宝兴华,杨舒楠. 2015. WRF-EnKF 系统对中国南方一次暴雨过程确定性预报的试验. 气象,41(5):566-576.

WRF-EnKF 系统对中国南方一次暴雨过程确定性预报的试验*

宝兴华[1] 杨舒楠[2]

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

2 国家气象中心,北京 100081

提 要: 文章利用美国宾州州立大学的 WRF-EnKF(Ensemble Kalman Filter)实时预报系统(Real-time Penn State WRF-EnKF System),针对 2013 年 5 月 15—16 日发生在中国南方的暴雨过程进行了数值预报试验,以初步检验该系统对我国南方降水确定性预报的效果。数值试验采用 2013 年 5 月 14 日 08 时(北京时)起报的 6 h 间隔的 1°×1° NCEP GFS (globle forecast system) 60 h 预报数据(预报到 5 月 16 日 20 时)作为初始条件和边界条件。其中,控制试验不同化任何观测资料,同化试验通过集合卡尔曼滤波方法同化常规探空资料,分别进行确定性预报。结果表明:利用 WRF-EnKF 系统同化常规探空资料,显著改善了数值预报的初始场,减小了各物理量的预报偏差和预报均方根误差,进而提高了此次暴雨过程的降水落区和强度的预报准确率。

关键词: 资料同化,集合卡尔曼滤波,探空资料,降水确定性预报

中图分类号: P435,P456 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.005

Deterministic-Prediction Experiment of One Torrential Rainfall Event in Southern China Using a WRF-EnKF System

BAO Xinghua[1] YANG Shunan[2]

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

2 National Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Two convection-permitting numerical experiments were conducted with the WRF model to examine the impact of assimilating sounding data by using an EnKF method for deterministic prediction of a torrential rainfall event over southern China during 15−16 May 2013. The initial and lateral boundary conditions were based on the NCEP GFS 1°×1° 60 h gridded forecast data which were available every 6 h from 08:00 BT 14 May to 20:00 BT 16 May 2013. The two experiments, NODA and DA, differed only in the initial conditions: while NODA was initialized from the NCEP GFS data at 08:00 BT 14 May, DA was from an ensemble mean of 30 analysis-members at 08:00 BT 15 May, which was generated using the WRF-EnKF system with conventional sounding data at 20:00 BT 14 May, 02:00 BT and 08:00 BT 15 May assimilated. The results show that, compared to NODA, not only the initial conditions of DA are much closer to the observed fields, but also the DA predicted physical parameters are improved in terms of both biases and root-mean-square errors, leading to a more accurate prediction of the location and magnitude of precipitation from DA.

Key words: data assimilation, ensemble Kalman filter, sounding data, precipitation deterministic prediction

---

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(41405050)、中国气象局气象关键技术集成与应用项目(CMAGJ2013ZX-ZH1)、中国气象科学研究院基本科研业务经费专项(2014Z003)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201406013)共同资助

2014 年 9 月 4 日收稿; 2015 年 3 月 16 日收修定稿

第一作者:宝兴华,主要从事资料同化和中尺度数值模拟研究工作. Email:xhbao@cams.cma.gov.cn

引　言

暖季期间,我国南方暴雨频发,易引发洪涝灾害,如何提高降水预报落区和强度的准确率是天气预报员一直关注的难点问题。中国气象局 2013 年 3 月公布的天气研究计划(2013—2020 年)将提高暴雨等重大灾害天气预报能力作为核心目标之一,认为目前我国的研究水平在暴雨等灾害性天气的精细化预报、延伸期预报、预报准确率等方面,还存在明显的预报难点和技术方法瓶颈。并指出大量常规观测资料和高时空分辨率的雷达等观测信息,在天气预报中的综合应用和定量应用技术非常欠缺,资料同化和精细模式技术与国际先进水平的差距呈加大趋势。天气预报中的这些难点问题对科学研究工作提出了更高的要求:缩小差距必须依靠科学技术进步,以先进的气象科研成果推动业务发展。因此,中国气象局近年着重推动气象预报预测业务与科研结合试点工作,使科研工作能够围绕业务难点和重点开展,科研成果能支撑和指导业务,实现理论与实践的紧密结合。为了促进气象科研与业务结合,2013 年起中国气象科学研究院与国家气象中心通过暖季试验、中小尺度灾害性天气研究和学术交流等方面开展合作,并将暴雨个例预报和分析作为重点,将科研成果转化到业务工作中,从而提高预报效率。

多种观测资料不能得到充分利用,资料同化方法的不完善,均制约着预报水平的提高。作为业务科研结合的试点工作,本研究针对 2013 年暖季试验中的一次强降水过程,使用国外成熟的 WRF-EnKF 实时预报系统,同化常规探空观测资料,进行确定性降水预报,检验 EnKF 方法同化探空资料对模式初值的改进能力,以及该系统对我国南方降水的预报效果。

目前,数值预报已成为天气预报的核心工具,其准确程度是一个国家气象现代化水平的重要标志。数值天气预报本质是一个初值问题,即依靠大气当前的状态,用模式模拟将来的演变和发展。提高模式初始条件最有效的方法就是尽可能多地、合理地吸收观测信息,数据同化技术就是获取模式准确初值的有效途径。近年来,多种资料同化方法逐步发展,广泛应用,成为了现代数值天气预报的核心(邹晓蕾,2009;熊春晖等,2013)。从最早期的多项式函数拟合方法(Panofsky,1949)、逐步订正法(Bergthorsson et al, 1955)、到最优插值法(Gandin,1965),三维变分(Lorenc,1986)和四维变分方法(Rabier et al,2000),以及集合卡尔曼滤波资料同化方法(Evensen,2003),观测资料的处理技术和质量都获得了很大的提高,也促进了模式预报水平的进步。同化方法中,背景误差协方差的估计是关键。集合卡尔曼滤波方法(ensemble Kalman filter,EnKF)将卡尔曼滤波与集合预报结合在一起,通过预报集合的样本方差估计得到随气流变化的背景误差协方差,成为当前数据同化的主流方法之一(张涵斌等,2014)。EnKF 方法的应用领域非常广泛,从理想数值模式到实际数值模式,从对流尺度系统的预报到全球尺度系统的预报(Snyder et al, 2003; Tong et al, 2005; Whitaker et al, 2008; Zhang et al, 2009)。

