薛谌彬，陈娴，吴俞，等. 2017. 雷达资料同化在局地强对流预报中的应用 [J]. 大气科学, 41 (4): 673–690. Xue Chenbin, Chen Xian, Wu Yu, et al. 2017. Application of radar data assimilation in local severe convective weather forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 673–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15228.

雷达资料同化在局地强对流预报中的应用

薛谌彬[1] 陈娴[2, 3] 吴俞[4] 徐星生[1] 高勇[5]

1 江西省气象台，南昌 330096
2 江西省基础地理信息中心，南昌 330029
3 流域生态与地理环境监测国家测绘地理信息局重点实验室，南昌 330029
4 海南省气象台，海口 570203
5 中国人民解放军 95994 部队，甘肃省酒泉市 735006

摘 要 采用 ARPS 模式的资料分析系统 ADAS 同化多普勒雷达径向速度和反射率因子资料，分析两者对初始场的改进作用，并应用于 WRF 中尺度模式中对 2012 年 8 月 21 日江西省一次局地强对流过程进行了模拟试验。分析结果表明：（1）ADAS 同化系统能够利用雷达径向速度和反射率因子资料有效增加初始场中的中小尺度风场信息和云、水物质含量，并通过湿绝热或非绝热初始化对温度场、湿度场和风场进行调整，使初始场在动力和热力上达到平衡。（2）同化径向速度后对改善模式初始场的动力场有重要贡献，而对大气水凝物和降水的预报影响较小；同化反射率因子的主要作用是调整初始场中的水凝物场和热力场，有效缩短了模式的“spin-up”时间，明显改进了定量降水预报；同时同化雷达径向速度和反射率因子后，初始场中快速调整出了中小尺度风场水平辐合、垂直运动以及合理的温、湿分布，对 3 小时内雨带形状、降水落区及定量降水的预报与实况更接近。（3）模拟试验表明，同时同化径向速度和反射率因子能成功模拟出本次对流单体风暴的中 β 尺度三维空间分布结构及其演变过程，中低层切变线的辐合抬升强迫作用是对流单体风暴组织、发展和维持的主要动力机制之一，对流凝结潜热加热在对流单体风暴的发生发展中发挥了重要作用。因此，雷达资料同化对提高临近数值天气预报的准确率以及对强对流天气系统的模拟能力具有重要意义。

关键词 雷达资料同化 ARPS 模式 强对流 数值模拟

文章编号 1006-9895(2017)04-0673-18 **中图分类号** P456 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1608.15288

Application of Radar Data Assimilation in Local Severe Convective Weather Forecast

XUE Chenbin[1], CHEN Xian[2, 3], WU Yu[4], XU Xingsheng[1], and GAO Yong[5]

1 *Jiangxi Provincial Meteorological Observatory*, *Nanchang* 330096
2 *Jiangxi Provincial Geomatics Center*, *Nanchang* 330029
3 *Key Laboratory of Watershed Ecology and Geographical Environment Monitoring*, *National Administration of Surveying*, *Mapping and Geoinformation*,

收稿日期 2015-10-18；**网络预出版日期** 2016-08-16

作者简介 薛谌彬，男，1985 年出生，硕士研究生，主要从事中小尺度数值模拟与资料同化研究。E-mail: xuechenbin85@163.com

通讯作者 陈娴，E-mail: chenxian8685@163.com

资助项目 国家科技支撑计划课题 2015BAH50F01，中国气象局公益性行业专项 GYHY201406006，国家测绘地理信息公益性行业科研专项 201512026，江西省气象局面上项目“省际雷达资料质量控制和三维组网技术应用研究”，江西省科技支撑计划重大项目 20152ACG70002

Funded by National Key Technology R&D Program of China (Grant 2015BAH50F01) , Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) of China (Grant GYHY201406006), Special Scientific Research Fund of Surveying, Mapping and Geo-information Public Welfare Profession of China (Grant 201512026), General Program of Jiangxi Provincial Meteorological Bureau, Jiangxi Provincial Science and Technology Supporting Program (Grant 20152ACG70002)

Nanchang 330029
4 *Hainan Provincial Meteorological Observatory*, *Haikou* 570203
5 *Troops 95994 of People's Liberation Army*, *Jiuquan City*, *Gansu Province* 735006

Abstract The Advanced Regional Prediction System (ARPS) along with its Data Analysis System (ADAS) were used to analyze the improvement of the initial field by assimilating radar radial velocity and reflectivity data. A local severe convective event that occurred on 21 August 2012 in Jiangxi Province was then simulated and studied by using the adjusted initial field in the Weather Research and Forecasting (WRF) model. The main results are as follows. (1) Both the mesoscale wind fields and cloud, moisture contents of the initial field were improved by assimilation of radar radial velocity and reflectivity data. The diabatic initialization of ADAS could adjust the temperature, moisture and wind fields to balance the dynamic and thermodynamic process of the initial field. (2) Assimilation of radar radial velocity made an important contribution to the improvement of the initial dynamic field, but it had little effect on atmospheric hydrometeors and precipitation forecast. Assimilation of radar reflectivity played a role mainly in adjusting the initial hydrometeors and thermal fields, which efficiently mitigated the spin-up time of the model and significantly improved the quantitative rainfall forecast. Assimilation of both radar radial velocity and reflectivity could result in a rapid development of the mesoscale horizontal wind convergence and vertical motion, adjusted temperature and moisture distributions reasonably in the initial field, and improved quantitative precipitation forecast, especially for 3-hour forecast. (3) The results of simulation show that the three dimensional structure of the convective storm and its evolution have been successfully simulated by assimilating radar radial velocity and reflectivity. The convergence and uplift force of the shear line at the middle and lower levels is one of the major dynamic mechanisms for the organization, development and maintenance of the convective storm. The convective condensation and associated latent heat release played an important role in the development of the convective storm. Therefore, radar data assimilation is of great importance to improve the accuracy of the numerical weather prediction and the model ability for the simulation of severe convective weather.

Keywords Radar data assimilation, ARPS (Advanced Regional Prediction System), Severe convection, Numerical simulation

1 引言

近年来，随着资料同化系统和高分辨率数值模式的发展，模式对中小尺度系统的模拟效果和降水的预报能力有了显著提高。但是由于受观测资料时空分辨率的限制，包含中小尺度天气系统的信息较少，无法为数值模式提供一个准确描述大气真实状态的初始场，特别是在中尺度对流系统发生发展前，初始状态不能很好地包含中尺度系统的环流、湿度、云水、潜热等信息，使得模式出现由“spin-up”（Kasahara et al., 1988）引起的预报延迟现象，这是模式难以对暴雨、强对流等中小尺度天气系统进行准确预报的重要原因之一。与其他观测资料相比，雷达资料具有更高的时空分辨率，能够很好地表征对流尺度天气系统的特征。因此，有效地将雷达资料加入到同化系统中能够提供更加准确的初始场，从而提高模式对暴雨、强对流等中尺度天气过程的预报能力。

近些年，国内外气象学家们致力于利用高时空分辨率的雷达资料，通过反演、非绝热初始化和直接同化等多种方法将雷达观测信息引入模式初始场中，并对物理量场进行合理调整，得到动力和热力上更加平衡的初始场，从而提高模式预报水平。雷达径向速度和反射率资料的同化分为间接同化和直接同化。径向速度的间接同化是利用 VAD、VVP 等风场反演方法反演得到局地水平风廓线，然后同化进模式。但是该方法基于风呈线性分布、局地均匀等假设条件，在强天气发生时风场往往不满足此类假设，所以算法上存在误差。为了避免上述缺陷，现在大多采用直接同化的方法。径向速度的直接同化是将模式空间的风投影到雷达观测坐标来计算观测增量，该方法被广泛应用于 WRF、ARPS 和 GSI 等主流模式（Hu et al., 2006b; Li et al., 2012; Abhilash et al., 2012）。

反射率资料的直接同化是将总水物质作为控制变量，采用暖云方案计算水汽、雨水和云水混合比增量并进行极小化计算。但暖云方案过于简单，无法完整体现雨水、云水、水汽、云冰、雪、雹等水凝物的分布特征，也无法描述水凝物凝结潜热释放对大气温度场、湿度场和动力场的作用。因此，气象学家们更倾向于使用云分析方案实现对反射率资料的间接同化（李永平等，2004；Hu et al.,

2006a；许小永等，2006；Gao and Stensrud, 2014; Wattrelot et al., 2014），实践证明该方法是有效的。例如，Xue et al.（2003）运用 ARPS 模式及 ADAS 资料分析系统，同化多普勒雷达资料进行初始场调整和云分析，精确模拟出了初始时刻的对流风暴。Wang et al.（2013）针对 WRF-3DVAR 同化系统以往直接同化雷达反射率资料的缺点发展了间接同化方法，通过引入新的观测算子，将根据反射率反演得到的雨水含量和云内水汽含量同化到初始场中，模拟试验表明同化反射率资料后短期降水预报能力提高至 7 h。Chen et al.（2015）基于 WRF 模式的变分同化系统 WRFDA 研发了云液态/冰水路径观测算子，将 NASA（National Aeronautics and Space Administration）的全球静止卫星云产品循环同化到 WRF 模式中改进了 150 hPa～300 hPa 的温度场、湿度场和风场信息，试验表明云水信息的引入能显著减小模式的预报误差。Snook et al.（2011）基于 ARPS 模式和集合卡尔曼滤波同化系统同化了多部雷达资料，并成功模拟一次中尺度对流系统及引发的龙卷天气过程。Jones et al.（2013）利用集合卡尔曼滤波同化系统同时同化了卫星资料和雷达资料，分析表明卫星资料和雷达资料分别对中高层大气和低层大气有改善作用，这两种类型的观测资料为同化系统提供了独立的信息，对提高中尺度模式的同化和预报水平有重要作用。

国外气象学家在借助中尺度模式同化雷达资料来深入研究中小尺度系统发生发展的物理机制方面，已经展开了相关研究。Gasperoni et al.（2013）运用 ARPS 模式的三维变分同化系统 3DVAR 对一次对流过程进行了模拟试验，研究结果表明同化雷达反射率资料减小了低层水汽误差，对模式的对流初始化过程有积极影响。Dawson II et al.（2015）基于三维变分同化系统同化了雷达资料，对一次超级单体引发的龙卷进行了模拟分析，结果表明，通过改善复杂云分析方案中的微物理过程能减小中气旋轨迹预报的误差，模拟出的龙卷涡旋强度更强，生命史更长，这些特征和观测到的更接近。并且还指出，水凝物粒子大小的分布特征对风暴热力和动力上的反馈作用对于提高龙卷风暴的预报水平非常重要。Schenkman et al.（2014）利用 ARPS 模式成功模拟了一次超级单体龙卷风暴，敏感性试验表明，低层由于摩擦作用使水平涡度产生倾斜，这对近地面垂直涡度的发展有重要作用。Meng et al.（2012）基于 WRF 中尺度模式同化了多部雷达资料，对 2007 年华南春季准静止锋上一次飑线过程的弓形结构和后侧入流的形成和发展进行了模拟，并探讨了形成后侧入流的主要原因。国内在利用 ADAS 同化系统提高数值模拟能力、改进对流预报方面已有较多的研究（盛春岩等，2006；杨艳蓉等，2008；王洪等，2015），但是对局地性的短历时强对流风暴个例的模拟试验和针对对流风暴的触发和发展的主要机制方面研究分析较少。

本文采用 ARPS 模式的资料分析系统 ADAS，同化了多部多普勒雷达的径向速度和反射率因子资料并应用于 WRF 中尺度模式。ADAS 资料分析系统中的复杂云分析模块能有效地从多普勒雷达资料反演得到大气的云水信息，对初始时刻的云微物理量场、潜热场、动力场和湿度场进行调整，为中尺度模式的非绝热初始化提供对流尺度信息，从而有效地实现模式的热启动，缩短了模式的“spin-up”时间，使模式能够在积分 1 h 后模拟出和实况非常接近的风场、水凝物等物理量场，显著提高了模式对局地强对流天气的定量降水预报能力。本文通过对 2012 年 8 月 21 日江西省一次局地强对流过程的对比试验，检验了雷达资料的同化对中尺度数值模式初始场的改进效果以及对模式预报能力的提高作用，并分析了此次对流单体风暴的三维空间分布结构及其演变过程，探讨了对流单体风暴组织、发展和维持的主要动力机制以及凝结潜热释放在对流单体风暴的发生发展中的作用。文章第 2 节介绍了 ARPS 模式及其资料分析系统 ADAS；第 3 节介绍了强对流天气过程以及设计了一组对比试验方案；第 4 节分析了同化雷达资料对初始场中的水凝物场、动力场、水汽场和热力场的改善情况；第 5 节进行了数值模拟试验，检验了同化雷达资料对模式提高中小尺度风场、降水落区和定量降水预报的改进作用，并分析本次对流单体风暴的三维空间分布结构及其演变过程；第 6 节给出了文章的主要结论，并做进一步讨论和展望。

