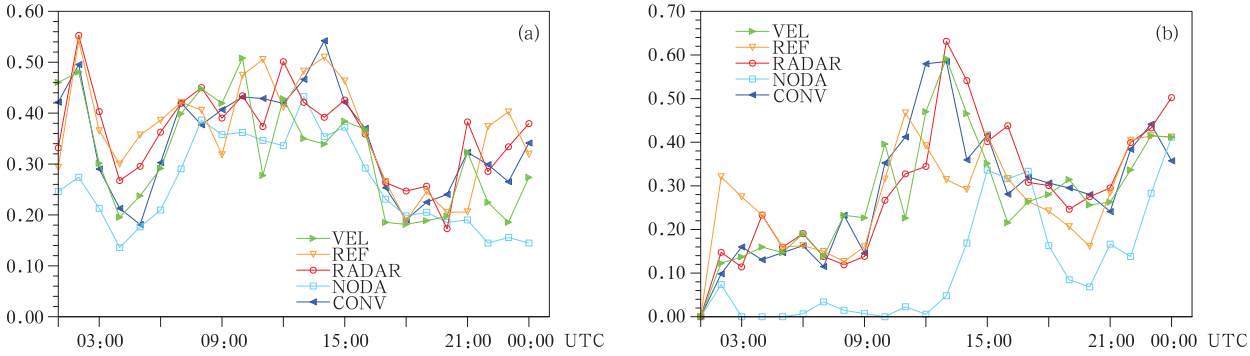


图 13 21 日 01 时—22 日 00 时逐时预报降水 ETS 评分(a. 1.25—10 mm,b. 10 mm 以上)

Fig. 13 Equitable threat score of 1 h accumulative rainfall from the experiments of NODA, CONV, REF, VEL and RADAR for the rainfalls of 1.25－10 (a) and>10 mm (b) from 01:00 UTC 21 to 00:00 UTC 22 July 2012

图 13 给出了 21 日 01 时至 22 日 00 时逐时降水量的 ETS 评分。从图中可以看出,试验 NODA 的评分明显差于其他试验,尤其是针对 10 mm/h 以上预报。当阈值取 1.25—10 mm/h 时,01—07 时,试验 REF 和 RADAR 的评分比较接近,并且优于其他试验。这说明同化雷达反射率对 00—07 时的降水预报有改善作用,这与杨毅等(2007)关于雷达探测资料对预报的正影响能维持 6 h 左右的结论基本一致。当阈值取 10 mm/h 以上时,试验 REF 在 01—04 时的评分仍优于其他试验,预报改善时间从 7 h 缩短至 4 h。另外,试验 RADAR、VEL、CONV 和 REF 的评分在 11—17 时明显高于其他时段,成单峰形态,从定量上反映了上述 4 组试验在该时段的预报降水同观测基本一致。

5.3 雷达回波

孙继松等(2012)指出"7.21"北京特大暴雨过程主要分为两个阶段:21 日 02—12 时和 21 日 12—22 时,并且前一阶段的降水回波具有明显的"列车效应"传播特征。由于同化雷达探测资料对预报的正影响只能维持 6 h 左右(杨毅等,2007),因此,下面将重点分析各组试验前 5 h 预报场的回波演变。首先给出实况回波(图 14 第 1 行)的演变情况,00 时房山区西南方向约 50 km 处有一个 40 dBz 以上的对流单体,并且该单体持续沿西南—东北向移动。随后该单体从房山移入北京,形状逐渐变为带状,影响范围逐渐增大。05 时在石家庄附近又有一个新单体生成。

图 14 第 2 至 5 行分别给出了 00—05 时试验 CONV、VEL、REF 和 RADAR 的组合反射率。00 时,试验 REF 和 RADAR 在石家庄附近有 1 片 40 dBz 的雷达回波,而试验 CONV 和 VEL 并没有对应的回波出现。这是因为试验 REF 和 RADAR 采用 GSI 云分析系统同化了雷达反射率,增加了大气中的水凝物,从而使得该区域的回波强度增强。但由于试验 REF 和 RADAR 采用 30 min 循环同化的方式同化反射率,导致水凝物在石家庄附近大量堆积,使模拟的雷达回波较实况偏强许多。由于环流场,尤其是上升气流并不足以支撑这些水凝物停留在大气中,因此导致了 00—02 时试验 REF 和 RADAR 的区域最大小时降水量(图 12b)较实况偏大许多,分别达到了 20 和 10 mm/h。相对于试验 REF,试验 RADAR 的短时空报现象有所减弱,说明增加同化径向风资料对改善降水预报同样具有一定的作用。