同化技术对数值天气预报的关键作用在中国也受到了越来越多的重视(龚建东,2013)。近年来,国内的相关研究在使用不同的同化方法、同化多种观测资料方面取得了很大进展:WRF-3DVAR 同化系统同化常规和地面观测资料(莫毅等,2008;王益柏等,2014);多尺度/分块逐批资料同化技术同化海洋气象观测资料(万齐林等,2012);WRF 集合均方根滤波(EnSRF)同化系统同化多普勒雷达资料(闵锦忠等,2013)等。基于 EnKF 流依赖背景误差协方差的优势,众多研究将不同模式与 EnKF 方法耦合,以改进模式初值,提高预报准确率。兰伟仁等(2010a;2010b)利用雷暴尺度 ARPS 模式及 Tong 等(2005)发展的 EnKF 系统,分别探讨了不考虑、考虑模式误差的情形下同化多普勒雷达资料的效果问题。庄照荣等(2011a;2011b)基于 GRAPES 模式建立了 EnKF 同化系统,能够成批同化常规观测资料,与三维变分相比其降水预报更接近实况。郝民等(2014)在 GRAPES 同化系统中同化了 L 波段秒级探空资料,发现高分辨率资料更好地改进了模式预报初值,降水预报评分提高,预报偏差明显变小。秦琰琰等(2012)将 EnKF 同化技术应用到对流系统中,进行了基于 WRF 模式的多普勒雷达径向风和反射率因子同化试验。张晶等(2014)利用 LAPS 系统同化 GPS(Global Positioning System)/PWV (Precipitable Water Vapor)资料,发现同化 GPS/PWV 资料对 LAPS 湿度场有显著改善,对随后的确定性预报产生正影响。

美国宾州州立大学张福青和其团队发展的 WRF-EnKF (Real-time Penn State WRF-EnKF System)实时预报系统经过多年改进,已经非常成

熟，应用在不同地区的台风预报和敏感性试验中，体现了其优越的性能(Xie et al，2013；Munsell et al，2014)。早在 21 世纪初，张福青和其合作团队就通过理想模式试验验证了 EnKF 对于对流尺度雷达资料同化的可行性(Snyder et al，2003；Zhang et al，2004)；还将 EnKF 方法与 WRF 模式结合，发现参数化集合可以部分消除模式误差的影响(Meng et al，2007)；并采用合理的雷达资料稀疏化方法，证实真实雷达径向风速度的 EnKF 同化能明显改善模式的初值(Zhang et al，2009)；随后通过大量深入系统的研究工作改进 WRF-EnKF 系统的性能，将飞机雷达观测资料同化进入初始场，并首次把该对流尺度集合分析系统应用于飓风实时预报，证实了其在飓风路径和强度预报准确率方面的优势，其性能明显优于其他预报系统(Zhang et al，2011；Weng et al，2012)；除了常规资料和雷达资料，卫星反演的云迹风资料也被同化到该系统之中(Zhang et al，2012)。总之，该 WRF-EnKF 资料同化系统能够同化地面观测资料、探空资料、雷达径向风等多种资料，并且能够改善模式初值，大幅度地提高飓风的预报准确率。

目前，该 WRF-EnKF 系统已经成功移植到中国气象局新一代 IBM 高性能计算机上，并针对我国南方(关键区域为广东)暖季降水设计了实时确定性预报方案(图 1a)。为了检验该系统对于我国南方降水的预报能力，本文使用这一系统同化探空观测资料，对 2013 年 5 月 14—16 日我国南方一次暴雨过程进行确定性预报试验。

1 资料同化方法和数值模拟设计

1.1 资料同化方法

WRF-EnKF 系统基于中尺度数值模式 WRF-ARW(Skamarock et al，2005)建立，通过 WRF 三维变分资料同化系统(WRF-3DVAR)产生扰动而得到初始集合成员，扰动变量包括水平风要素、位势温度、位势高度和水汽混合比，其他的预测变量如空气垂直速度、云水、雨水、雪、霰混合比等不被扰动；使用集合卡尔曼滤波(EnKF)方法进行资料同化。

集合卡尔曼滤波(EnKF)资料同化方法是 1994 年 Evensen(1994)提出的对经典 Kalman 滤波(KF)资料同化方法的近似，是集合预报和资料同化的结合。EnKF 的最大优点是可以利用蒙特卡罗方法给出背景误差统计特征的预报，这样可以方便地得到依流型而变(flow-dependent)的背景误差协方差，避免了静态背景误差协方差的缺陷，并且总体简单化，容易实现并行计算。Zhang 等(2004)在经典理论的基础上将 Kalman filter 方程改进如下：

$$X^a = X^f + \boldsymbol{K}(y - HX^f) \tag{1}$$

式中，X^f 代表没有进行资料同化的模式场(预报场)，X^a 是加入资料同化之后的模式场(分析场)，y 是大气的真实状态(观测场)，H 是由模式量到观测量之间转换的观测算子，$\boldsymbol{K}$ 是 Kalman 增益矩阵，定义如下：

$$\boldsymbol{K} = P^f H^{\mathrm{T}}(HP^f H^{\mathrm{T}} + R)^{-1} \tag{2}$$

式中，P^f 和 R 在这里分别代表背景和观测误差协方差。集合卡尔曼滤波同化方法的关键优势是利用一组预报集合的样本方差来统计出随天气形势变化的背景误差协方差 P^f：

$$P^f = \frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}[x_i^f - \overline{x}^f][x_i^f - \overline{x}^f]^{\mathrm{T}} \tag{3}$$

式中，N 表示集合样本数，x_i^f 是第 i 个集合成员的预报场，$\overline{x}^f$ 为集合平均值，T 表示共轭矩阵运算。简单而言，同化分析场 X^a 为观测场 y 与预报场 X^f 之差对预报场的加权修正，权重系数里 P^f 为背景误差协方差，EnKF 的背景误差协方差通过预报集合的样本方差来估计，它是随气流形态变化的，同时也与模式误差密切相关，因而能够合理估计模式误差。

1.2 数值模拟设计

本文采用 WRFV3.5.1 模式进行两组试验：一组为不同化任何观测资料的控制试验(NODA)；另一组为同化探空资料的同化试验(DA)。两组试验均选用 2013 年 5 月 14 日 08 时(北京时，下同)起报的 6 h 间隔的 1°×1° NCEP GFS(globle forecast model)60 h 预报数据(预报至 5 月 16 日 20 时)作为初始和边界条件。模拟采用三重双向嵌套(图 1a)，水平分辨率分别为 40.5、13.5 和 4.5 km，垂直层 43 层。云微物理过程选用 Morrison 双参数方案，辐射方案选用 RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案，边界层方案选用 YSU 方案，陆面过程选用 thermal diffusion 方案。第一、第二层嵌套采用 Kain-Fritsch 积云对流参数化方案，第三层嵌套关闭了对流参数化。控制试验模拟时段为 2013 年 5 月 14 日 08 时至 5 月 16 日 20 时，共积分 60 h。同化试验的物理方案配置与控制试验相同，同化的探空资料包含 11 个等压面上的温度、湿度和风场资料。同化试验在 5

月 14 日 08 时通过 WRF-3DVAR 扰动产生 30 个集合成员，并分别向前积分 12 h，然后在 5 月 14 日 20 时、15 日 02 时和 15 日 08 时三个时次（每 6 h 一次）通过 EnKF 方法循环同化探空资料，之后使用 15 日 08 时的集合平均分析场作为模式的初始条件进行确定性预报，向前预报 36 h（到 16 日 20 时）。由于此次过程降水范围较大，本文使用网格 D2 的模式输出结果对定量降水预报（QPF）进行分析，图 1b 给出了 D2 中被同化进入系统的探空站位置分布，其中 14 日 20 时同化了 53 个站（实心圆＋空心圆），15 日 02 时同化了 4 个站（空心圆），15 日 08 时同化了 55 个站（实心圆＋空心圆＋菱形）。