2 模式介绍

2.1 ARPS 模式介绍

ARPS（Advanced Regional Prediction System）是由美国 Oklahoma 大学风暴分析和预报中心（CAPS）研发的主要针对风暴尺度系统的非静力高分辨率区域预报系统。其控制方程为全弹性、可

压缩、非静力大气动力方程，它包括动量、热量、质量、水物质和能量等预报方程和状态方程。模式网格和坐标系分别采用Arakawa-C型跳点网格和地形追随坐标系，包括多种物理过程及参数化方案，比较适合于风暴尺度的数值模拟，在多次超级单体风暴、飑线、龙卷等中小尺度风暴模拟中都取得了比较好的效果（Schenkman et al., 2011a, 2011b; Xue et al., 2014）。

2.2 资料分析系统 ADAS 介绍

ADAS（ARPS Data Analysis System）是 ARPS 模式的资料分析系统，能同化常规资料和卫星、雷达等非常规资料的中尺度分析系统。它采用不需要进行大矩阵求解的Bratseth连续迭代方案（Bratseth，1986），结合背景场的观测信息，将观测资料中的物理量（如风场、气压、温度和湿度等）融合到模式三维网格空间，形成模式初始场。其中的复杂云分析模块是基于局地分析和预报系统（LAPS, Local Analysis and Prediction System）（Zhang，1999）的云分析方案构造的。它可以利用雷达、卫星等非常规观测资料进行物理量反演并进行三维云分析，构建一个高分辨率的三维云场和水凝物场，分析产品有：三维云分析、云水和冰水混合比、云和降水类型、云中垂直速度以及雨水、雪、冰雹混合比等等。然后在此基础上，通过湿绝热或非绝热初始化方法对温度场、湿度场和风场等物理量场进行调整。它将插值到模式网格点上的雷达反射率因子值与阈值进行比较，如果反射率因子低于阈值，则视为晴空；高于阈值，则根据 Smith Jr et al.（1975）提出的方法在三维空间上反演降水类型（雨、雪、霰等），并通过云内为湿绝热过程的假定得到湿绝热液态水含量，从而估计出云水混合比、雨水混合比和云冰混合比，最后根据云内潜热加热廓线进行温度调整。云分析模块不仅补充了初始场的湿度信息，而且还根据云中水汽凝结释放的潜热加热作用调整初始热力场，为模式提供一个更合理的初始场，使模式实现“热启动”（陈葆德等，2013），从而缩短模式的“spin-up”时间。

3 强对流天气过程和试验方案

3.1 强对流天气过程

2012 年 8 月 21 日 12 时（协调世界时，下同）至 16 时，南昌市出现了一次局地对流性大暴雨天气过程。据统计，12 时至 16 时，南昌市有 35 个乡镇雨量超过 50 mm，15 站超过 100 mm，强降水集中在市区，最大降雨量 152.8 mm。降水时段主要集中在 12 时至 15 时，16 时以后降水明显减弱（图 1）。此次大暴雨过程呈现出对流性强、短时雨强大、局地性强等特征。如图 2 所示，此次强对流性过程的主要影响系统有西风带低槽、西太平洋热带气旋、中低层切变、地面中尺度辐合线等，是多尺度多系统共同作用的结果。2012 年 8 月 21 日 00 时高空 500 hPa（图 2a），中高纬有一个冷槽从东北一直延伸到河套平原以东地区，且温度槽落后于高度槽。江西处于高空槽前，为正涡度平流区。长江中下游地区上空不断有短波槽快速东移。低层 925 hPa（图 2b），江西中北部处于暖舌中，西南气流从广西伸到江西北部，风向与等温线夹角大，暖湿平流输送明显，925 hPa 比湿达 17 g kg^{-1}，850 hPa 比湿达 16 g kg^{-1}（图略），低层暖湿平流的输送积累了大量水汽和不稳定能量。安徽北部至湖北东部一带有一支风速 16 m s^{-1} 以上的东北风干冷下沉气流，形成显著温度锋区。从南昌站探空图可以看到（图 3a），南昌 700 hPa 以上实况露点比温度低 20°C 以上，是比较强的干区，700 hPa 以下为显著湿区，对流有效位能达 2446 J，K 指数为 37，沙氏指数 SI 为−3.47，具有较大的对流不稳定能量。21 日 12 时，高空槽东移北收（图 2c），江西北部转处低槽底部，槽后干冷平流叠加在低层暖湿气流之上，增强了大气的对流不稳定。西太平洋副热带高压退居海上，菲律宾海上的 2012 年第 14 号台风“天秤”强度级别加强为强台风，中心附近最大风力 14 级（42 m s^{-1}），中心气压 950 hPa。受台风外围环流影响，江西东部地区中低层逐渐转处东风暖湿气流中，台风外围气流的下沉增温有利于增加大气的不稳定能量。低层 925 hPa（图 2d），东北风干冷气流南压至江西北部沿江一带，江西北部处于温度锋区内。从南昌站探空图可以看到（图 3b），南昌上空 700 hPa 与 850 hPa 风矢量差约 12 m s^{-1}，风垂直切变达到 0.0075 s^{-1}，很容易触发对流性强降水。

3.2 试验方案设计

模拟采用两重单向嵌套，中心均位于（28.5°N，116°E），分辨率分别为 9 km 和 3 km，格点数分别为 245×258 和 223×187，模式顶层气压 50 hPa，垂直方向 45 层，垂直平均分辨率 500 m。使用的主要物理参数化方案有：YSU 边界层方案，RRTM 长波辐射方案，Dudhia 短波辐射方案，Noah 陆面过

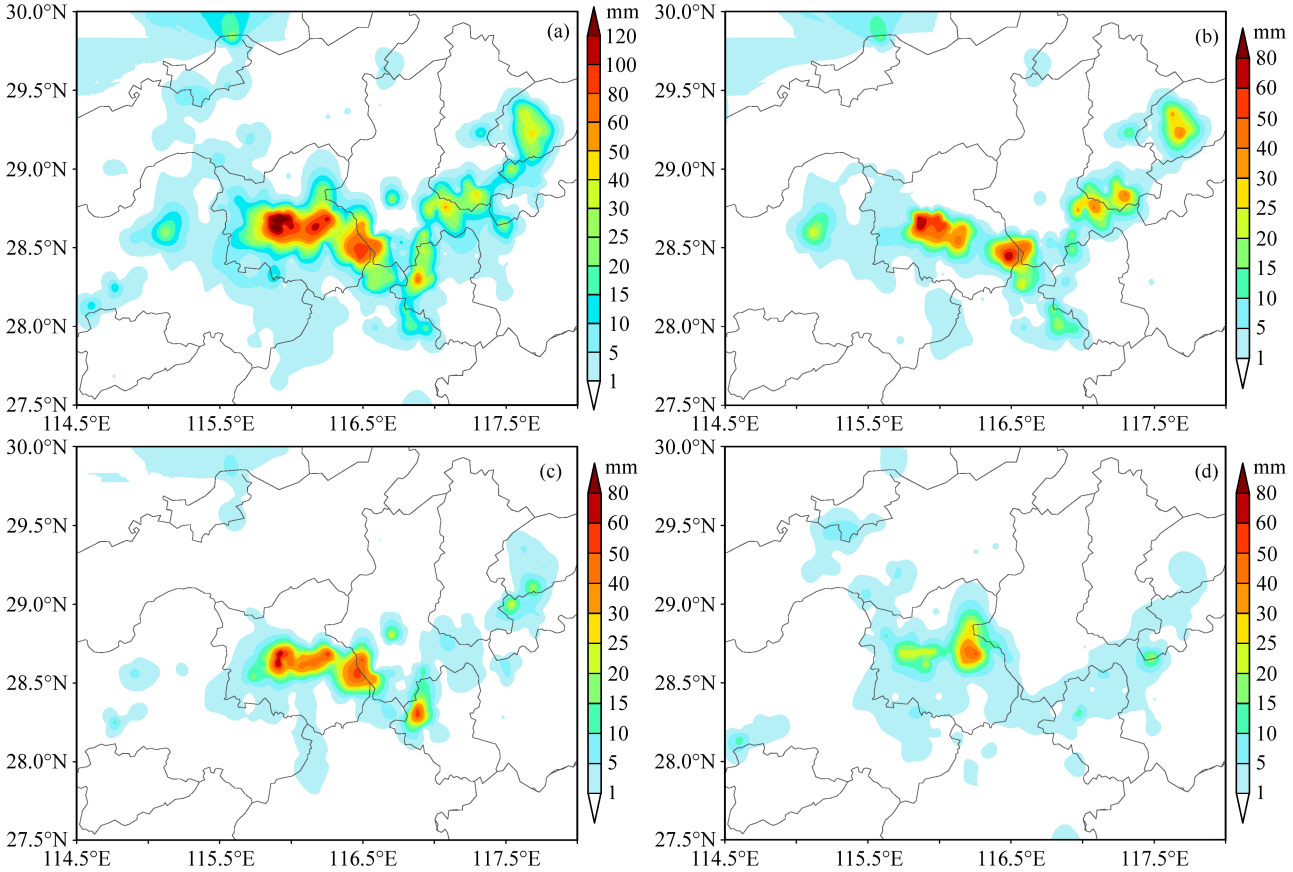

图 1　2012 年 8 月 21 日实况降水量（单位：mm）分布：（a）12～15 时 3 小时累积降水量；（b）12～13 时 1 小时降水量；（c）13～14 时 1 小时降水量；（d）14～15 时 1 小时降水量

Fig. 1　Observed accumulative rainfall (units: mm) on 21 August 2012: (a) From 1200 UTC to 1500 UTC; (b) from 1200 UTC to 1300 UTC; (c) from 1300 UTC to 1400 UTC; (d) from 1400 UTC to 1500 UTC

程方案，Lin 微物理过程方案，9 km 区域采用浅对流 Kain-Fritsch（new Eta）积云参数化方案，3 km 区域不使用积云参数化方案。采用由 NCEP/NCAR 提供的每 6 小时一次的 1°×1°再分析资料作为 9 km 区域的初始场和侧边界场，通过 Ext2arps 模块处理。模式从 2012 年 8 月 21 日 12 时起向后积分 6 小时至 18 时，3 km 区域的模拟以 9 km 区域每小时的输出结果作为侧边界条件，初始场资料同 9 km 区域的资料。在 3 km 细网格区域加入南昌、九江和上饶 3 部 CINRAD-SA 多普勒雷达全部仰角（9 个）体扫径向速度和反射率因子资料对初始场进行调整，并最终分析最内层 3 km 区域的模拟结果。在雷达资料进行分析同化之前进行了去除地物杂波、去距离折叠、速度退模糊等质量控制。

为了考察直接同化反射率和径向速度对初始场和降水预报的改善效果，本文设计了以下 4 个试验方案：（1）CTL：不同化雷达资料；（2）VEL：只同化雷达径向速度资料；（3）REF：只同化雷达反射率因子资料；（4）RAD：同时同化雷达径向速度和反射率因子资料。

4　雷达资料同化对初始场的改进效果

资料同化的主要目的是充分、有效地利用各种观测资料来形成尽可能接近真实大气状况的模式初始场。本文设计的对比试验用来研究雷达的反射率因子和平均径向速度资料对初始场的改进作用。下面具体分析各试验初始场中的水凝物场、动力场、水汽场和热力场的改善情况。

4.1　水凝物场分析

大气中水凝物的准确分布对数值模式微物理过程的发展至关重要，能有效缩短模式的“spin-up”时间。ADAS 复杂云分析系统利用雷达反射率因子反演出大气的云、水物质（例如：云水、水汽、雨水、云冰、雪、雹等物质），然后根据湿绝热或