随后数小时内,试验 REF 和 RADAR 的新增雷达回波云逐渐变成降水降至地面,回波逐步减弱。该过程导致环流场等发生改变,诱使新单体不断生成影响北京。至 05 时,4 组试验的雷达回波分布相差不再明显,表明同化雷达资料的作用也已基本消失。

6 总结和讨论

利用 GSI 同化系统和 WRFV3.4.1 模式,针对"7.21"北京特大暴雨个例,设计了 5 组敏感性试验,探究多普勒雷达资料同化对夏季华北强降水模拟的改善作用。通过诊断分析同化、预报结果得出以下结论

(1)在同化反射率之后,云分析模块会调整优化水凝物的分布,因而增加同化多普勒雷达探测资料(试验 RADAR)减少了 21 日 00 时北京站附近的水凝物浓度,使得露点温度降低,进而加重"干区"现象,使

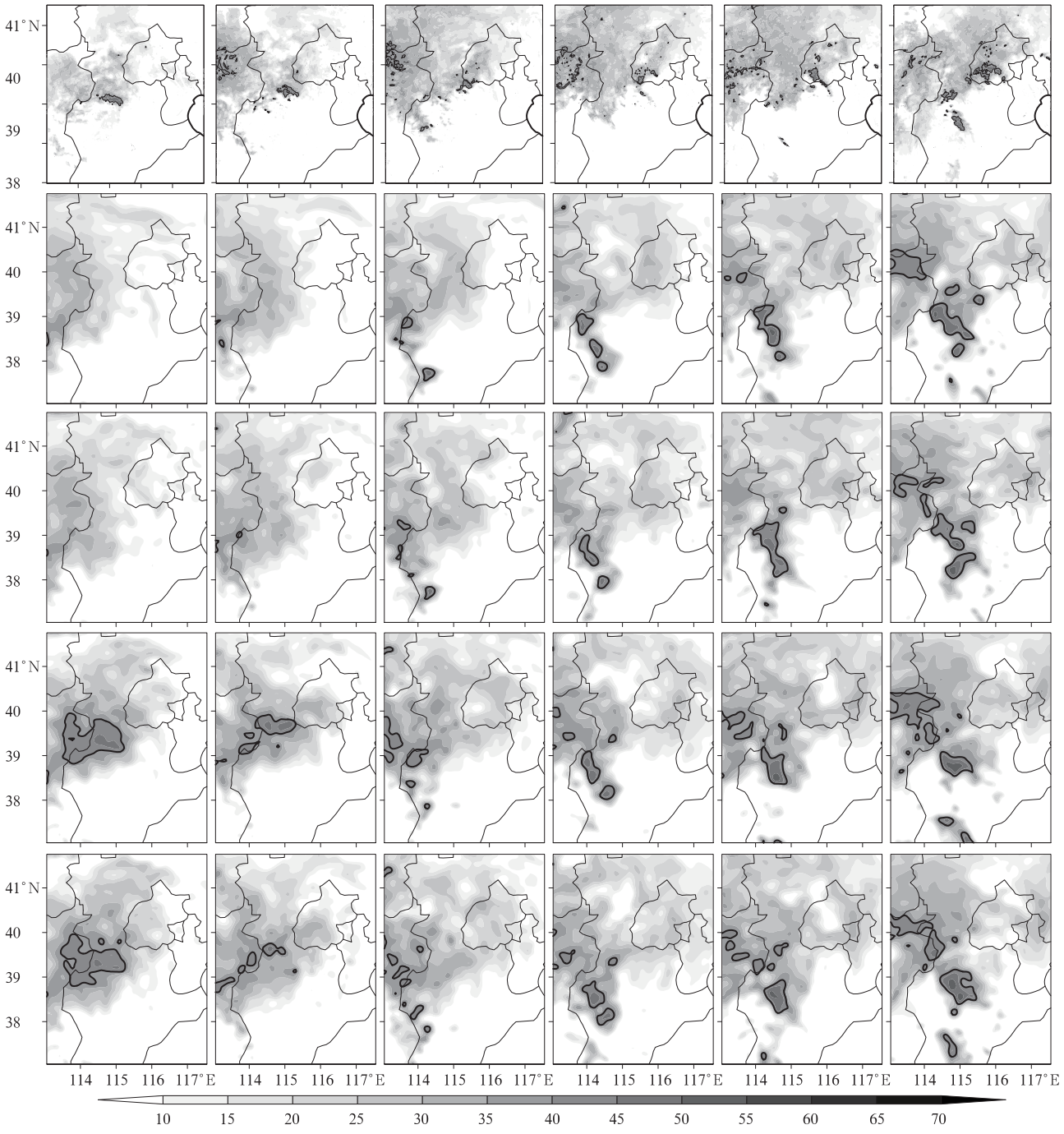


图 14　21 日 00—05 时逐时观测和模拟的组合反射率

(第 1—5 行分别是 OBS、CONV、VEL、REF 和 RADAR,每一列为同一时次,等值线:40 dBz)

Fig. 14　Composite reflectivity hourly from 00:00 UTC to 05:00 UTC 21 July 2012

(the lines 1－5 are respectively from the experiments of OBS, CONV, VEL, REF and RADAR and each column is at the same hour; isolines in the interval of 40 dBz)

其更加接近实况。该"干区"位于 800—550 hPa,对对流爆发前静力能的积累至关重要。另外,由于三维变分同化系统中多变量的相互调整以及循环同化预报的作用,同化反射率资料(试验 REF 和 RADAR)不仅能激发出与实况强回波中心位置一致的上升运动,而且还使 650—250 hPa 的位势高度均方根误差降低

8 gpm左右。

(2)循环同化雷达资料对强对流中的一些中小尺度雨团的预报总体有改善,因此对短时和短期降水模拟也都有一定改善,减弱了试验 CONV 对大暴雨的空报现象。ETS 评分结果表明反射率资料同化能够提高 0—6 h 的降水预报准确率。

(3)同化反射率资料的效果要优于同化径向风。针对超强降水(200 mm 以上)预报,试验 REF(仅同化反射率资料)的 ETS 评分为 0.4,而试验 VEL(仅同化径向风)的评分仅有 0.24。这是因为反射率同化通过 GSI 云分析系统向初始场增添水凝物,改进了湿度场,对降水有直接贡献。而 GSI 系统中的径向风观测算子不包含垂直速度,这与实际物理模型有一定差距,这也导致同化径向风的效果不十分明显。

本研究仅用了夏季华北暴雨一个个例,所得结果具有局限性,因此,有必要选取更多不同时期、不同区域的个例进行研究。再者,为了更好地利用径向风资料的中小尺度风场信息,有必要在当前的径向风观测算子中加入垂直速度项,并且进一步完善相关的质量控制流程。

致 谢:雷达探测资料预处理及 GSI 同化系统方面得到了南京大学朱科峰博士的大力帮助,在此深表感谢。

参考文献