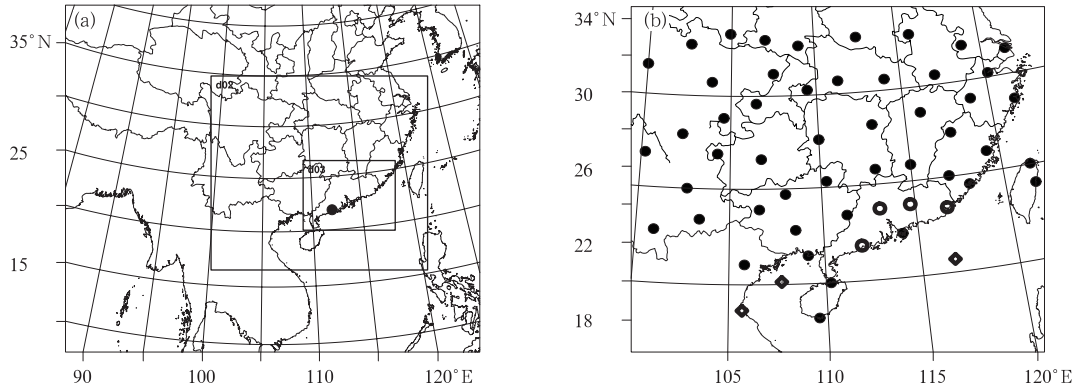


图 1　(a) 三层嵌套的模拟区域，(b) 区域 D2 内参与同化的探空观测站点分布

（实心圆和空心圆是 14 日 20 时，空心圆是 15 日 02 时，菱形、实心圆和空心圆是 15 日 08 时的探空站点）

Fig. 1　(a) Three nested model domains, (b) distribution of sounding stations used for assimilation in Domain 2

(Solid and hollow circles, hollow circles, as well as diamonds, solid and hollow circles are the sounding sites at 20:00 BT 14, 02:00 BT 15, 08:00 BT 15 May 2013, respectively)

2　天气过程及背景场

2013 年 5 月 14—16 日，江汉南部、江淮南部、江南大部、华南北部及东部，自西向东，自北向南出现大范围暴雨、局地大暴雨天气。14 日 08 时起 500 hPa 上有短波槽从西南地区东部向东移动（图略），15 日 08 时加深为切断低涡（图 2a）；850 hPa 上，14 日开始四川盆地附近有低涡活动（图略），15 日 08 时两湖盆地附近又出现新的低涡，低涡东部至长江中下游地区存在一条暖式切变线，并伴随西南急流的显著加强（图 2b）。总体而言，15 日 08 时，长江中游地区各层次都有低涡活动，系统相对深厚，低涡后部冷空气南压，与华南地区的西南暖湿气流相互对峙，形成有利于降水的天气形势。15 日 08 时至 16 日 08 时，降水主要发生在江南和华南地区（图 3a），本文主要检验 WRF-EnKF 系统对这段时期降水的预报效果。

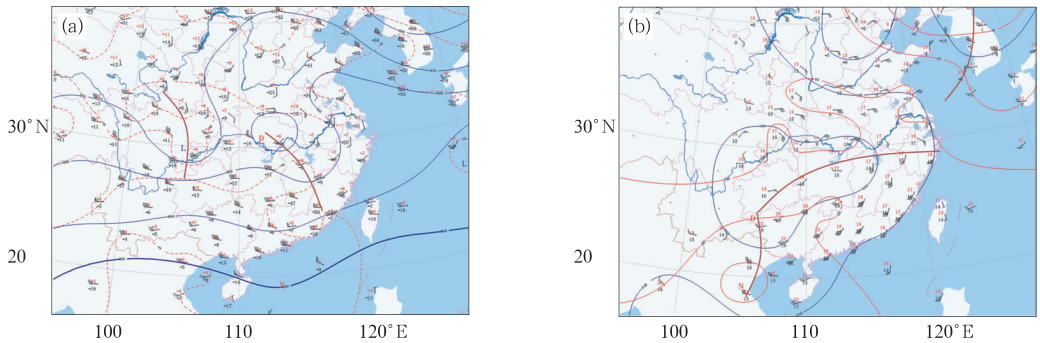


图 2　2013 年 5 月 15 日 08 时 (a)500 hPa，(b)850 hPa 天气图

（蓝色等值线：位势高度，单位：gpm；红色等值线：温度，单位：℃）

Fig. 2　500 hPa (a), 850 hPa (b) synoptic chart at 08:00 BT 15 May 2013

(blue isoline: geopotential height, unit: gpm; red isoline: temperature, unit: ℃)

3 定量降水预报效果检验

为检验 WRF-EnKF 系统确定性降水预报效果，本节将通过降水落区对比和 TS 评分客观检验方法对控制试验和同化试验的定量降水预报进行对比检验分析。参考公颖(2007)的划分方法，雨量等级划分为以下 5 个等级：小雨(0.01～9.99 mm)，中雨(10～24.99 mm)，大雨(25～49.99 mm)，暴雨(50～99.99 mm)，大暴雨(100～249.99 mm)和特大暴雨(>250 mm)。由于此次天气过程的定量降水预报主要检验时段中(5 月 15 日 08 时 至 5 月 16 日 08 时)地面观测站点的 24 h 累积降水量没有出现>250 mm 的特大暴雨，因此本文暂不考虑特大暴雨的 TS 评分情况。

图 3a 为 5 月 15 日 08 时至 16 日 08 时的 24 h 累积降水量实况分布图，雨带主要位于江南和华南地区，呈东北—西南向分布，存在南、北两个超过 50 mm 的暴雨区，南部暴雨区主要位于广西、广东、湖南和江西交界处，影响范围较广，且强度大，多数地区降水超过 100 mm，广东中北部的降水中心强度接近 250 mm；北部暴雨区主要位于江西和福建北部，范围较小，强度较弱，仅局部地区降水达到大暴雨等级。图 3b 和 3c 分别为控制试验(NODA)和同化试验(DA)预报的 24 h 累积降水量分布图，由图可见，控制试验预报出了雨带的大体走势，但对于南部暴雨区预报范围偏小，量级略偏大；北部雨区范围偏大，强度显著偏强，大部分地区预报降水量超过 100 mm，达到大暴雨级别。同化探空资料后(图 3c)，降水预报在强度和落区上均有较大改进。其中，南部暴雨区范围比控制试验有所增大，暴雨中心强度略减弱，更接近于实况；北部暴雨区的预报改进更为显著，强度和范围都大幅变弱、变小，尽管对于大暴雨落区的预报仍略大于实况，但位置和强度已和实况很近似。总体而言，对于 24 h 定量降水确定性预报同化试验与控制试验相比，在暴雨范围和强度预报上均有明显的改善。