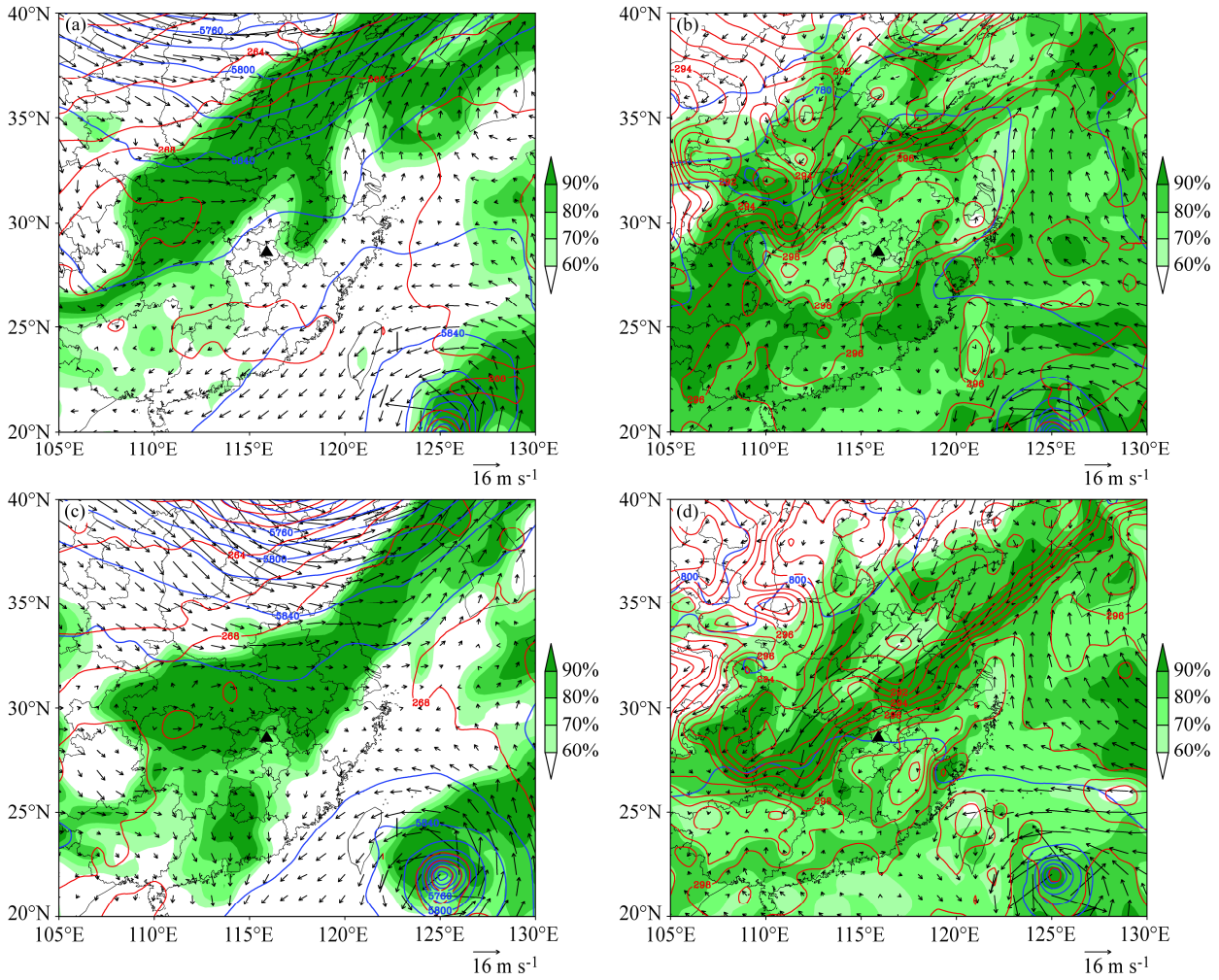

图 2 2012 年 8 月 21 日 NCEP 再分析资料的位势高度场（蓝色等值线，单位：gpm）、温度场（红色等值线，单位：K）、风场（箭头，单位：m s^{-1}）和相对湿度场（阴影）：（a）00 时 500 hPa；（b）00 时 925 hPa；（c）12 时 500 hPa；（d）12 时 925 hPa。黑色实心三角形表示南昌市的位置

Fig. 2 Geopotential height (blue contours, units: gpm), temperature (red contours, units: K), winds (arrows, units: m s^{-1}), and relative humidity (shaded) fields based on NCEP reanalysis data on 21 August 2012: (a) 0000 UTC at 500 hPa; (b) 0000 UTC at 925 hPa; (c) 1200 UTC at 500 hPa; (d) 1200 UTC at 925 hPa. The black triangle denotes the location of Nanchang City

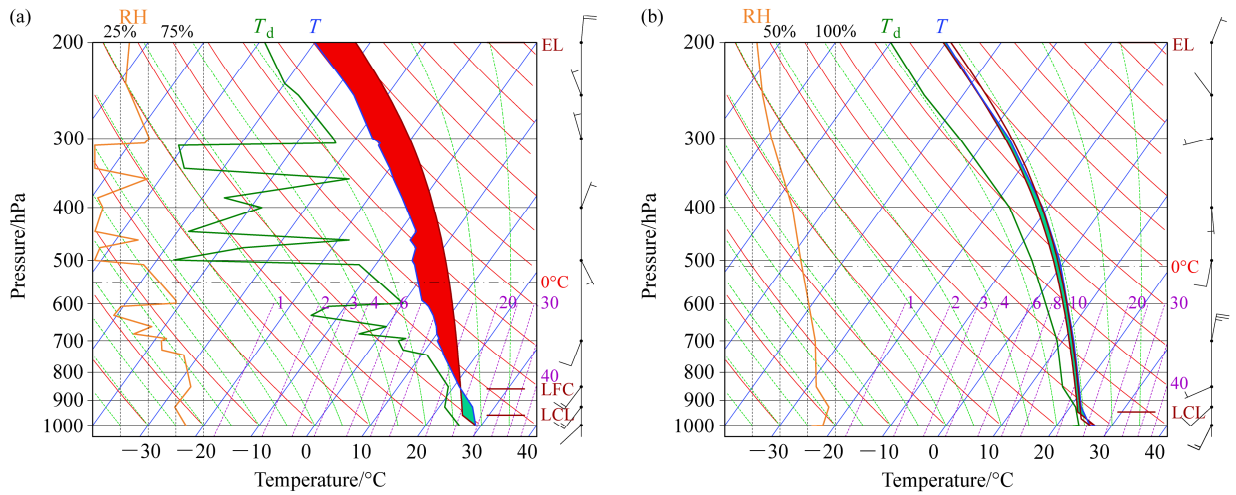

图 3 南昌站探空曲线：（a）21 日 00 时；（b）21 日 12 时。T、T_d、RH、LCL、LFC、EL 分别为温度、露点温度、相对湿度、抬升凝结高度、自由对流高度、平衡高度

Fig. 3 Sounding curves at Nanchang station at (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC 21 August 2012. T, T_d, RH, LCL, LFC, and EL represent temperature, dew point temperature, relative humidity, lifted condensation level, level of free convection, and equilibrium level, respectively

非绝热初始化方法对温度场、湿度场和风场进行调节，最后输出更加协调的物理量场。

图 4a、b 分别给出了 8 月 21 日 12 时实际观测的多部雷达组合反射率因子拼图和反射率因子沿 28.7°N 的纬向垂直剖面图，可以看到南昌地区上空大于 55 dBZ 的雷达回波集中在 5 km 以下，暖云高度较低，降水效率较高。图 4c 为 21 日 12 时试验 RAD 分析场中雷达组合反射率因子的分布，其空间分布形态与实况降水（图 1a、b）基本一致，这表明 ADAS 同化雷达资料是成功的。不足之处是，模拟的反射率范围和实际观测（图 4a）相比偏小，回波强度中心的位置比实况略偏南约 0.1°，因此本文在对模式物理量进行分析时选择沿 28.6°N 作纬向垂直剖面图。从模拟的雷达组合反射率因子可以看到，南昌和上饶中部地区上空均有一个 55 dBZ 以上的对流单体，不同之处是前者强回波中心强度更大，分布更紧凑，并且对流单体周围有小的回波在发展，这些对流单体沿着地面辐合线呈有组织地排列，因此降水强度明显比后者强。图 4d–h 中的填色分别是试验 RAD 分析场中的云水、雨水、雪、雹、水汽的含量沿 28.6°N 的纬向垂直剖面图。从图中可以看出云水、雨水、雪、雹、水汽含量的两个大值中心的位置与反射率因子的极值中心（图 4b）相对应，分别位于 115.8°E 和 117.2°E。云水含量主

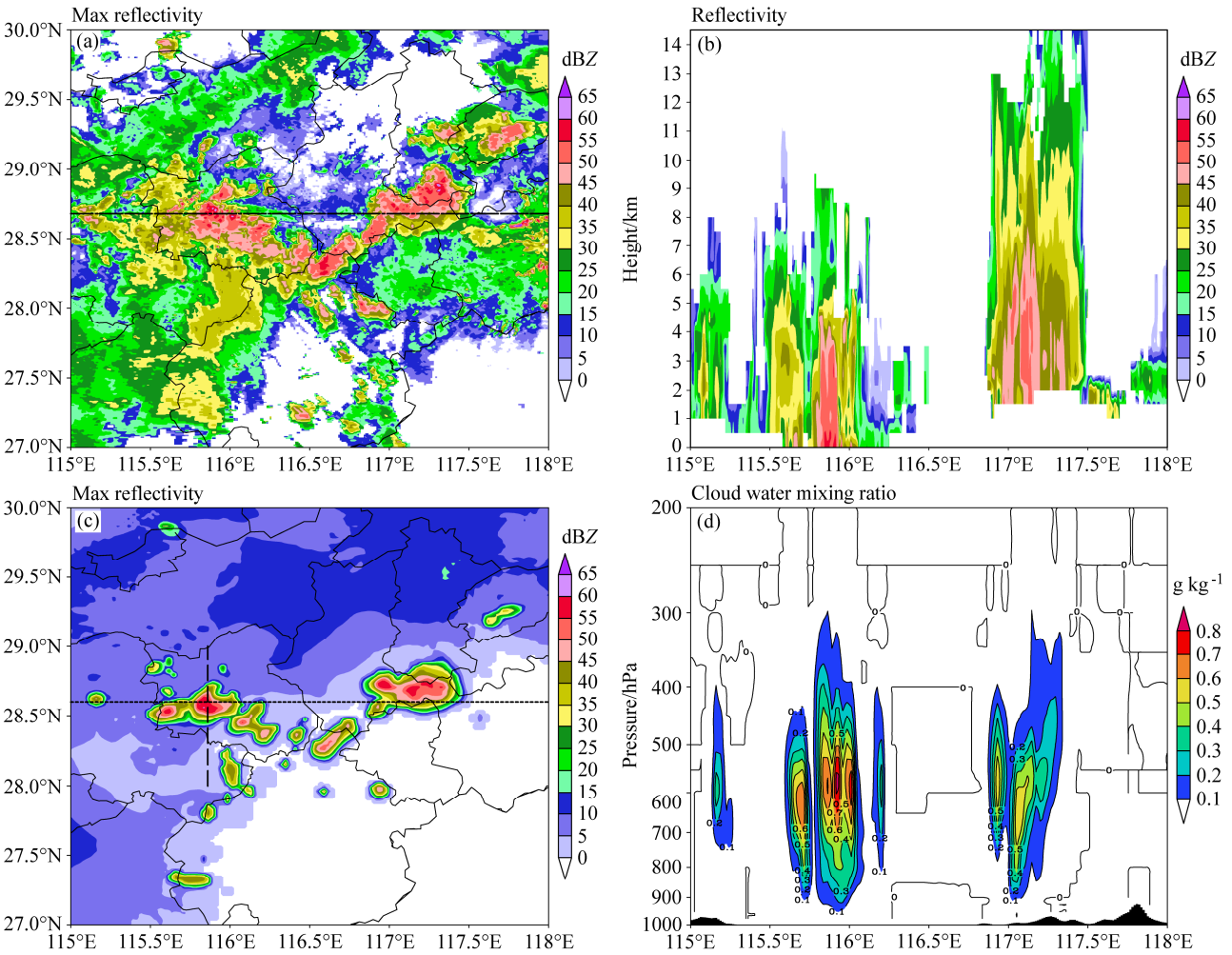

图 4　8 月 21 日 12 时观测的雷达组合（a）反射率因子（单位：dBZ）和（b）沿 28.7°N（图 4a 中的黑色线）反射率垂直剖面（单位：dBZ），试验 RAD 分析场中雷达组合（c）反射率因子（单位：dBZ）和（d）云水、（e）雨水、（f）雪、（g）雹、（h）水汽的沿 28.6°N（图 4c 中的水平黑色虚线）的纬向—垂直剖面（填色，单位：g kg^{-1}），（d–h）中的等值线为试验 RAD 与试验 CTL 水凝物混合比差值的剖面（单位：g kg^{-1}）