陈力强,杨森,肖庆农. 2009. 多普勒雷达资料在冷涡强对流天气中的同化应用试验. 气象,35(12):12-20. Chen L Q, Yang S, Xiao Q N. 2009. Experiment of Doppler radar data assimilation for convection in cold vortex. Meteor Mon, 35(12): 12-20 (in Chinese)

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. 气象学报,72(4):658-677. Chen M, Chen M X, Fan S Y. 2014. The real-time radar radial velocity 3DVar assimilation experiments for application to an operational forecast model in North China. Acta Meteor Sinica, 72(4): 658-677 (in Chinese)

顾建峰,薛纪善,颜宏. 2004. 多普勒雷达四维变分分析系统概述. 热带气象学报,20(1):1-13. Gu J F, Xue J S, Yan H. 2004. A summarization of the four-dimensional variational Doppler radar analysis system. J Trop Meteor, 20(1): 1-13 (in Chinese)

管成功,陈起英,佟华等. 2008. T639L60 全球中期预报系统预报试验和性能评估. 气象,34(6):11-16. Guan C G, Chen Q Y, Tong H, et al. 2008. Experiments and evaluations of global medium range forrecast system of T639L60. Meteor Mon, 34(6): 11-16 (in Chinese)

郭霞,党人庆,葛文忠. 1999. 雷达资料在江淮流域暴雨数值模拟中的应用. 热带气象学报,15(4):356-362. Guo X, Dang R Q, Ge W Z. 1999. The use of radar data in the numerical simulation of heavy rainfalls in the Changjiang-Huaihe River basin. J Trop Meteor, 15(4): 356-362 (in Chinese)

郝民,郭英华,马再忠. 2010. 一次降水天气过程的 GPS 掩星资料在 GSI 同化系统中的应用. 高原气象,29(1):164-174. Hao M, Guo Y H, Ma Z Z. 2010. Application and experiment of GPS radio occultation data in the NCEP GSI system in a pricipitation process. Plateau Meteor, 29(1): 164-174 (in Chinese)