为进一步定量化评估同化试验对定量降水预报的改进效果，图 4 给出了控制试验和同化试验 2013 年 5 月 15 日 08 时至 16 日 08 时的24 h降水预报 TS 评分。TS 评分值在 0～1 变化，其值越大表明对降水的预报准确率越高。从 24 h 降水预报 TS 评分结果看，控制试验和同化试验的 TS 评分均随着降水量级的增大而降低，但同化试验的 TS 评分值，除了在小雨量级上比控制试验略低之外，其他降水量极的评分均高于控制试验的结果。其中，大暴雨量级的 TS 评分提高幅度最大，从同化前的约 0.03 提高到同化后的约 0.11，其次是中雨和大雨。暴雨 TS 评分的增幅略小，大约提高了 10%。

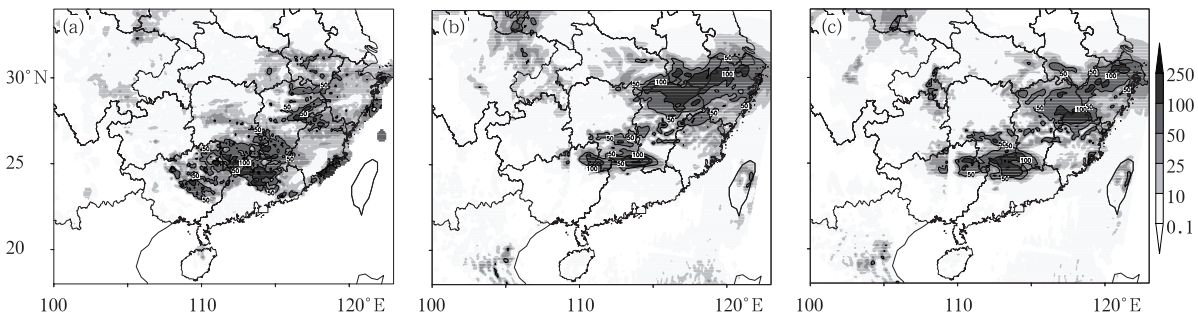


图 3 2013 年 5 月 15 日 08 时至 16 日 08 时 24 h 累积降水量(单位：mm)
(a)常规和加密地面观测降水实况，(b)控制试验，(c)同化试验

Fig. 3 24 h accumulate precipitation (unit: mm) from 08:00 BT 15 to 08:00 BT 16 May 2013
(a) conventional and surface precipitation from densely observing, (b) NODA, (c) DA

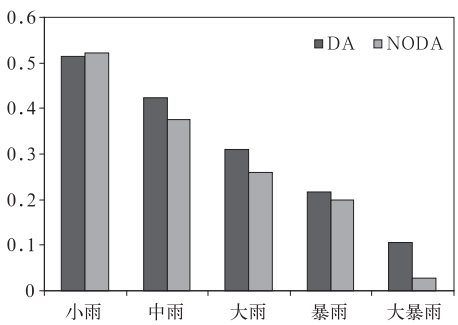


图 4 控制试验(NODA)和同化试验(DA)5 月 15 日 08 时至 16 日 08 时 24 h 累积降水量预报的 TS 评分

Fig. 4 The TS score of 24 h precipitation from 08:00 BT 15 to 08:00 BT 16 May 2013 forecasted by NODA and DA

4　EnKF 方法同化探空资料对模式初值的改进

同化试验通过 EnKF 方法同化探空观测资料后得到了集合平均的分析场，并将此分析场作为初始条件进行确定性预报。为检验 EnKF 方法同化探空资料后对模式初值的改变情况，借鉴 Bao 等(2013)的方法，分别统计了 2013 年 5 月 15 日 08 时同化试验的分析场(即确定性预报的初始场)和同一时刻控制试验的预报场中各要素的平均值、相对于观测资料的偏差和均方根误差的垂直变化(图 5)。检验区域为区域 D2，检验要素包括纬向风(U)、经向风(V)、温度(T)和相对湿度(RH)。具体方法如下：将区域 D2 内 55 个探空站点的观测资料作为参照(图 1b)，把控制试验和同化试验的模式格点场插值到探空站点上，分别计算观测(OBS)、未同化资料的控制试验(NODA)和同化试验(DA)中各要素的站点平均值(图 5a、5b、5c、5d)；NODA 和 DA 中各要素与观测值之间的偏差站点平均值(图 5e、5f、5g、5h)；以及 NODA 和 DA 相对于观测的均方根误差站点平均值(图 5i、5j、5k、5l)。

从各要素的站点平均值及其与观测的偏差来看，NODA 和 DA 试验均模拟出了与观测近似的垂直分布特征，且同化后的各要素偏差与未同化试验相比总体上呈现减小的趋势。

具体来看，观测纬向风整层为西风，由低层到高层逐渐增大，150～200 hPa 达到峰值(大约 20 m·s^{-1})。对流层中低层(400 hPa 以下)，DA 试验纬向风和观测偏差与 NODA 相比差别不大，在近地层附近(1000～925 hPa)都存在大值(大约－2 m·s^{-1})，在对流层中层(700～400 hPa)均在－1 m·s^{-1}～0 间变化；对流层高层(300～100 hPa)两者差别变得显著，除 200 hPa 附近，DA 偏差均小于 NODA。与纬向风峰值对应，在 150～200 hPa，两个模式与观测的偏差也达到最大，且 DA 试验的偏差(1.5 m·s^{-1})与 NODA(2.3 m·s^{-1})试验相比减小幅度明显(图 5a 和 5e)。

由探空观测平均可知，经向风低层为弱南风(5 m·s^{-1})；高层盛行北风，150 hPa 附近达到峰值(－8 m·s^{-1})。并且，除了平均经向风峰值(150 hPa)附近之外，DA 试验的经向风垂直曲线在各层都比 NODA 更接近 OBS。与之对应，DA 的偏差比 NODA 显著减小，其中，400～200 hPa 间改善最显著，250 hPa 附近偏差大小从 NODA 的 3 m·s^{-1}减小到 DA 的 1.5 m·s^{-1}(图 5b 和 5f)。

对于温度和湿度的站点平均垂直廓线，两个试验均模拟出了其随高度降低的变化趋势；从偏差大小上看，DA 试验的偏差比 NODA 明显减小(图 5c、5d、5g、5h)。其中，NODA 与观测的温度偏差在－1～1℃之间波动，同化探空后整层的温度偏差均明显小于 NODA，减小幅度高达 50%。而 NODA 的湿度偏差 200 hPa 以下为正偏差，近地层和 250 hPa 附近最大，约为 12%，200 hPa 以上由正转负，150 hPa 为－10%。同化探空后，200 hPa 以下 DA 试验的湿度偏差均比 NODA 有不同程度的改善，其中 250 hPa 偏差峰值附近减小幅度最大：偏差由 NODA 的 12%减小到 DA 的 6.5%。