Fig. 4　(a) Observed radar composite reflectivity (units: dBZ) and (b) its vertical cross section (units: dBZ) along 28.7°N (the black line in Fig. 4a), (c) simulated radar composite reflectivity (shaded, dBZ) from experiment RAD (assimilation of both radar radial velocity and reflectivity data) and zonal–vertical cross sections (shaded, units: g kg^{-1}) of (d) cloud water, (e) rain water, (f) snow, (g) graupel, and (h) water vapor mixing ratio along 28.6°N (the horizontal black dashed line in Fig. 4c), contours in (d–h) show the mixing ratio differences of the hydrometeors (units: g kg^{-1}) between experiments RAD and CTL (without radar data assimilation) at 1200 UTC 21 August 2012

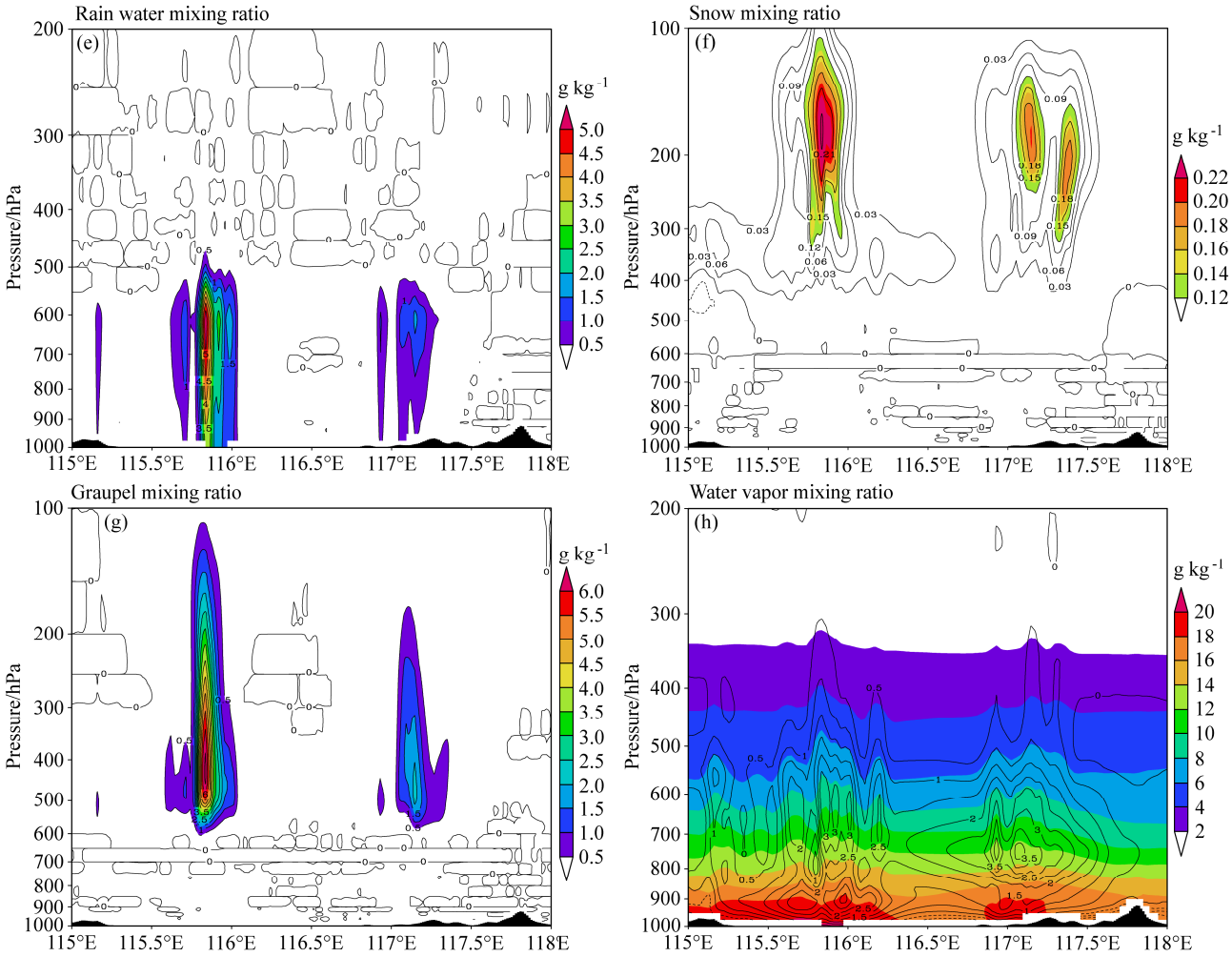

图 4 （续）

Fig. 4 (Continued)

要分布在纬向 115.6°～116.3°E，垂直方向 500～850 hPa 之间，中心极值达 0.8 g kg^{-1}，高度在 580 hPa 附近。雨水混合比含量垂直分布在 500 hPa 至地面范围内，纬向分布与云水相似，中心最高达 5 g kg^{-1}，高度在 630 hPa 附近。雪含量主要集中分布在 350 hPa 以上，最高扩展至 100 hPa，纬向分布范围同云水基本一致，混合比含量极大值为 0.22 g kg^{-1}，高度在 200 hPa 以上。雹的纬向分布范围较窄，主要分布在 115.7°～116°E，垂直方向上从 600 hPa 扩展到 100 hPa，中心极值达 6 g kg^{-1}，高度在 400 hPa 附近。水汽混合比含量（图 4h，填色）在大气低层 900 hPa 至地面是大值区，达 20 g kg^{-1}，其增量（图 4h，等值线）的纬向分布与云水基本一致，垂直分布在 500 hPa 到地面，最高达 3.5 g kg^{-1}。

从试验 RAD 的水凝物垂直分布（图 4d–g，填色）同试验 RAD 与试验 CTL 水凝物差值垂直分布（图 4d–g，等值线）可以看到，云水、雨水、雪、雹含量在量级和分布形态上相差都很小，说明试验 RAD 分析场中增加的这些水凝物主要是由同化雷达资料引入的。而且同化雷达资料对水汽含量同样也有正的贡献（图 4h），在 700 hPa 增量极值区附近约占 25%。进一步对比分析试验 REF 和试验 VEL 的水凝物分布后可以发现水凝物增加的原因主要是来自反射率因子资料的同化，径向速度资料同化对水凝物增加的贡献较少。

4.2 动力场分析

同化雷达资料后，除了对水凝物场有所改善以外，同时对大气环流场产生了一定的影响。从南昌雷达观测到的径向速度来看（图 5a），南昌地区中低层风场存在明显的切变，辐合抬升力量较强。沿图 5a 中的黄色实线做径向速度垂直剖面，可得到图 5b 风暴环流，白色实线为风暴北侧的干冷空气，

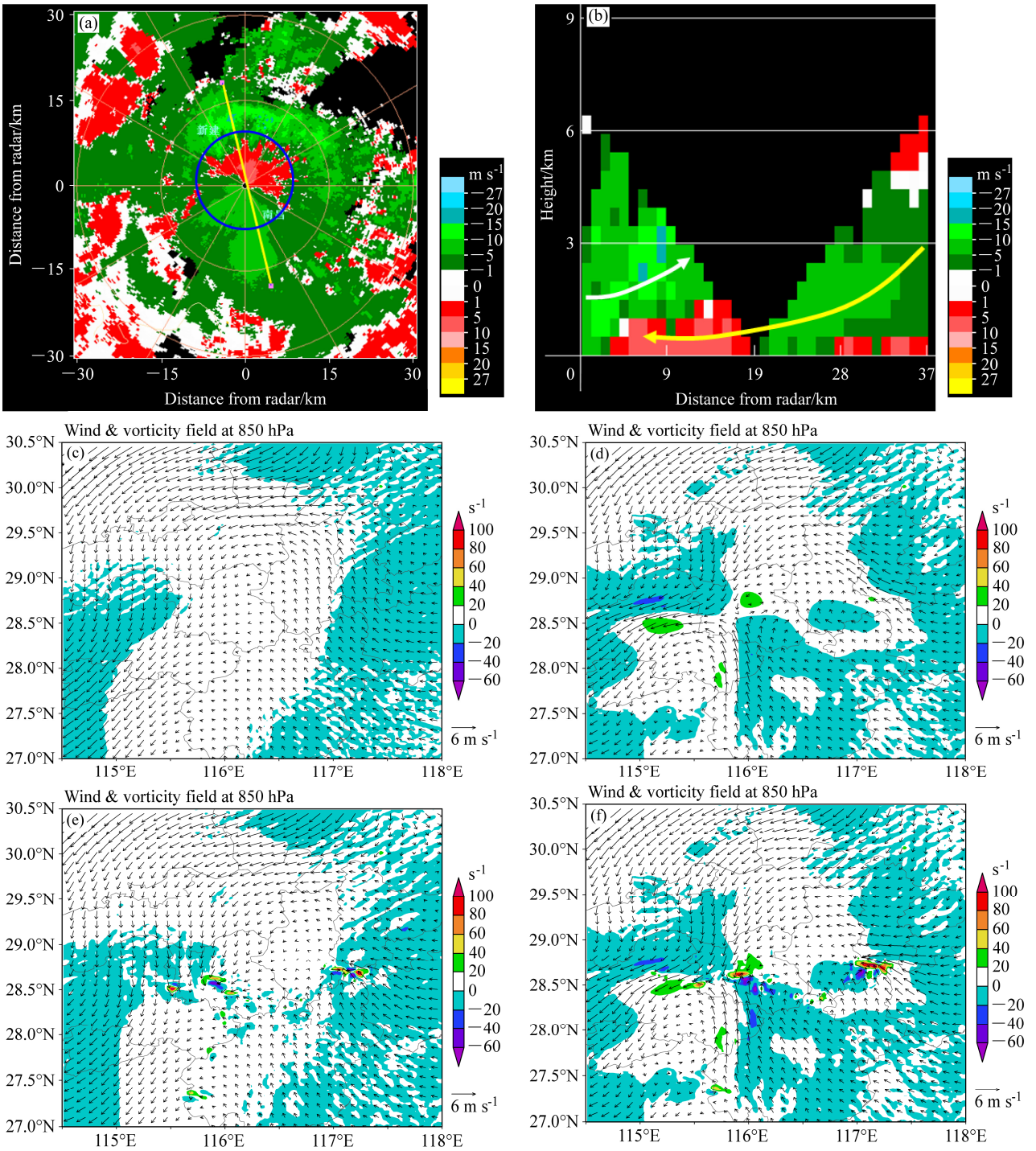

图 5　8 月 21 日 12 时观测的南昌雷达（a）9.9°仰角径向速度（填色，单位：m s^{-1}，蓝色圆圈为 1.5 km 等高线）和（b）沿图 5a 中的黄色实线的径向速度的垂直剖面（填色，单位：m s^{-1}），以及试验（c）CTL、（d）VEL、（e）REF、（f）RAD 模拟的 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）和垂直涡度（填色，单位：s^{-1}）。图 5b 中白色实线为风暴北侧的干冷空气，黄色实线为风暴南侧的暖湿空气

Fig. 5　(a) Observed radar radial velocity (shaded, units: m s^{-1}) at 9.9° elevation from Nanchang radar (the blue circle donates the height of 1.5 km), (b) vertical of radial velocity cross section (shaded, units: m s^{-1}) along the yellow solid line in Fig. 5a, simulated wind fields (arrows, units: m s^{-1}) and vertical vorticity fields (shaded, units: s^{-1}) in experiments (c) CTL, (d) VEL (assimilation of radar radial velocity data), (e) REF (assimilation of radar reflectivity data), (f) RAD at 850 hPa at 1200 UTC 21 August 2012. The solid white line in Fig. 5b indicates the cold and dry air on the north side of the storm, the solid yellow line indicates the warm and moist air on the south of the storm