姜晓曼,袁慧玲,薛明等. 2015. 北京"7. 21"特大暴雨高分辨率模式分析场及预报分析. 气象学报,72(2):207-219. Jiang X M, Yuan H L, Xue M, et al. 2014. Analysis of a torrential rainfall event over Beijing on 21－22 July 2012 based on high resolution model analyses and forecasts. Acta Meteor Sinica, 72(2): 207-219 (in Chinese)

李俊,杜钧,刘羽. 2015. 北京"7. 21"特大暴雨不同集合预报方案的对比试验. 气象学报,73(1):50-71. Li J, Du J, Liu Y. 2015. A comparison of initial condition, multi-physics- and stochastic physics-based ensembles in predicting Beijing "7. 21" excessive storm rain event. Acta Meteor Sinica, 73(1): 50-71 (in Chinese)

李永平,袁招洪,王晓峰. 2004. 用多普勒雷达反射率调整模式大气的云微物理变量. 应用气象学报,15(6):658-664. Li Y P, Yuan Z H, Wang X F. 2004. Microphysical adjustments using reflectivity of Doppler radar for meso-scale model. J Appl Meteor Sci, 15(6): 658-664 (in Chinese)

刘红亚,徐海明,胡志晋等. 2007a. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用Ⅰ:云微物理量和垂直速度的反演. 气象学报,65(6):896-905. Liu H Y, Xu H M, Hu Z J, et al. 2007a. Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving mesoscale model part Ⅰ: Retrieval of microphysical parameters and vertical velocity. Acta Meteor Sinica, 65(6): 896-905 (in Chinese)

刘红亚,徐海明,薛纪善等. 2007b. 雷达反射率因子在中尺度云分辨模式初始化中的应用Ⅱ:数值模拟试验. 气象学报,65(6):906-918. Liu H Y, Xu H M, Xue J S, et al. 2007b. Application of radar reflectivity to initialization of cloud resolving mesoscale model part Ⅱ: Numerical simulation experiments. Acta Meteor Sinica, 65(6): 906-918 (in Chinese)

屈右铭,陆维松,蔡荣辉等. 2010. GRAPES-Meso 云分析系统的设计与试验. 气象,36(10):37-45. Qu Y M, Lu W S, Cai R H, et al. 2010. Design and experiment of GRAPES-Meso cloud analysis system. Meteor Mon, 36(10): 37-45 (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)

盛春岩,浦一芬,高守亭. 2006a. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响. 大气科学,30(1):93-107. Sheng C Y, Pu Y F, Gao S T. 2006a. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model. Chinese J Atmos Sci, 30(1): 93-107 (in Chinese)

盛春岩,薛德强,雷霆等. 2006b. 雷达资料同化与提高模式水平分辨

率对短时预报影响的数值对比试验. 气象学报，64(3)：293-307. Sheng C Y，Xue D Q，Lei T，et al. 2006b. Comparative experiments between effects of Doppler radar data assimilation and inceasing horizontal resolution on short range prediction. Acta Meteor Sinica，64(3)：293-307 (in Chinese)

孙继松，何娜，王国荣等. 2012. “7.21”北京大暴雨系统的结构演变特征及成因初探. 暴雨灾害，31(3)：218-225. Sun J S，He N，Wang G R，et al. 2012. Preliminary analysis on synoptic configuration evolvement and mechanism of a torrential rain occurring in Beijing on 21 July 2012. Torrential Rain Disaster，31(3)：218-225 (in Chinese)

王红艳，刘黎平，王改利等. 2009a. 多普勒天气雷达三维数字组网系统开发及应用. 应用气象学报，20(2)：214-224. Wang H Y，Liu L P，Wang G L，et al. 2009a. Development and application of the Doppler weather radar 3-D digital mosaic system. J Appl Meteor Sci，20(2)：214-224 (in Chinese)

王红艳，刘黎平，肖艳娇等. 2009b. 新一代天气雷达三维数字组网软件系统设计与实现. 气象，35(6)：13-18. Wang H Y，Liu L P，Xiao Y J，et al. 2009b. Design and implementation of the CINRAD 3D digital mosaic system. Meteor Mon，35(6)：13-18 (in Chinese)