与偏差的整体减小相对应，同化了探空资料后，纬向风、经向风、温度和相对湿度相对于观测的均方根误差均有所减小，并且其改进效果更明显(图 5i～5l)。两个试验的四个要素在均方根误差的垂直分布特征上均较相似，但从减小幅度看，风场在中高层的减小幅度较大，其中，纬向风减小幅度在 250 hPa 附近达到峰值(约 2.8 m·s^{-1})，DA 试验的均方根误差比 NODA 减小了一半；经向风最大减小幅度在 200 hPa 附近，由 NODA 的 6.7 m·s^{-1}减小到 DA 的 4 m·s^{-1}。与风场不同，温度均方根误差的最显著改善位于低层和高层(最大改善幅度为 0.7℃)，中层的改善较小(0.15～0.4℃)。相对湿度均方根误差在高层和低层的减小幅度都不大，其最显著改善位于中层 400 hPa 左右，最大减小幅度为 12%。

总体而言，通过 EnKF 方法同化了探空资料后，DA 试验初始条件的各气象要素相对观测的偏差和均方根误差均较 NODA 试验相同时刻的预报场有不同程度的减小，风场和相对湿度在对流层中高层的改善最明显；温度场整层都有改善，低层和高层改善更显著。

为了更加直观地分析 WRF-EnKF 系统同化探空资料后对大气环境场的改变情况，图 6 和图 7 分别给出了两组试验 2013 年 5 月 15 日 08 时的 850 和 500 hPa 温度场、相对湿度场、风场水平空间分布，及相应的探空观测值，以及 DA 试验相对于 NODA 试验的增值(DA 减去 NODA)。而为了更清晰地对比 NODA 和 DA 试验对风场的预报和分析效果，将两次模拟试验的格点资料分别插值到站点上，

并绘制矢量风，直接与观测进行对比。从图中可以看出，NODA 试验基本上预报出了探空观测各要素在两个等压面上的总体分布形势，但在具体数值上均与探空观测值存在较大偏差（图 6a、6b、6c 和图 7a、

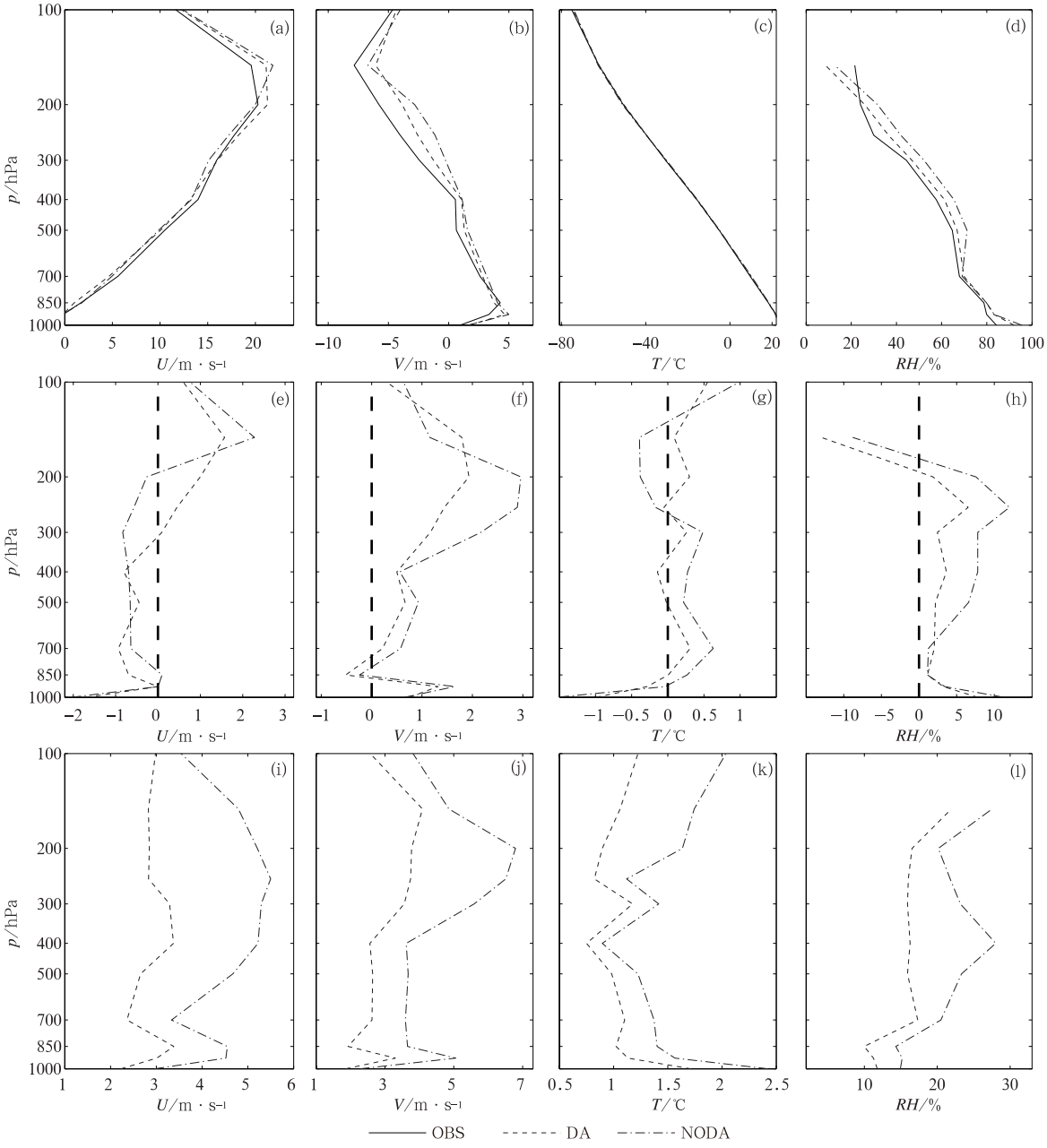


图 5 2013 年 5 月 15 日 08 时区域 D2 内探空站点平均垂直剖面图
第一行：观测（OBS）、控制试验（NODA）和同化试验（DA）的（a）纬向风平均值，（b）经向风平均值，（c）温度平均值和（d）相对湿度平均值；第二行：控制试验（NODA）和同化试验（DA）相对于观测（OBS）的（e）纬向风偏差，（f）经向风偏差，（g）温度偏差和（h）相对湿度偏差；第三行：控制试验（NODA）和同化试验（DA）相对于观测（OBS）的（i）纬向风均方根误差，（j）经向风均方根误差，（k）温度均方根误差和（l）相对湿度均方根误差

Fig. 5 Vertical profiles of mean (a) U, (b) V, (c) T, and (d) RH averaged over all sounding sites in Domain 2 at 08:00 BT 15 May 2013, and the corresponding means interpolated from the two experiments NODA and DA; vertical profiles of the mean biases for NODA and DA verifying against the soundings for (e) U, (f) V, (g) T, and (h) RH; vertical profiles of the RMS errors for NODA and DA verifying against the soundings for (i) U, (j) V, (k) T, and (l) RH