黄色实线为风暴南侧的暖湿空气，这两股空气在南昌地区低空汇合，有利于风暴迅速发展。从数值模拟的 850 hPa 风场来看，试验 CTL（图 5c）同化前南昌地区以较均匀的偏北风为主，试验 VEL（图 5d）相比试验 CTL 有显著的改善，南昌地区南部（27.5°～28.5°N，115.8°～116.3°E）为偏南风，与北部的偏北风形成明显的水平风切变，动力辐合作用大大增强，南昌中部地区为冷暖气流交汇中心，为显著的风场辐合区，包含了更多的中尺度动力场特征，模拟结果和实况（图 5b）较一致。试验 REF（图 5e）对风场的改变是局地的，可以看到有微小的扰动生成，分布较零乱，并不成系统。试验 RAD（图 5f）与试验 VEL 相似，保留了同化径向速度给初始场风场带来的中小尺度信息。从 850 hPa 垂直涡度分布来看，试验 CTL 无明显垂直涡度中心，试验 REF 和试验 CTL 大体上差别不大，但试验 REF 在细节上表现更丰富，表现在南昌中南部（28.2°～28.8°N，115.5°～116.3°E）和上饶中部（28.6°～28.8°N，116.8°～117.5°E）出现多对小尺度正负涡度中心，体现出对流单体局地强的旋转特性。试验 VEL 和试验 CTL 相比有较大的差异，表现在南昌中部（28.6°～28.8°N，115.8°～116.2°E）激发出正的垂直涡度中心，中心强度为 20×10^{-5}～40×10^{-5} s^{-1}，位置与实况降水中心相吻合。而试验 RAD 综合了试验 REF 和试验 VEL 的特征，相比试验 REF 而言，同化了径向速度资料后的正负涡度中心尺度更大，强度也更强。由此可见，初始场的中尺度动力场特征主要是由同化雷达径向速度资料引起的。

4.3 热力场分析

ADAS 同化系统利用雷达反射率因子反演出大气的云、水物质，并根据云内潜热加热廓线进行温度调整。从沿 28.6°N 假相当位温的垂直剖面来看，

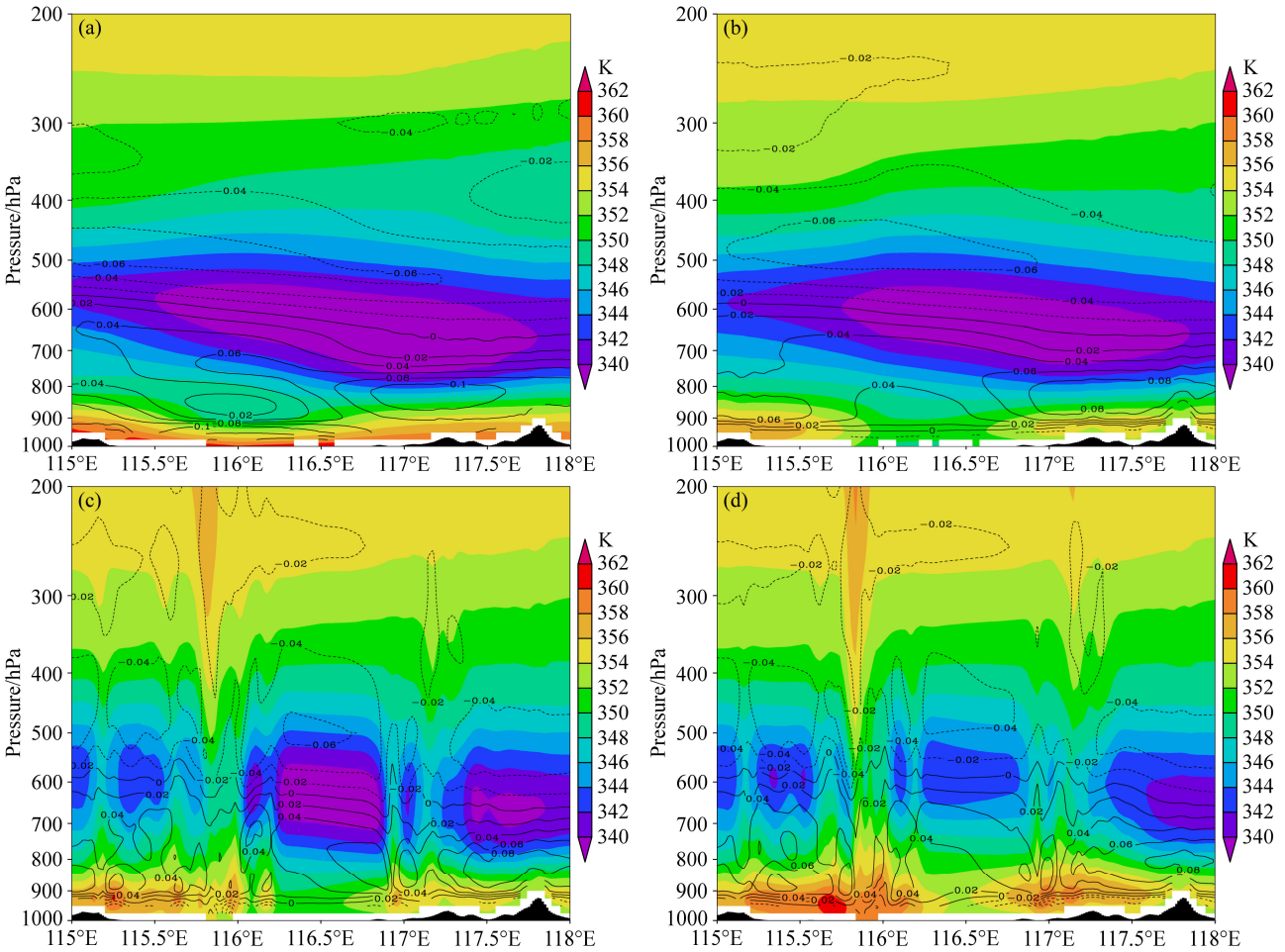

图 6 8 月 21 日 12 时沿 28.6°N（图 4c 中的水平黑色虚线）假相当位温（填色，单位：K）和稳定度（等值线，单位：K hPa^{-1}）的垂直剖面：（a）试验 CTL；（b）试验 VEL；（c）试验 REF；（d）试验 RAD

Fig. 6 Vertical cross sections of pseudo-equivalent potential temperature (shaded, units: K) and stability (contours, units: K hPa^{-1}) along 28.6°N (the horizontal black dashed line in Fig. 4c) at 1200 UTC 21 August 2012: (a) Experiment CTL; (b) experiment VEL; (c) experiment REF; (d) experiment RAD

试验 CTL（图 6a）冷空气从中层 600 hPa 入侵并影响南昌地区，中低层 600 hPa 以下大气稳定度均大于零，表明中低层大气较不稳定，这样的热力环境场对强对流天气的发生发展是有一定作用的。试验 VEL（图 6b）与试验 CTL 相差不大，低层 900 hPa 以下假相当位温有所减弱。试验 REF（图 6c）相比试验 CTL 有显著变化，600 hPa 大的冷中心被分裂成多个小的冷中心，在 115.8°E 附近有一条假相当位温高能舌向上伸展，700 hPa 附近的增温近 10 K，这是由于水凝物潜热释放加热了云团，云分析系统对大气热力场进行了正温度扰动调整，这种正温度扰动在维持对流发展过程中起重要作用。试验 RAD（图 6d）与试验 REF 相似，低层 900 hPa 以下假相当位温更高，暖中心最高达 360 K，且位置与强降水中心十分吻合；925 hPa 的假相当位温与 600 hPa 最大差值达到 16 K，对流极不稳定，南昌市处于高能量区域；向上伸展的高能量舌也更加明显，配合中低层切变线（图 5d）的动力抬升作用，非常容易触发强对流天气。由此可见，雷达反射率因子资料的同化对初始场的热力场调整起主要作用。

综合以上分析可以发现：同化径向速度主要是改进初始风场，给初始场提供中小尺度动力场信息；同化反射率因子主要是增加初始场中的云、水物质含量，以及采用云分析方法调整温度、湿度等物理量场；径向速度和反射率因子的同时同化则能够综合反射率和径向速度对初始场的改进效果，对风场、温度场和湿度场进行综合调整，使初始场在动力和热力上达到最佳平衡。

5 数值预报结果分析

为了评估同化雷达资料后模式对中小尺度天气系统预报的影响，本文对模式模拟的 21 日 12～14 时逐小时降水量、风场和雷达回波强度进行了对比分析。

5.1 风场和降水量分析

此次强对流过程降水强度大，持续时间短，降水集中在南昌市主城区，造成了巨大经济损失。从自动站实况降水量（图 1）可以看到，此次强对流过程时间段主要集中在 21 日 12～15 时这三小时内，16 时以后降水明显减弱，因此我们主要讨论 1～3 h 内模拟的 1 h 降水情况，以检验同化雷达资料前后模式对短历时强降水的预报能力。

由图 7 模式积分 1 h 后的 850 hPa 风场和降水量分布图可以看到，不同化雷达资料（图 7a）南昌主城区（28.5°～28.8°N，115.7°～116.3°E）以偏北风为主，无明显切变，降水几乎没有，而此时实况 1 h 降水量在南昌主城区普遍在 30 mm 以上，最高达到 80.5 mm（图 1b）。只同化径向速度（图 7b）存在较明显的风切变，但和初始风场（图 5b）相比，强度有减弱的趋势，降水也比较小，南昌地区无降水。只同化反射率因子（图 7c）的风场改变不大，但降水有明显改善，南昌主城区降水明显加强，位置与实况对应得比较好，但降水量最高只有 40 mm，明显偏小；上饶地区中部（28.6°～28.8°N，116.8°～117.5°E），位置与实况对应得也比较好，但降水量最高达 60 mm，而实况最高为 44.4 mm，模拟明显偏大。同时同化径向速度和反射率因子后（图 7d），风场有明显改善，风切变强度比只同化径向速度还要强，降水量增加也最大，降水落区与只同化反射率因子的结果相似，但南昌主城区的降水明显增强，最高在 80 mm 以上，降水位置和强度与实况非常吻合；而上饶地区中部的降水和试验 REF 一样，强度偏大。可以发现，仅用雷达径向速度资料进行同化模拟的降水量改进最小，而雷达反射率因子资料对定量降水预报和降水落区都有改进，同时同化雷达径向速度和反射率因子资料进行调整后模拟的降水在落区和强度上都与实况比较接近。

模式积分 2 h 后（图 8），不同化雷达资料（图 8a）风场较上一时次无多大改变，在九江地区西部模拟出一个虚假降水中心，中心强度达 40 mm。只同化径向速度后（图 8b），南昌地区的风切变较上一时次强度进一步减弱，降水落区也位于九江地区西部，南昌地区无降水。只同化反射率因子（图 8c）的风场偏东分量有所加强，逐渐呈气旋性弯曲，降水中心也随之向西北方向移动，降水中心位于东北风与东风的辐合区域内，但南昌主城区降水明显减弱，降水中心较实况（图 1c）偏西偏北，降水范围明显偏小。同时加雷达径向速度和反射率因子进行调整后（图 8d），风切变是加强的，并且稳定少动，降水雨带也呈西北—东南向带状分布，并且有多个降水中心，最强降水中心依然位于南昌主城区，强度达 80 mm 以上，与实况该时段最高降水量 80.9 mm 非常吻合，但降水范围比实况大，特别是在南昌地区西部存在明显虚假的强降水中心。南昌地区东南部模拟的降水中心虽然比实况略偏南，强度略偏大，但是较其他三个试验有很大改进，这可能是