徐广阔，孙建华，雷霆等. 2009. 多普勒天气雷达资料同化对暴雨模拟的影响. 应用气象学报，20(1)：36-46. Xu G K，Sun J H，Lei T，et al. 2009. Impacts of Chinese Doppler radar on the severe heavy rainfall forecast during meiyu season. J Appl Meteor Sci，20(1)：36-46 (in Chinese)

徐建军，万齐林. 2011. 物理参数化和资料初始化对中国东南部暴雨模拟的影响. 大气科学学报，34(2)：129-134. Xu J J，Wan Q L. 2011. Influence of physical parameterizations and initialization on simulation of rainstorm over Southeast China. Trans Atmos Sci，34(2)：129-134 (in Chinese)

杨毅，邱崇践，龚建东等. 2007. 同化多普勒雷达风资料的两种方法比较. 高原气象，26(3)：547-555. Yang Y，Qiu C J，Gong J D，et al. 2007. Comparison of two methods of assimilating Doppler radar wind data. Plateau Meteor，26(3)：547-555 (in Chinese)

杨毅，邱崇践，龚建东等. 2008. 三维变分和物理初始化方法相结合同化多普勒雷达资料的试验研究. 气象学报，66(4)：479-488. Yang Y，Qiu C J，Gong J D，et al. 2008. Three-dimensional variational combined with physical initialization for assimilation of Doppler radar data. Acta Meteor Sinica，66(4)：479-488 (in Chinese)

杨银，朱克云，张杰等. 2013. 应用多普勒天气雷达资料对四川“7·3”暴雨的变分同化试验. 成都信息工程学院学报，28(1)：17-23. Yang Y，Zhu K Y，Zhang J，et al. 2013. Study on radar data in 7·3 heavy rainfall case in Sichuan province via variational assimilation. J Chengdu Univ Inf Technol，28(1)：17-23 (in Chinese)

张文龙，崔晓鹏. 2012. 近50 a华北暴雨研究主要进展. 暴雨灾害，31(4)：384-391. Zhang W L，Cui X P. 2012. Main progress of torrential rain researches in North China during the past 50 years. Torrential Rain Disaster，31(4)：384-391 (in Chinese)

赵文斌，齐琳琳，何宏让等. 2011. 多普勒天气雷达资料在暴雨数值模拟中的同化应用. 气象科学，31(3)：318-324. Zhao W B，Qi L L，He H R，et al. 2011. The application of Doppler radar observation assimilation in numerical simulation of heavy rainfall. Scientia Meteor Sinica，31(3)：318-324 (in Chinese)

周玉淑，刘璐，朱科峰等. 2014. 北京“7.21”特大暴雨过程中尺度系统的模拟及演变特征分析. 大气科学，38(5)：885-896. Zhou Y S，Liu L，Zhu K F，et al. 2014. Simulation and evolution characteristics of mesoscale systems occurring in Beijing on 21 July 2012. Chinese J Atmos Sci，38(5)：885-896 (in Chinese)

Albers S C，McGinley J A，Birkenheuer D L，et al. 1996. The local analysis and prediction system (LAPS)：Analyses of clouds，precipitation，and temperature. Wea Forecasting，11(3)：273-287

Alexander C R，Weygandt S，Smirnova T，et al. 2010. High resolution rapid refresh (HRRR)：Recent enhancements and evaluation during the 2010 convective season // 25th Conf. on Severe Local Storms. Denver：Amer Meteor Soc，Paper 9. 2

Baldauf M，Seifert A，Förstner J，et al. 2011. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model：Description and sensitivities. Mon Wea Rev，139(12)：3887-3905

Boccippio D J. 1995. A diagnostic analysis of the VVP single-Doppler retrieval technique. J Atmos Ocean Technol，12(2)：230-248

Browning K，Wexler R. 1968. The determination of kinematic properties of a wind field using Doppler radar. J Appl Meteor，7(1)：105-113

Ferrier B S. 1994. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I：Description. J Atmos Sci，51(2)：249-280

Golding B. 1998. Nimrod：A system for generating automated very short range forecasts. Meteor Appl，5(1)：1-16

Hu M，Xue M，Brewster K. 2006a. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth，Texas，tornadic thunderstorms. Part I：Cloud analysis and its impact. Mon Wea Rev，134(2)：675-698

Hu M，Xue M，Gao J，et al. 2006b. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D level-II data for the prediction of the Fort Worth，Texas，tornadic thunderstorms. Part II：Impact of radial velocity analysis via 3DVAR. Mon Wea Rev，134(2)：699-721