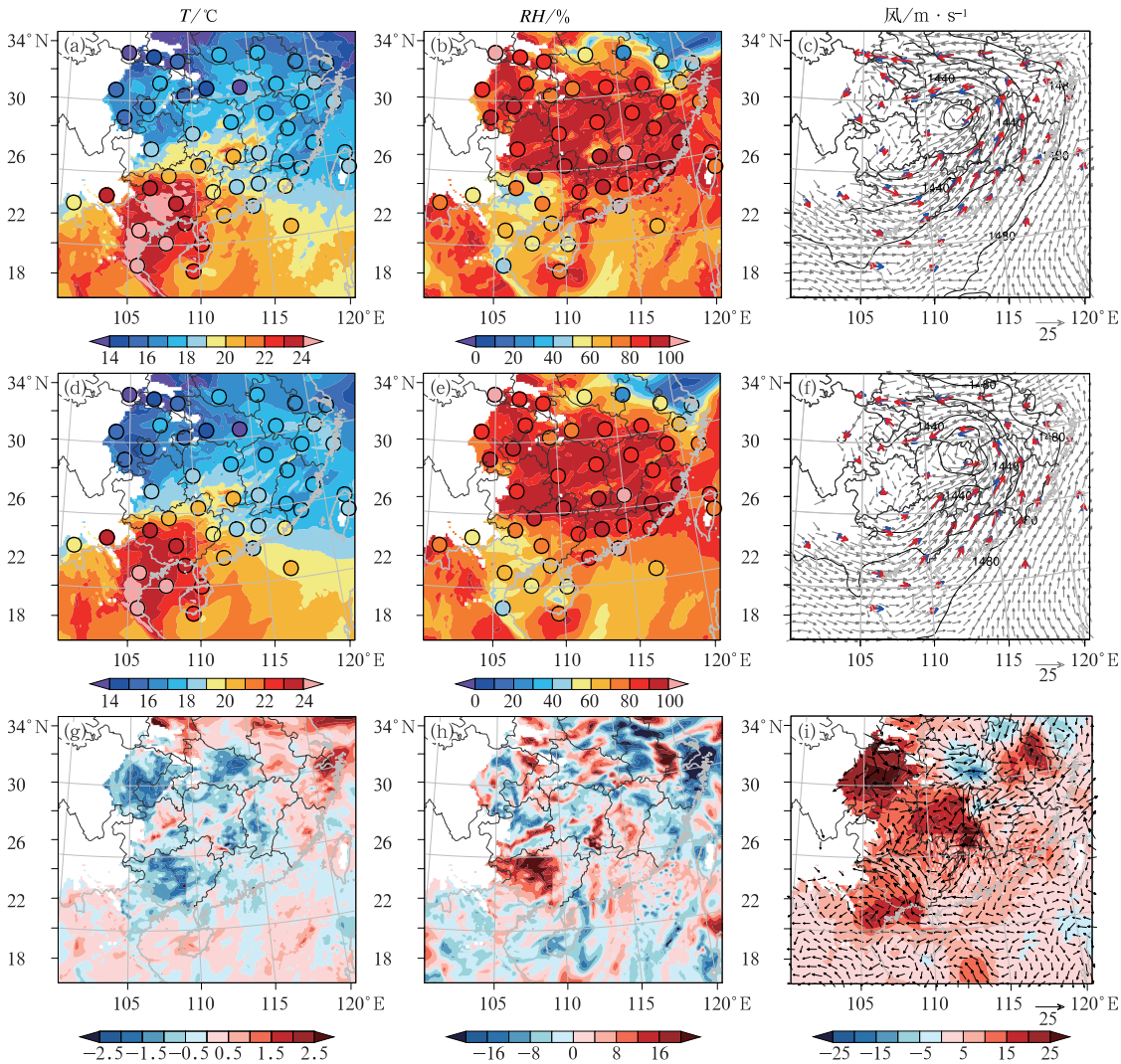


图 6　2013 年 5 月 15 日 08 时 850 hPa 控制试验(a)温度场，(b)相对湿度场，(c)风场和位势高度场；同化试验(d)温度场，(e)相对湿度场，(f)风场和位势高度场，以及同化试验与控制试验各要素差值(DA－NODA)：(g)温度场，(h)相对湿度场，(i)风场和位势高度场

(a 和 d 中的彩色圆、b 和 e 中的彩色圆分别代表探空观测站点的温度和相对湿度，c 和 f 中的两色箭头分别代表观测(蓝色)矢量风和两个试验(红色)插值到站点的矢量风)

Fig. 6　Distribution of different variables at 850 hPa at 08:00 BT 15 May 2013 in NODA: (a) T, (b) RH, (c) wind and geopotential height (unit: gpm); in DA: (d) T, (e) RH, (f) wind and geopotential height; and the element difference between DA and NODA: (g) T, (h) RH, (i) wind and geopotential height

[Color circles in (a), (d) indicate T values from sounding observations, in (b), (e) indicate RH. Sounding wind vectors (blue) and model wind vectors (red) are plotted in (c), (f) over the sounding stations]

7b、7c)。同化探空资料的 DA 试验分析场在减小偏差方面有明显效果，其各要素的分析值均比 NODA 更接近观测(图 6d、6e、6f 和图 7d、7e、7f)。

具体来看，850 hPa上 NODA 试验的温度值在 32°N 以北以及东南沿海地区均低于观测，其中江浙附近低估最显著；而在 32°N 以南的内陆地区，NODA 的温度值总体高于探空观测，且高估在重庆、湖北、广西、湖南的探空站点附近表现最为明显(图 6a)。与 NODA 相比，DA 分析场的温度在 D2 区域北部边缘和东部沿海显著增高，云南贵州附近也较观测略偏大，其余的内陆地区则呈明显偏低趋势(图 6g)。可见，DA 试验通过 EnKF 方法同化探空资料对温度场进行了调整，减小了与探空观测之间的偏差(图 6d)。DA 试验的分析场相对于 NODA 相同时刻的预报场的正增量和 NODA 与观测的负偏差呈现了很好的对应关系，反之亦然(图6a和6g)。