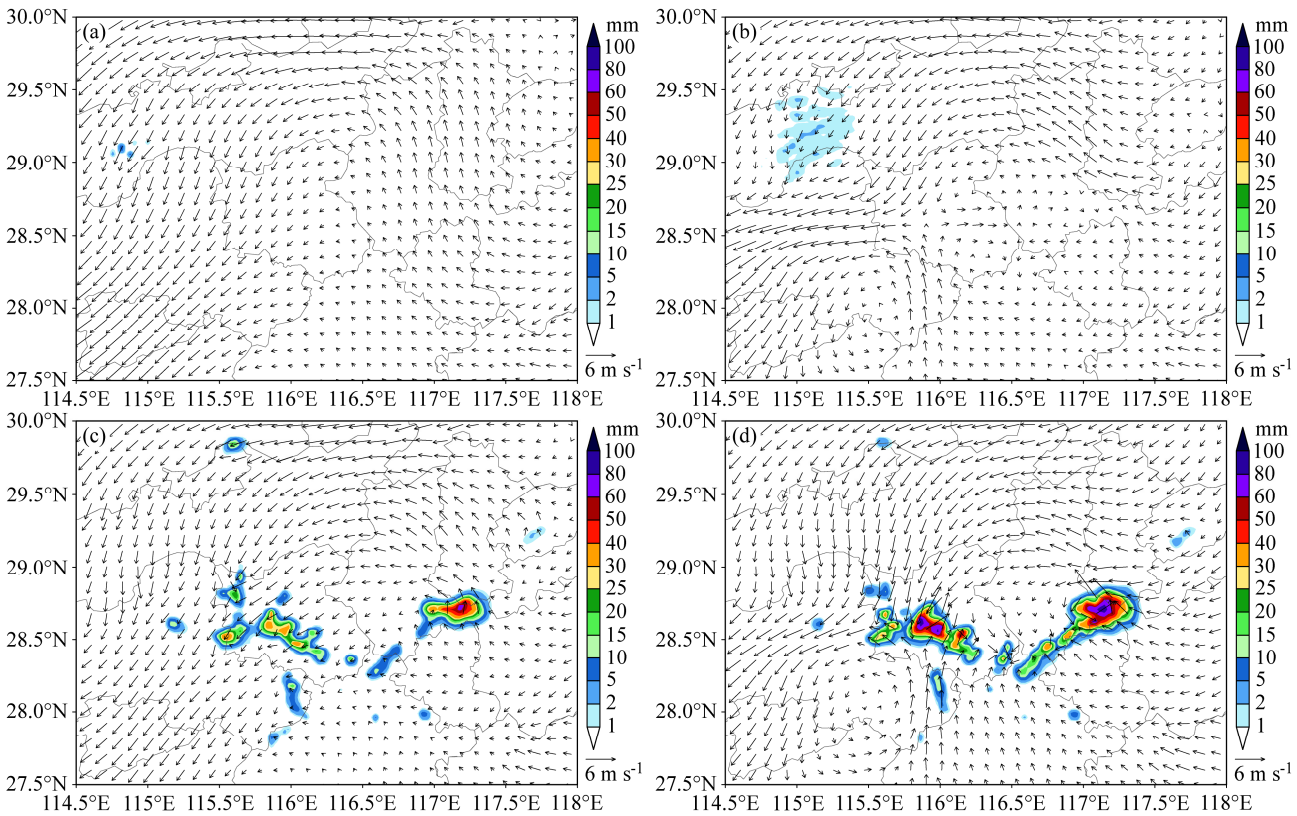

图 7 8 月 21 日 13 时模拟的 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）和 12～13 时 1 h 累积降水量（填色，单位：mm）分布：（a）试验 CTL；（b）试验 VEL；（c）试验 REF；（d）试验 RAD

Fig. 7 Simulated 850-hPa wind field (arrows, units: m s^{-1}) at 1300 UTC and 1 h (from 1200 UTC to 1300 UTC) accumulated rainfall (shaded, units: mm) on 21 August 2012: (a) Experiment CTL; (b) experiment VEL; (c) experiment REF; (d) experiment RAD

模式在该地区“spin-up”延迟导致的，因为上一时次该地区模拟降水并不明显。显然，同时同化雷达径向速度和反射率因子模拟的降水效果是最好的。

模式积分 3 h 后（图 9），不加雷达资料（图 9a）风场并无多大变化，九江地区西部的虚假降水中心依然存在。只同化径向速度后（图 9b），南昌地区的风切变基本被平滑干净，降水落区也位于九江地区西部。只同化反射率因子（图 9c）模拟的风场东北风和东风进一步加强西移，雨带呈西南—东北向，降水范围明显偏大，但南昌地区已无明显降水，降水落区和强度较实况（图 1d）偏差较大。同时加雷达径向速度和反射率因子进行调整后（图 9d），位于南昌地区的风切变仍然比较强，并且稳定少动，呈东—西走向，上一时次的最强降水中心向西移动，逐渐偏离实况，降水强度和范围也比实况大，形成虚假的强降水中心。南昌东部模拟的降水中心强度仅 15～20 mm，而实况达 40 mm 以上，模拟的降水明显偏弱；南昌地区东南部也存在虚假的强降水中心。随着积分时间的延长，模式误差也在不断累积，模式对中小尺度短生命史天气系统的描述能力越来越有限。尽管如此，同时同化雷达径向速度和反射率因子模拟的物理量场还是有参考价值的。

5.2 风场、假相当位温和雷达回波垂直剖面分析

前面有分析到水凝物场在模式积分过程中能起到调整风场、水汽场、温度场等物理量场的作用，并最终影响到降水预报的准确性。而雷达回波强度能反映大气中水凝物的空间分布结构。图 10～12 给出了 21 日 13～15 时沿 115.86°E 的雷达反射率因子、风场和假相当位温的垂直剖面。模式积分 1 h 后（图 10），不加雷达资料（图 10a）的风场基本呈水平分布，无明显的垂直运动，低层也没有明显的辐合辐散，假相当位温分布较平直，500 hPa 至 800 hPa 为较深厚的冷区，28.6°N 附近无回波生成。只同化径向速度后（图 10b）环流场有所改变，400 hPa 附近为偏北风，28.4°N 以南的低层 800 hPa 至地面为偏南风，风垂直切变增大，28.4°N 附近低层

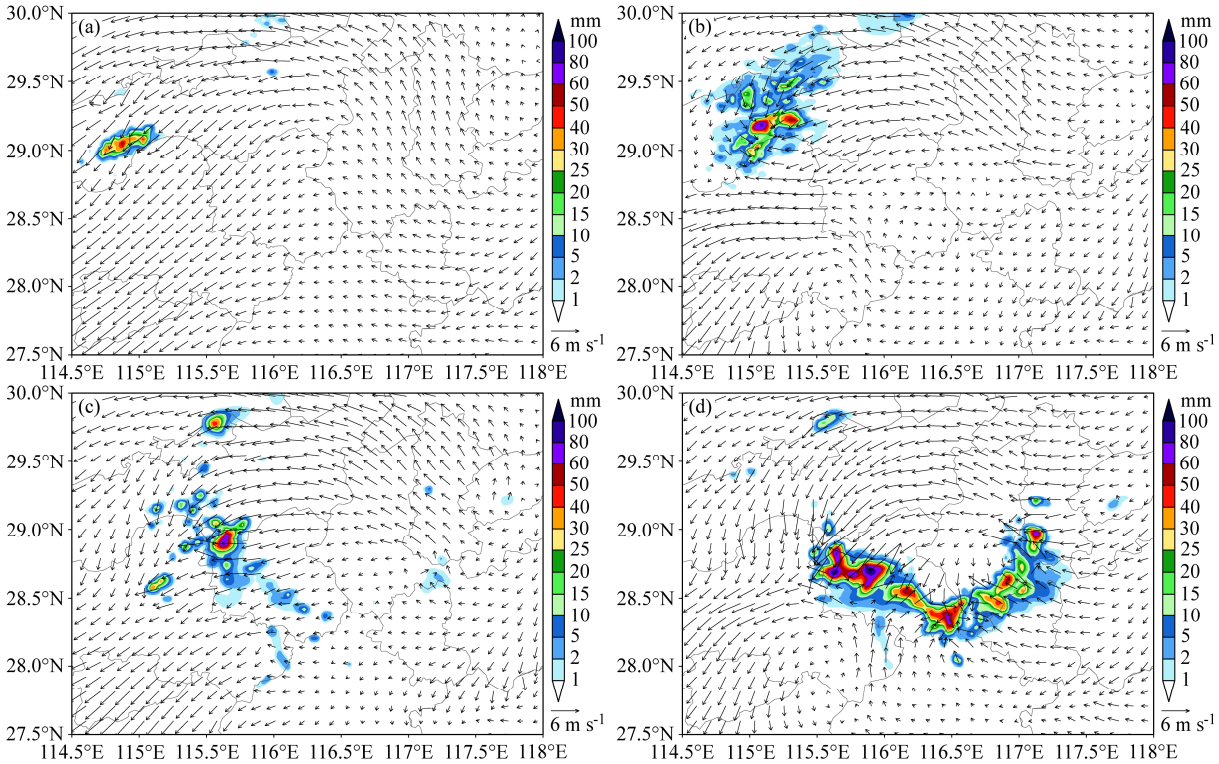

图 8　8 月 21 日 14 时模拟的 850 hPa 风场（箭头，单位：m s^{-1}）和 13～14 时 1 h 降水量（填色，单位：mm）分布：（a）试验 CTL；（b）试验 VEL；（c）试验 REF；（d）试验 RAD

Fig. 8　Simulated 850-hPa wind field (arrows, units: m s^{-1}) at 1400 UTC and 1 h (from 1300 UTC to 1400 UTC) accumulated rainfall (shaded, units: mm) on 21 August 2012: (a) Experiment CTL; (b) experiment VEL; (c) experiment REF; (d) experiment RAD

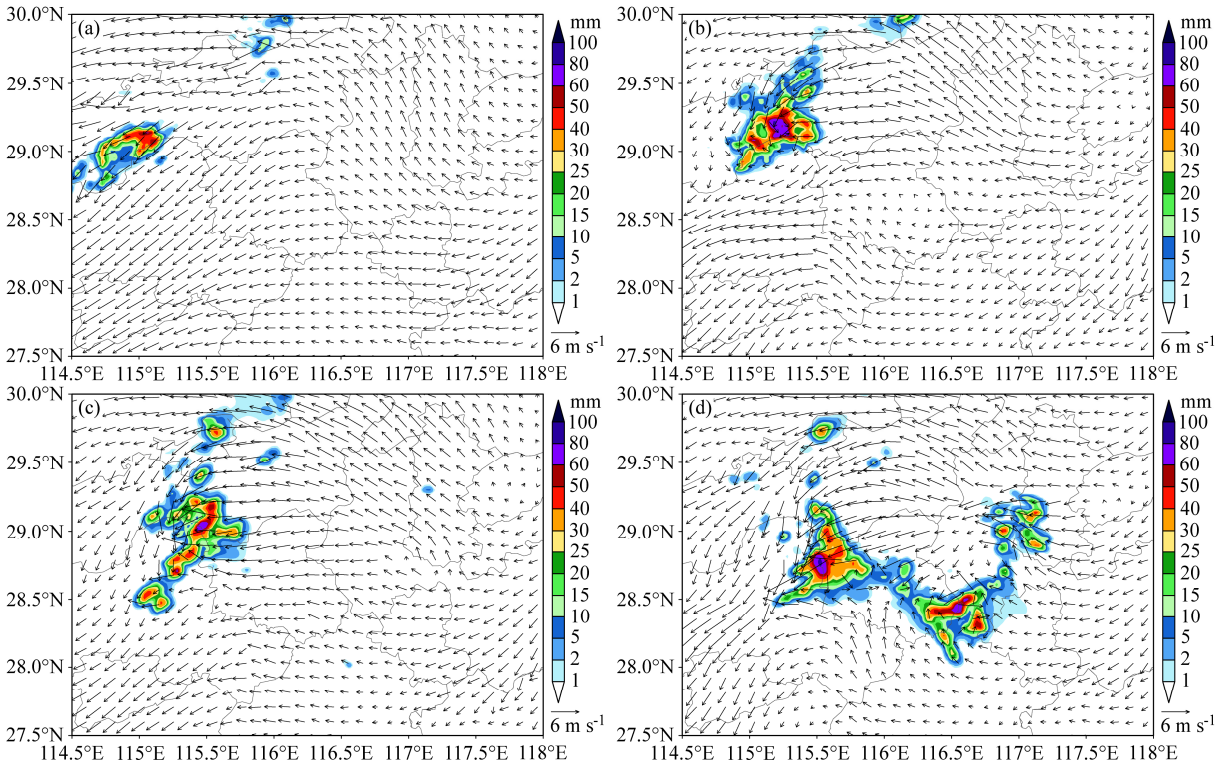

图 9　8 月 21 日 15 时模拟的 850 hPa 风场（单位：m s^{-1}）和 14～15 时 1 h 降水量（填色，单位：mm）分布：（a）试验 CTL；（b）试验 VEL；（c）试验 REF；（d）试验 RAD

Fig. 9　Simulated 850-hPa wind field (arrows, units: m s^{-1}) at 1500 UTC and 1 h (from 1400 UTC to 1500 UTC) accumulated rainfall (shaded, units: mm) on 21 August 2012: (a) Experiment CTL; (b) experiment VEL; (c) experiment REF; (d) experiment RAD