Hu M，Weygandt S，Xue M，et al. 2007. Development and testing of a new cloud analysis package using radar，satellite，and surface cloud observations within GSI for initializing rapid refresh // 22nd Conf. on Weather Analysis and Forecasting/18th Conf. on Numerical Weather Prediction. Park City：Amer Meteor Soc，Paper P2. 5

Kessler E. 1969. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. Meteor Monogr，32(10)：84

Kleist D，Parrish D，Derber J，et al. 2009. Introduction of the GSI into the NCEP global data assimilation system. Wea Forecasting，24(6)：1691-1705

Li Y Z，Wang X G，Xue M. 2012. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble-3DVAR system for the prediction of hurricane Ike (2008). Mon Wea Rev，140(11)：3507-3524

Ma Z Z，Kuo Y H，Wang B，et al. 2009. Comparison of local and nonlocal observation operators for the assimilation of GPS RO data with the NCEP GSI system：An OSSE study. Mon Wea Rev，137(10)：

3575-3587

Pan Y J, Zhu K F, Xue M, et al. 2014. A GSI-based coupled EnSRF-En3DVar hybrid data assimilation system for the operational rapid refresh model: Tests at a reduced resolution. Mon Wea Rev, 142(10): 3756-3780

Parrish D F, Derber J C. 1992. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. Mon Wea Rev, 120(8): 1747-1763

Saito K, Fujita T, Yamada Y, et al. 2006. The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model. Mon Wea Rev, 134(4): 1266-1298

Tang Y M, Lean H W, Bornemann J. 2013. The benefits of the Met Office variable resolution NWP model for forecasting convection. Meteor Appl, 20(4): 417-426

Thompson G, Rasmussen R M, Manning K. 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. Mon Wea Rev, 132(2): 519-542

Vijay T, Ligia B, Sundararaman G, et al. 2013. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) model: 2013 scientific documentation. Developmental Testbed Center,99 pp

Wang X G, Parrish D, Kleist D, et al. 2013. GSI 3DVar-based ensemble-variational hybrid data assimilation for NCEP global forecast system: Single-resolution experiments. Mon Wea Rev, 141(11): 4098-4117

Wang X G, Lei T. 2014. GSI-based four-dimensional ensemble-variational (4DEnsVar) data assimilation: Formulation and single-resolution experiments with real data for NCEP global forecast system. Mon Wea Rev, 142(9): 3303-3325

Weygandt S, Benjamin S G, Devenyi D, et al. 2006. Cloud and hydrometeor analysis using METAR, radar, and satellite data within the RUC/Rapid-Refresh model // 12th Conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology. Atlanta: Amer Meteor Soc, Paper 5.3

Wu W S, Purser R J, Parrish D F. 2002. Three-dimensional variational analysis with spatially inhomogeneous covariances. Mon Wea Rev, 130(12): 2905-2916

Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al. 2005. Assimilation of Doppler radar observations with a regional 3DVAR system: Impact of Doppler velocities on forecasts of a heavy rainfall case. J Appl Meteor, 44(6): 768-788

Xiao Q N, Kuo Y H, Sun J Z, et al. 2007a. An approach of radar reflectivity data assimilation and its assessment with the inland QPF of typhoon Rusa (2002) at landfall. J Appl Meteor Climatol, 46(1): 14-22

Xiao Q N, Sun J Z. 2007b. Multiple-radar data assimilation and short-range quantitative precipitation forecasting of a squall line observed during IHOP_2002. Mon Wea Rev, 135(10): 3381-3404

Xu J, Rugg S, Byerle L, et al. 2009. Weather forecasts by the WRF-ARW model with the GSI data assimilation system in the complex terrain areas of southwest Asia. Wea Forecasting, 24(4): 987-1008

Xue M, Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The Advanced Regional Prediction System (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation. Meteor Atmos Phys, 82(1): 139-170

Zhang J, Carr F H, Brewster K. 1998. ADAS cloud analysis // 12th Conf. on Numerical Weather Prediction. Phoenix: Amer Meteor Soc, 185-188

Zhu K F, Pan Y J, Xue M, et al. 2013. A regional GSI-based ensemble kalman filter data assimilation system for the rapid refresh configuration: Testing at reduced resolution. Mon Wea Rev, 141(11): 4118-4139

Zou X L, Qin Z K, Weng F Z. 2011. Improved coastal precipitation forecasts with direct assimilation of GOES-11/12 imager radiances. Mon Wea Rev, 139(12): 3711-3729