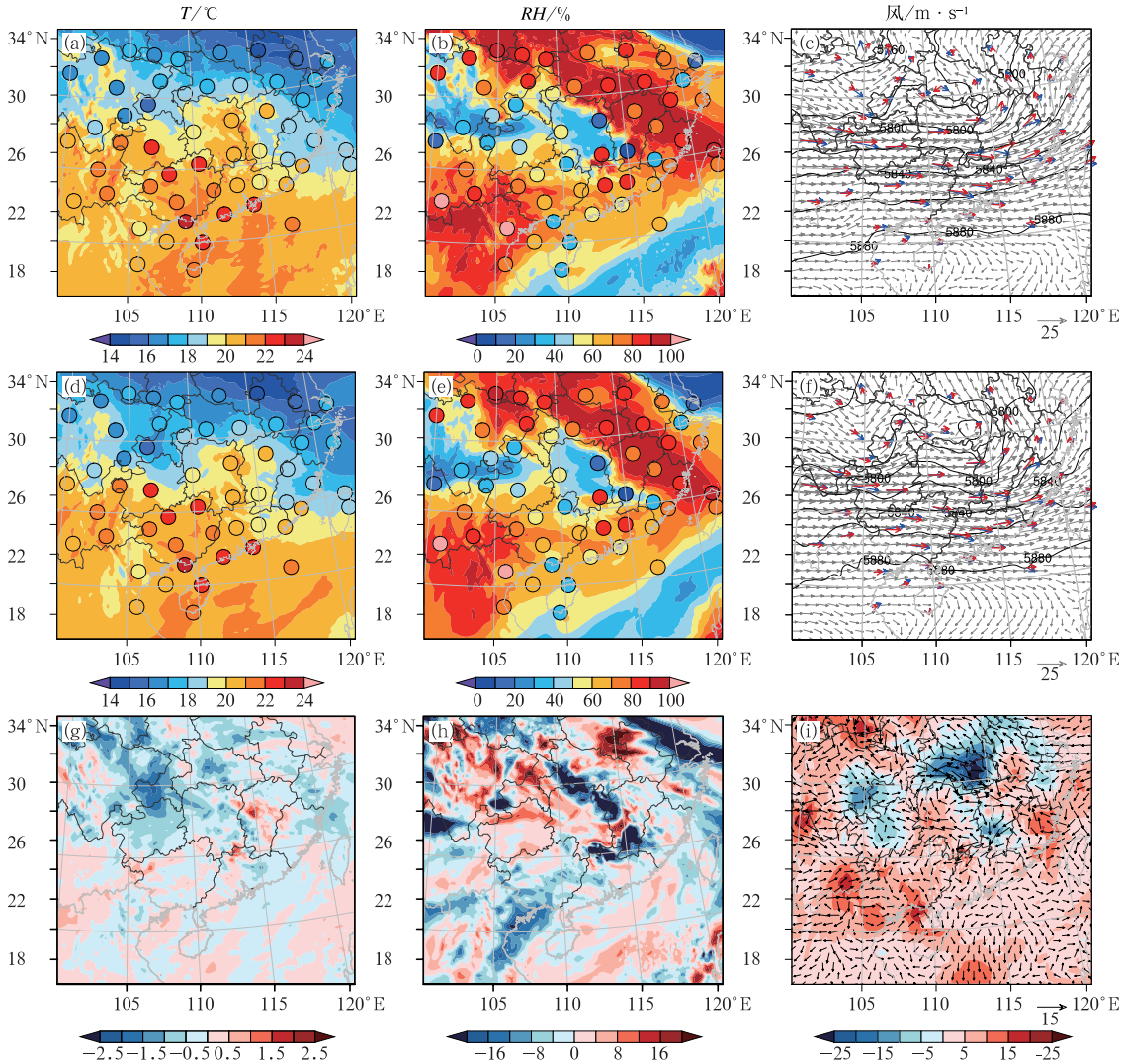


图 7 与图 6 相同，但是为 500 hPa

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for 500 hPa

NODA 预报场的 850 hPa 湿度与观测的偏差大值区主要位于湿度梯度较大的区域，例如：苏浙皖沪地区有干湿空气交汇，NODA 的高湿度区的相对湿度值比观测值偏低而低湿度区的相对湿度值偏高。在广西附近，其空气较干，NODA 预报场的湿度值要远低于观测(图 6b)。相对于 NODA 试验，DA 分析场的湿度值较大幅度的降低主要发生在 NODA 与观测正偏差显著的地区(苏浙皖沪地区的低湿度区)，而大幅度升高主要发生在 NODA 与观测负偏差的地区(苏浙皖交界处和广西附近)(图 6e)。因此，从 850 hPa 湿度来看，DA 分析场与观测之间的偏差幅度较 NODA 试验有显著减小，即 DA 分析场比 NODA 预报场更接近实况(图 6b)。850 hPa 的风场，在低涡附近 NODA 试验的风矢量和观测之间在风向(箭头夹角)和风速(箭头长短)上都有较大偏差，而同化探空后，DA 试验的风矢量与观测风矢量之间的夹角减小、大小更接近。可见 DA 试验的分析场对风场也有很好的调整，其更接近观测。同样，同化探空资料对位势高度场也有明显改进，DA 试验的位势高度值比 NODA 试验普遍增大，在低涡中心及其西北部增幅最明显，北部略有减小，导致低涡强度减弱，更接近于探空观测(图 6c、6f、6i)。低涡减弱改进了降水预报：NODA 试验对该地区降水预报偏强，DA 试验预报的降水强度降低。

对于 500 hPa 温度、相对湿度和风场，DA 试验相对于 NODA 试验具有同样显著的改善：DA 与观测的偏差减小，更接近观测场(图 7)。例如：与 NODA 相比，DA 的温度值在区域西北部显著降低，南

北温差增加；对于湿度场，由于 NODA 相对于观测的 500 hPa 相对湿度偏差比 850 hPa 层明显大很多，因此 DA 试验对 500 hPa 湿度的调整幅度也较 850 hPa 大很多，区域东北部西北－东南走向的高湿度带经过调整后宽度变窄、强度加强，两侧空气更干，湿度梯度增加；此外，DA 试验分析场调整后的风矢量的风向和风速均更接近观测，与观测的夹角减小、风速大小偏差减小；对于位势高度场，NODA 中北部的横槽在 DA 中加深为一低涡，其他区域高度场略有增加，系统强度增强。

5　结论和讨论

为了检验 WRF-EnKF 系统对我国南方降水确定性预报的应用效果，本文使用 2013 年 5 月 14 日 08 时起报的每 6 h 间隔的 NCEP GFS 60 h 预报场作为数值预报的初、边值条件，进行了一组对比试验：控制试验（NODA）和同化试验（DA）。控制试验不同化任何资料；同化试验通过 EnKF 方法循环同化三次常规探空资料，并使用最后一次同化时刻（15 日 08 时）30 个成员的集合平均分析场作为初始场进行确定性预报。将两组试验的降水预报和实况进行对比，并分析了同化试验末次同化的分析场（即确定性预报的初始场）相对于控制试验同一时刻的预报场的改进情况。结论如下：

（1）WRF-EnKF 系统同化探空观测资料可以改善暴雨落区和强度的预报，尤其是 0～24 h 预报的改善效果较好。

（2）同化试验的分析场与控制试验的预报场相比，各物理量在不同层次上与观测的偏差和均方根误差均有不同程度的减小，风场和相对湿度在对流层中高层减小幅度较大；温度整层都有改善，在低层和高层改善更显著。