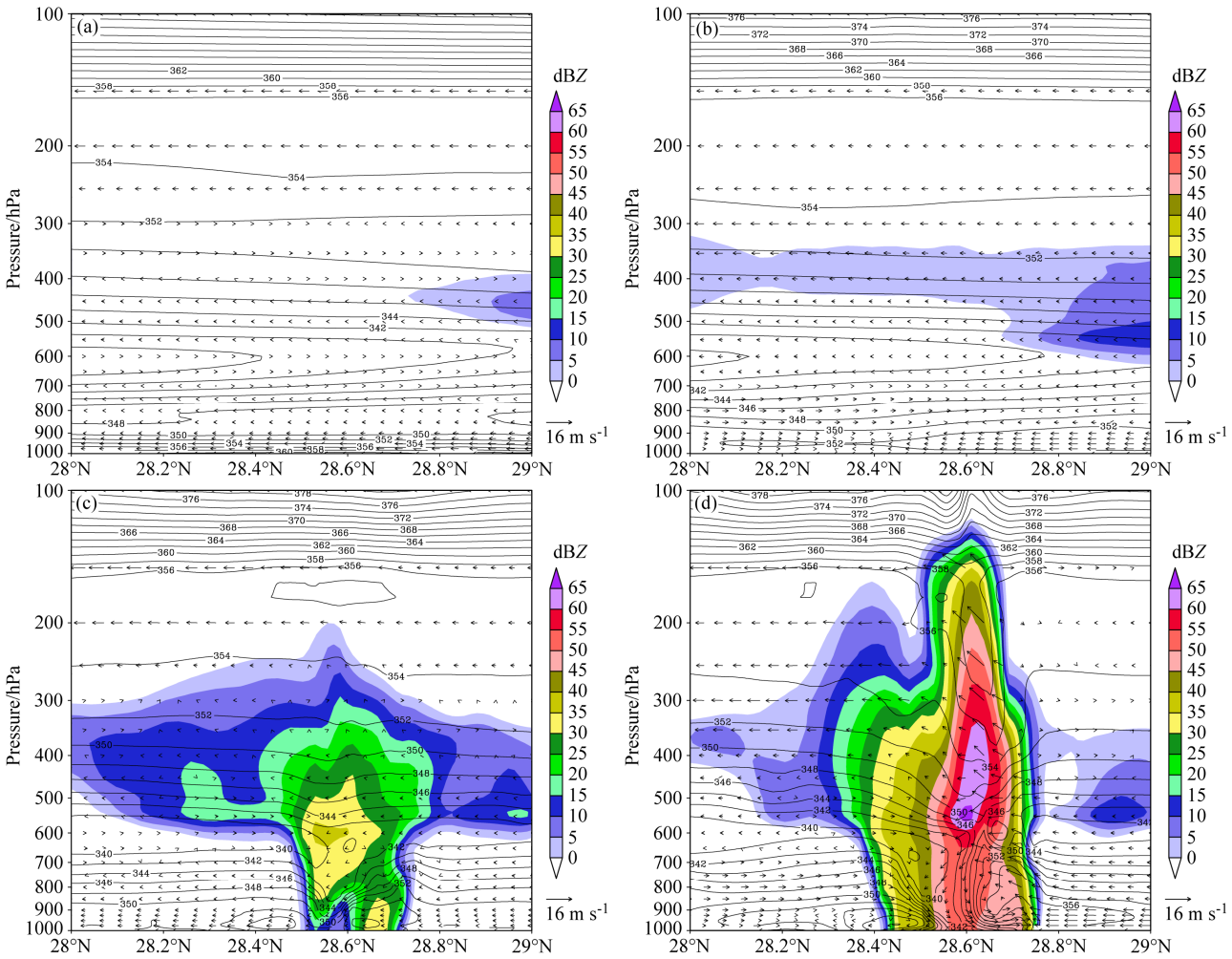

图 10 8 月 21 日 13 时沿 115.86°E（图中 4c 中竖直黑色虚线）的雷达反射率因子（填色，单位：dBZ）、风场（箭头，单位：m s^{-1}）和假相当位温（等值线，单位：K）的垂直剖面：（a）试验 CTL；（b）试验 VEL；（c）试验 REF；（d）试验 RAD

Fig. 10 Vertical cross sections of radar composite reflectivity (shaded, units: dBZ), wind (arrows, units: m s^{-1}), and pseudo-equivalent potential temperature (contours, units: K) along 115.86°E (the vertical black dashed line in Fig. 4c) at 1300 UTC 21 August 2012: (a) Experiment CTL; (b) experiment VEL; (c) experiment REF; (d) experiment RAD

有水平风辐合运动，400 hPa 附近有弱回波带生成，强度较弱（5 dBZ 以下）。只同化反射率因子后（图 10c）大气中的水凝物明显增加，回波迅速生成，回波顶高 ET 在 300 hPa 附近，28.6°N、600 hPa 附近的回波强度中心达 35～40 dBZ，28.6°N、850 hPa 以下的假相当位温锋区明显，这是水凝物对大气温度场和水汽场调整的结果，但风场与不加雷达资料相比改变不大，动力作用不明显。同时同化径向速度和反射率因子后（图 10d），回波集中分布在 28.3°～28.8°N，回波顶高 ET 达 150 hPa，28.6°N、500 hPa 附近的回波强度中心达 65 dBZ；风场也有很大的改善，28.6°N 以北、900 hPa 高度以上为一致偏北风，并且在回波主体附近风速加强并伴有强烈的上升运动，相对于风暴为显著入流区；而 28.6°N 附近的 600 hPa 高度以下区域，由于对流单体迅速发展成熟并有降水产生，降水粒子的拖曳作用产生下沉气流，在 28.7°N 附近的 900 hPa 高度以下区域为偏南大风，与北侧的偏北大风形成阵风锋，容易触发新的对流；同时在 28.5°N 以南、800 hPa 附近有一支偏南风后侧入流。从假相当位温分布图可以看到，28.5°N 附近、600 hPa 以下等值线密集并有显著冷中心，是对流单体风暴冷池所在位置；28.6°N 附近、600 hPa 以下风穿越等假相当位温线密集区，从高值区吹向低值区，为对流单体风暴提

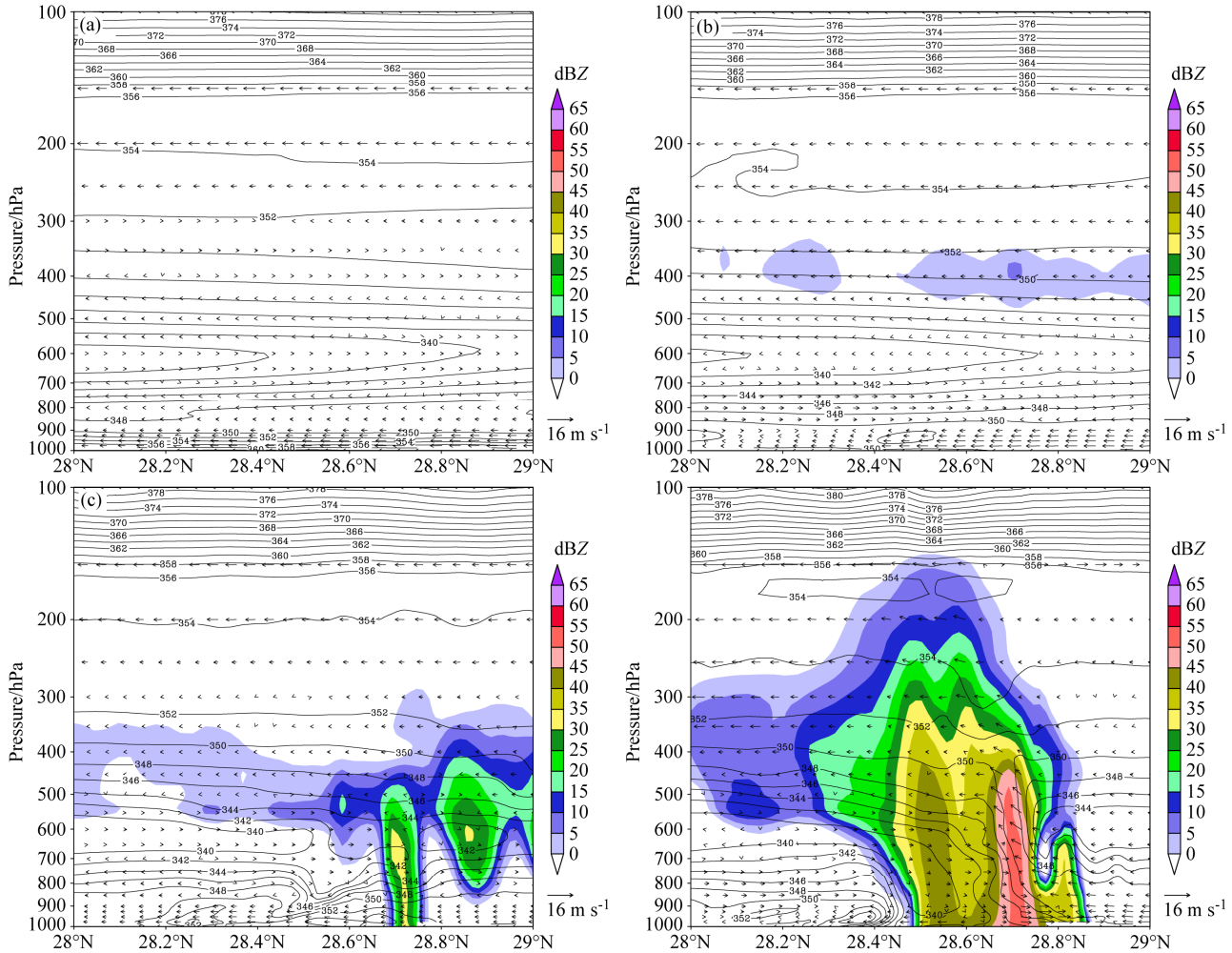

图 11　同图 10，但为 8 月 21 日 14 时的试验

Fig. 11　As in Fig. 10, but for experiments at 1400 UTC 21 August 2012

供不稳定能量。由此可见，同化雷达资料后，数值模式成功地模拟出了对流单体风暴的中 β 尺度结构特征，这很大程度地提高了模式对强对流天气系统的模拟能力。

模式积分 2 h 后（图 11），不同化雷达资料（图 11a）900 hPa 以下为一致偏北风，无降水回波生成。只同化径向速度后（图 11b），28.5°N 附近低层 900 hPa 至地面转为偏北风，风垂直切变减小，低层水平风辐合运动进一步减弱。只同化反射率因子后（图 11c）回波迅速减弱，风场和假相当位温较上一时次没有多大改变。同时同化径向速度和反射率因子后（图 11d）可以看到，回波强中心由较高高度迅速下降至地面附近，回波顶高 ET 已降低到 200 hPa 以下，回波垂直高度迅速降低，回波中心强度减弱到 50～55 dBZ；斜上升气流明显减弱，假相当位温等值线越来越稀疏，低层没有明显的高能中心，不稳定能量输送减弱，该对流单体处于消亡阶段。模式积分 3 h 后（图 12），同化反射率因子的两个试验（图 12b、d），低层回波被偏北大风切断而抬离地面，暖湿空气源也被扩展的冷池切断，高空回波强度迅速减弱并且分裂消失，风暴单体逐渐消亡。