（3）通过对比控制试验预报场和同化试验分析场各变量在对流层低层（850 hPa）和中层（500 hPa）的水平分布可见，EnKF 方法同化探空资料对温度、湿度、风场和位势高度场在这两个层次均有大幅度的调整，调整后的 DA 分析场比 NODA 预报场更接近实际观测，有效改进了模式初值。

综上，WRF-EnKF 系统同化探空资料后，有效减小了模式初始条件与实况的偏差，使预报的气象要素场更加接近实况，24 h 定量降水预报在强度和落区上均较未同化资料的数值试验与实况更相符。但是，同化试验的 36 h 时效的 24 h 累积降水落区预报并不理想（图略），可见 WRF-EnKF 同化系统对于 QPF 的改善具有一定的时效性。但是，由于本研究仅针对一个降水个例进行试验，检验结果不具有广泛的代表性，还需要进行更多的样本试验来对比验证这一系统的性能。此外，本研究中的个例试验同化的资料只有探空观测，并且分析所用的网格分辨率（13.5 km）对于中小尺度系统而言仍然较粗，因此，今后的工作要针对更多的降水个例进行试验，并提高模式分辨率，同化更多的观测资料（如地面观测、雷达径向风资料等），进一步检验该系统对不同天气背景下降水的预报能力。

参考文献

龚建东. 2013. 同化技术：数值天气预报突破的关键—以欧洲中期天气预报中心同化技术演进为例. 气象科技进展，3(3)：6-13.

公颖. 2007. 2007 年汛期 AREM 模式降水预报效果检验分析. 暴雨灾害，26(4)：372-380.

郝民，田伟红，龚建东. 2014. L 波段秒级探空资料在 GRAPES 同化系统中的应用研究. 气象，40(2)：158-165.

兰伟仁，朱江，Ming Xue，等. 2010a. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 I. 不考虑模式误差的情形. 大气科学，34(3)：640-652.

兰伟仁，朱江，Ming Xue，等. 2010b. 风暴尺度天气下利用集合卡尔曼滤波模拟多普勒雷达资料同化试验 II. 考虑模式误差的情形. 大气科学，34(4)：737-753.

闵锦忠，毕坤，陈耀登，等. 2013. 基于物理约束扰动的 EnSRF 雷达资料同化. 大气科学学报，36(2)：129-138.

莫毅，潘晓滨，臧增亮，等. 2008. 资料同化对一次华南暴雨影响的数值试验研究. 暴雨灾害，27(4)：289-306.

秦琰琰，龚建东，李泽椿. 2012. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的观测系统模拟试验. 气象，38(5)：513-525.

万齐林，何金海. 2012. 海洋气象观测系统在热带气旋资料同化中的应用. 中国工程科学，14(10)：33-42.

王益柏，梅娜，范磊，等. 2014. WRF 模式对 2013 年 1 月华北一次大雾的数值对比试验. 气象，40(12)：1522-1529.

熊春晖，张立凤，关吉平，等. 2013. 集合-变分数据同化方法的发展与应用. 地球科学进展，28(6)：648-656.

张涵斌，陈静，智协飞，等. 2014. GRAPES 区域集合预报系统应用研究. 气象，40(9)：1076-1087.

张晶，顾松山，楚志刚，等. 2014. LAPS 同化 GPS/PWV 资料在暴雨预报中的应用研究. 气象，40(1)：76-85.

庄照荣，薛纪善，李兴良. 2011a. GRAPES 集合卡尔曼滤波资料同化系统 I：系统设计及初步试验. 气象学报，69(4)：620-630.

庄照荣，薛纪善，李兴良. 2011b. GRAPES 集合卡尔曼滤波资料同化系统 II：区域分析及集合预报. 气象学报，69(5)：860-871.

邹晓蕾. 2009. 资料同化理论和应用（上册）. 北京：气象出版社.

Bao X，Zhang F. 2013. Evaluation of NCEP-CFSR，NCEP-NCAR，

ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. J Climate, 26: 206-214.

Bergthorsson P, Döös B R, Fryklund S, et al. 1955. Routine forecasting with the barotropic model. Tellus, 7: 272-274.

Evensen G. 1994. Sequential data assimilation with a nonlinear quasi-geostrophic model using Monte Carlo methods to forecast error statistics. J Geophys Res, 99: 10143-10162.

Evensen G. 2003. The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. Ocean Dynamics, 53: 343-367.

Gandin L S. 1965. Objective Analysis of Meteorological Fields. Springfield: U. S. Department of Commerce.

Lorenc A C. 1986. Analysis methods for numerical weather prediction. Quart J Roy Meteor Soc, 112: 1177-1194.

Meng Z, Zhang F. 2007. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II: Imperfect model experiments. Mon Wea Rev, 135: 1403-1423.

Munsell E B, Zhang F. 2014. Prediction and uncertainty of Hurricane Sandy (2012) explored through a real-time cloud-permitting ensemble analysis and forecast system assimilating airborne Doppler radar observations. J Adv Model Earth Syst, 6: 1-20.

Panofsky H. 1949. Objective weather-map analysis. J Appli Meteor, 6: 386-392.

Rabier F, Järvinen H, Klinker E, et al. 2000. The ECMWF operational implementation of four-dimensional variational assimilation. I: Experimental results with simplified physics. Quart J Roy Meteor Soc, 126: 1143-1170.

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2005. A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical Note, NCAR/TN-468+STR.

Snyder C, Zhang F. 2003. Tests of an ensemble Kalman filter for convective-scale data assimilation. Mon Wea Rev, 131: 1663-1677.

Tong M, Xue M. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of Doppler radar data with a compressible nonhydrostatic model: OSS experiments. Mon Wea Rev, 133: 1789-1807.

Weng Y, Zhang F. 2012. Assimilating Airborne Doppler Radar Observations with an Ensemble Kalman Filter for Convection-Permitting Hurricane Initialization and Prediction: Katrina (2005). Mon Wea Rev, 140: 841-859.

Whitaker J S, Hamill T, Wei X, et al. 2008. Ensemble data assimilation with the NCEP global forecast system. Mon Wea Rev, 136: 463-482.

Xie B, Zhang F, Zhang Q, et al. 2013. Observing strategy and observation targeting for tropical cyclones using ensemble-based sensitivity analysis and data assimilation. Mon Wea Rev, 141: 1437-1453.

Zhang F, Snyder C, Sun J. 2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 132: 1238-1253.

Zhang F, Weng Y, Sippel J, et al. 2009. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of doppler radar observations with an ensemble Kalman filter. Mon Wea Rev, 137: 2105-2125.

Zhang F, Weng Y, Gamache J F, et al. 2011. Performance of convection-permitting hurricane initialization and prediction during 2008－2010 with ensemble data assimilation of inner-core airborne Doppler radar observations. Geophys Res Lett, 38: L15810.

Zhang F, Zhang M, Poterjoy J. 2012. E3Dvar: Coupling an ensemble Kalman filter with three-dimensional variational data assimilation in a limited-area weather prediction model and comparison to E-4Dvar. Mon Wea Rev, 141: 900-917.