综上所述，同时同化径向速度和反射率因子后模式成功模拟和再现了对流单体风暴的三维空间分布结构及其演变过程，在 4 个试验中效果是最好的。

6　结论和展望

本文采用 ARPS 模式的资料分析系统 ADAS 及其复杂云分析方案，同化了多普勒雷达径向速度和

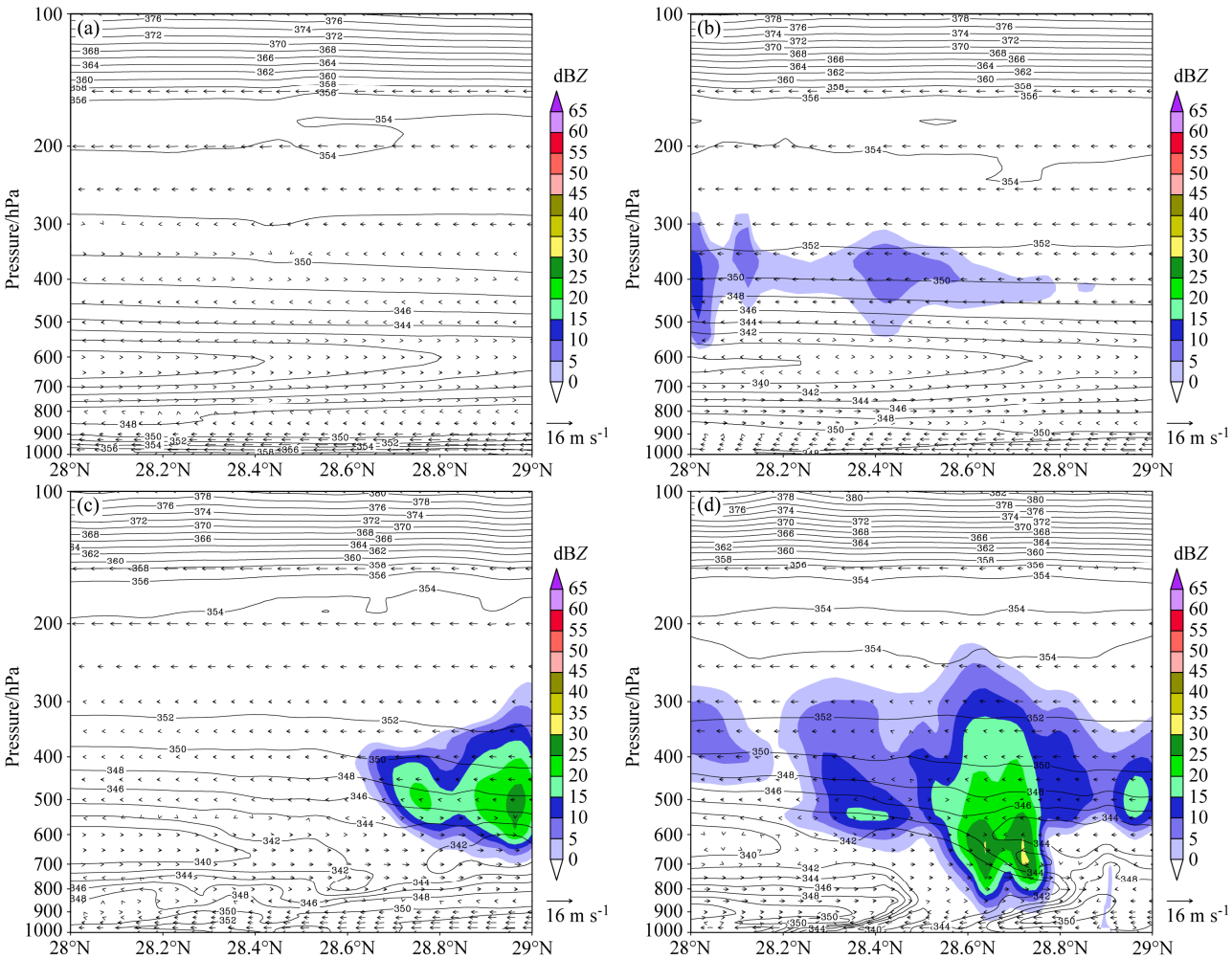

图 12 同图 10，但为 8 月 21 日 15 时的试验

Fig. 12 As in Fig.10, but for experiments at 1500 UTC 21 August 2012

反射率因子资料，分析了雷达资料对模式初始场的改进作用，并应用于 WRF 中尺度模式对 2012 年 8 月 21 日江西省一次局地强对流天气过程进行了模拟试验和对比分析。通过对同化雷达资料后的分析场和模拟物理量场的诊断分析，得到以下主要结论：

（1）ADAS 同化系统可以有效地利用雷达径向速度和反射率因子资料对初始场进行水凝物、动力和热力调整，能够有效增加初始场中的中小尺度风场信息和对流层中的云、水物质含量。ADAS 的复杂云分析方案根据云中水汽凝结释放的潜热加热作用，通过湿绝热或非绝热初始化技术对温度场、湿度场和风场进行调整，使初始场在动力和热力上达到平衡。

（2）对比试验表明，同化径向速度后对改善模式初始场的动力场有重要贡献，而对大气水凝物和降水的预报影响较小。同化反射率因子的主要作用是调整初始场中的水凝物场和热力场，有效缩短了模式的“spin-up”时间，明显改进了定量降水预报。同时同化雷达径向速度和反射率因子后，初始场中形成了中小尺度风场水平辐合、垂直运动以及合理的温、湿分布，对 3 h 内雨带形状、降水落区及降水量的预报与实况更接近，效果最好。因此，雷达资料同化对提高临近数值天气预报的准确率和对强对流天气系统的模拟能力具有重要意义。

（3）数值模拟试验表明，此次强对流过程是在有利的大尺度天气形势和地面中尺度辐合线以及中低层切变线的共同作用下触发生成的，中低层切变线的辐合抬升强迫作用是对流单体风暴组织、发展和维持的主要动力机制之一，对流凝结潜热加热

在对流单体风暴的发生发展中起重要作用。同时同化径向速度和反射率因子能成功模拟出本次对流单体风暴的中 β 尺度三维空间分布结构及其演变过程，这对中小尺度天气过程（如：超级单体、飑线、龙卷等）的分析研究具有重要应用价值。

需要指出的是，本文仅分析了一个强对流个例，考虑到不同天气过程发生发展的物理机制和初边值误差的不同，所得结论有一定的局限性，今后应该对更多个例进行试验研究。同时，对雷达资料的质量控制过程进行优化以及对观测误差进行定量分析，从而最大限度地利用高时空分辨率的雷达资料补充初始场所缺失的中小尺度信息，也是值得继续深入研究的问题。

参考文献（References）

Abhilash S, Sahai A K, Mohankumar K, et al. 2012. Assimilation of Doppler weather radar radial velocity and reflectivity observations in WRF-3DVAR system for short-range forecasting of convective storms [J]. Pure Appl. Geophys., 169 (11): 2047–2070, doi:10.1007/s00024-012-0462-z.

Bratseth A M. 1986. Statistical interpolation by means of successive corrections [J]. Tellus A, 38 (5): 439–447, doi:10.1111/j.1600-0870.1986.tb00476.x.

Chen Yaodeng, Wang Hongli, Min Jinzhong, et al. 2015. Variational assimilation of cloud liquid/ice water path and its impact on NWP [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 54 (8): 1809–1825, doi:10.1175/JAMC-D-14-0243.1.

陈葆德，王晓峰，李泓，等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述 [J]. 气象科技进展, 3 (2): 29–35. Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li Hong, et al. 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast [J]. Adv. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 3 (2): 29–35, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.003.

Dawson II D T, Xue Ming, Milbrandt J A, et al. 2015. Sensitivity of real-data simulations of the 3 May 1999 Oklahoma City tornadic supercell and associated tornadoes to multimoment microphysics. Part I: Storm- and tornado-scale numerical forecasts [J]. Mon. Wea. Rev., 143 (6): 2241–2265, doi:10.1175/MWR-D-14-00279.1.

Gao Jidong, Stensrud D J. 2014. Some observing system simulation experiments with a hybrid 3DEnVAR system for storm-scale radar data assimilation [J]. Mon. Wea. Rev., 142 (9): 3326–3346, doi:10.1175/MWR-D-14-00025.1.

Gasperoni N A, Xue Ming, Palmer R D, et al. 2013. Sensitivity of convective initiation prediction to near-surface moisture when assimilating radar refractivity: Impact tests using OSSEs [J]. J. Atmos. Oceanic Technol., 30 (10): 2281–2302, doi:10.1175/JTECH-D-12-00038.1.

Hu Ming, Xue Ming, 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 [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (2): 675–698, doi:10.1175/MWR3092.1.

Hu Ming, Xue Ming, Gao Jidong, 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 [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (2): 699–721, doi:10.1175/MWR3093.1.

Jones T A, Otkin J A, Stensrud D J, et al. 2013. Assimilation of satellite infrared radiances and Doppler radar observations during a cool season observing system simulation experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 141 (10): 3273–3299, doi:10.1175/MWR-D-12-00267.1.

Kasahara A, Balgovind R C, Katz B. 1988. Use of satellite radiometric imagery data for improvement in the analysis of divergent wind in the tropics [J]. Mon. Wea. Rev., 116 (4): 866–883, doi:10.1175/1520-0493(1988)116<0866:UOSRID>2.0.CO;2.

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 [J]. 应用气象学报, 15 (6): 658–664. Li Yongping, Yuan Zhaohong, Wang Xiaofeng. 2004. Microphysical adjustments using reflectivity of Doppler radar for meso-scale model [J]. J. Appl. Meter. Sci. (in Chinese), 15 (6): 658–664, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2004.06.003.

Li Yongzuo, Wang Xuguang, Ming Xue. 2012. Assimilation of radar radial velocity data with the WRF hybrid ensemble-3DVAR system for the prediction of hurricane Ike (2008) [J]. Mon. Wea. Rev., 140 (11): 3507–3524, doi:10.1175/MWR-D-12-00043.1.

Meng Zhiyong, Zhang Fuqing, Markowski P, et al. 2012. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China [J]. J. Atmos. Sci., 69 (4): 1182–1207, doi:10.1175/JAS-D-11-0121.1.

Schenkman A D, Xue Ming, Hu Ming. 2014. Tornado-genesis in a high-resolution simulation of the 8 May 2003 Oklahoma City supercell [J]. J. Atmos. Sci., 71 (1): 130–154, doi:10.1175/JAS-D-13-073.1.

Schenkman A D, Xue Ming, Shapiro A, et al. 2011a. The analysis and prediction of the 8–9 May 2007 Oklahoma tornadic mesoscale convective system by assimilating WSR-88D and CASA radar data using 3DVAR [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (1): 224–246, doi:10.1175/2010MWR3336.1.

Schenkman A D, Xue Ming, Shapiro A, et al. 2011b. Impact of CASA radar and Oklahoma Mesonet data assimilation on the analysis and prediction of tornadic mesovortices in an MCS [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (11): 3422–3445, doi:10.1175/MWR-D-10-05051.1.

盛春岩，浦一芬，高守亭. 2006. 多普勒天气雷达资料对中尺度模式短时预报的影响 [J]. 大气科学, 30 (1): 93–107. Sheng Chunyan, Pu Yifen, Gao Shouting. 2006. Effect of Chinese Doppler radar data on nowcasting output of mesoscale model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (1): 93–107, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.01.08.

Smith P L Jr, Myers C G, Orville H D. 1975. Radar reflectivity factor calculations in numerical cloud models using bulk parameterization of precipitation [J]. J. Appl. Meteor., 14 (6): 1156–1165, doi:10.1175/1520-0450(1975)014<1156:RRFCIN>2.0.CO;2.

Snook N, Xue Ming, Jung Y. 2011. Analysis of a tornadic mesoscale convective vortex based on ensemble Kalman filter assimilation of CASA X-band and WSR-88D radar data [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (11): 3446–3468, doi:10.1175/MWR-D-10-05053.1.

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 [J]. 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 [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73 (4): 679–696, doi:10.11676/qxxb2015.048.

Wang Hongli, Sun Juanzhen, Fan Shuiyong, et al. 2013. Indirect assimilation of radar reflectivity with WRF 3D-Var and its impact on prediction of four summertime convective events [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 52 (4): 889–902, doi:10.1175/JAMC-D-12-0120.1.

Wattrelot E, Caumont O, Mahfouf J F. 2014. Operational implementation of the 1D+3D-Var assimilation method of radar reflectivity data in the AROME model [J]. Mon. Wea. Rev., 142 (5): 1852–1873, doi:10.1175/MWR-D-13-00230.1.

许小永, 刘黎平, 郑国光. 2006. 集合卡尔曼滤波同化多普勒雷达资料的数值试验 [J]. 大气科学, 30 (4): 712–728. Xu Xiaoyong, Liu Liping, Zheng Guoguang. 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman filter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 712–728, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.04.16.

Xue Ming, Hu Ming, Schenkman A D. 2014. Numerical prediction of the 8 May 2003 Oklahoma City tornadic supercell and embedded tornado using ARPS with the assimilation of WSR-88D data [J]. Wea. Forecasting, 29 (1): 39–62, doi:10.1175/WAF-D-13-00029.1.

Xue Ming, Wang Donghai, Gao Jidong, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation [J]. Meteor. Atmos. Phys., 82 (1–4): 139–170, doi:10.1007/s00703-001-0595-6.

杨艳蓉, 王振会, 杨洪平, 等. 2008. 多普勒雷达反射率与径向风资料在数值模式中的应用试验 [J]. 气象, 34 (6): 26–34. Yang Yanrong, Wang Zhenhui, Yang Hongping, et al. 2008. Doppler radar reflectivity and radial velocity data assimilation in numerical model [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 34 (6): 26–34, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2008.6.004.

Zhang J. 1999. Moisture and diabatic initialization based on radar and satellite observations [D]. Ph. D. dissertation, University of Oklahoma.