郑淋淋,邱学兴,钱磊,2019.同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究[J].气象,45(1):73-87. Zheng L L, Qiu X X, Qian L, 2019. Simulation study of a squall line case based on assimilation radar reflectivity data[J]. Meteor Mon, 45(1):73-87(in Chinese).

同化雷达反射率资料对一次飑线过程的模拟研究*

郑淋淋 邱学兴 钱 磊

安徽省气象台,合肥 230031

提 要: 在用集合卡曼滤波方法(EnKF)同化雷达径向风、雷达反演风和GPS水汽资料的基础上,对2014年7月30日发生在安徽中东部的一次飑线过程采用雷达反射率资料对初始水汽场进行调整。该方法相对EnKF的模拟结果,在飑线强度、位置、持续时间、产生降水和地面风场方面均有改进。改进湿度场后飑线前部的地面辐合区模拟效果较好,这可能是飑线强度和位置模拟效果改进的原因之一。没有调整湿度场时飑线维持时间较短,且强度较弱,这是由于飑线后部的中层干冷空气夹卷较弱,且冷池很快远离飑线,不利飑线维持。调整湿度场后,飑线后部干冷空气夹卷较强,且在对流区下沉形成冷池,冷池位于飑线后部,有利飑线维持。夹卷加强的可能原因是:采用雷达反射率资料调整湿度场增加了中低层(600~900 hPa)湿度,大气不稳定性增加,对流发展造成低值系统增强,其南部的偏西风增强,导致飑线后部的干冷空气夹卷增强。该试验揭示了湿度调整、大气不稳定度改变造成的动力场调整对对流发展和组织的重要作用。

关键词: 飑线,资料同化,水汽调整,冷池

中图分类号: P458,P412 **文献标志码:** A **DOI:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.01.007

Simulation Study of a Squall Line Case Based on Assimilation Radar Reflectivity Data

ZHENG Linlin QIU Xuexing QIAN Lei

Anhui Meteorological Observatory, Hefei 230031

Abstract: Based on the assimilation of radar radial wind, radar retrieval wind and GPS water vapor data with the ensemble Kalman filtering (EnKF) method, the initial water vapor field of a squall line that occurred on 30 July 2014 in east-central Anhui was adjusted according to radar reflectivity data. Compared with the simulation results of EnKF, this method has improved the simulation of intensity, location, duration, precipitation and surface wind of the squall line. Simulation performance of ground convergence zone in the front of the squall line was improved after adjusting humidity field, leading to better simulation results of the intensity and location of the squall line. In addition, the squall line maintained for a shorter time without humidity adjustment and the intensity was weak. This can be explained by the fact that mid-level dry air entrainment was weak in the rear of the squall line, and the cold pool moved quickly away from the squall line, which was unfavorable for the maintenance of squall line. In contrast, after the humidity field was adjusted, dry air entrainment in the rear of the squall line was strong, and the resultant downdraft generated the cold pool, which was located in the rear of the squall line, favorable for the maintenance of squall line. The possible reason for dry air entrainment strengthening tends to be that atmospheric instability was increased with the moisturizing of mid-low level (600−900 hPa) after the humidity field adjustment, and the development of convection results in the enhancement of low-value system. The

* 国家自然科学基金青年基金项目(41705029)资助

2017年10月26日收稿; 2018年1月8日收修定稿

第一作者:郑淋淋,主要从事中尺度气象学研究. Email:zhengll.2@163.com

westerly in the south of low-value system intensifies, strengthening the dry cold air entrainment in the rear of the squall line. This experiment reveals that the adjustment of the humidity leads to the adjustment of the dynamic field, which plays an important role in the development and organization of the convection system.

Key words: squall line, data assimilation, water vapor adjustment, cold pool

引 言

强对流天气包括强雷电、短时强降水、雷暴大风和冰雹,对人民生产和生活造成严重损失,是最严重的气象灾害之一。由于其突发性强、持续时间短、灾害重等特点,是天气预报中的难点。飑线是造成强对流天气的主要中尺度对流系统之一,且易造成短时强降水、雷暴大风和冰雹等严重的强天气。据统计,2001—2007年强对流灾害造成的直接经济损失每年均110亿元以上,占气象灾害全部损失的6%~15%。2009年强对流天气则是我国第三大气象灾害,仅次于干旱和暴雨洪涝(曲晓波和张建忠,2009)。

对中尺度对流系统模拟难度较大,一方面原因是模式初始场存在误差导致。目前的改进初始场的主要方法是资料同化技术,而集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filtering,EnKF)方法是目前主要的同化方法之一。EnKF方法的思想是:采用Monte Carlo方法设计预报状态的一个集合,该集合的平均可作为对大气的最佳估计,该集合的样本协方差即作为背景误差协方差的近似(高拴柱,2005)。对于中小尺度系统来说,多普勒雷达是其最重要的观测手段,因此同化雷达资料对于提高中尺度系统的预报尤为重要。目前国内外的区域模式采用EnKF同化多普勒雷达观测资料取得很大进展,且对于雷达观测资料的同化对预报的改进基本上都是正效果。如:WRF模式(闵锦忠等,2011;Aksoy et al,2009;2010)、ARPS模式(兰伟仁等,2010a;2010b;Tong and Xue,2005;李昕等,2016)和三维云模式(许小永等,2006)。但是目前EnKF方法只能同化雷达径向风,对雷达反射率同化还没有很好的方法。

由于对流触发和发展对大气温度垂直递减率特别敏感(Takemi,2007a;2007b),同时大气湿度廓线对对流触发和维持也很重要(孙建华等,2014;Takemi,2006;2007a;Zheng et al,2013),因此能反映大气温度和湿度廓线的真实状态对于准确模拟中尺度天气系统尤为重要。由于大气温度垂直递减率的高敏感性,对其进行正确地调整较为困难。而采用观测资料对影响对流发生发展敏感性相对较弱的水汽垂直分布因子进行调整,操作性更强且尤为必要。本文在EnKF同化方法的基础上,采用雷达反射率资料对EnKF分析场的水汽廓线进行调整,以弥补EnKF方法目前不能同化雷达反射率资料的缺陷,且该方法简单、易操作、耗费资源少,可在预报业务上实时应用。

1 个例简介

2014年7月30—31日安徽中东部发生一次飑线过程,主要造成雷电、雷暴大风和短时强降水天气。过程最大降水量为161 mm(图1a),小时最大雨强为75 mm(图略)。30日12时(北京时,下同)回波在安徽砀山开始形成,19时前回波在淮北地区发展,之后开始向东偏南方向发展和移动,20时在合肥西北部形成线状回波,并向东偏南方向移动,移速加快,23时在安徽东部形成成熟的飑线(图1b)。31日04时在江苏与安徽交界处减弱消散。此次飑线主要造成短时强降水(观测最大小时降水量75 mm,21时)和雷暴大风天气(观测瞬时最大风速出现在31日00时的铜陵站,达20.1 m·s^{-1},图略)。

从合肥站30日20时至31日04时降水量和地面风的演变情况看(图2),22时出现小时降水量急增的情况,小时降水量为32 mm,同时地面风速增强为10 m·s^{-1},地面气压急速上升至1008 hPa。

2 资料和方法

由于只采用NCEP_FNL(1°×1°)初始场启动的WRF中尺度模式没有成功模拟飑线结构(图3b),此试验被称为FNL试验。采用EnKF方法同化雷达径向风、雷达反演风和GPS水汽资料后,预报效果得到明显改进(图3c),被称为EnKF试验(表1)。但EnKF试验对飑线和降水强度模拟明显比实况弱(图3a和3c)。在此基础上,本文采

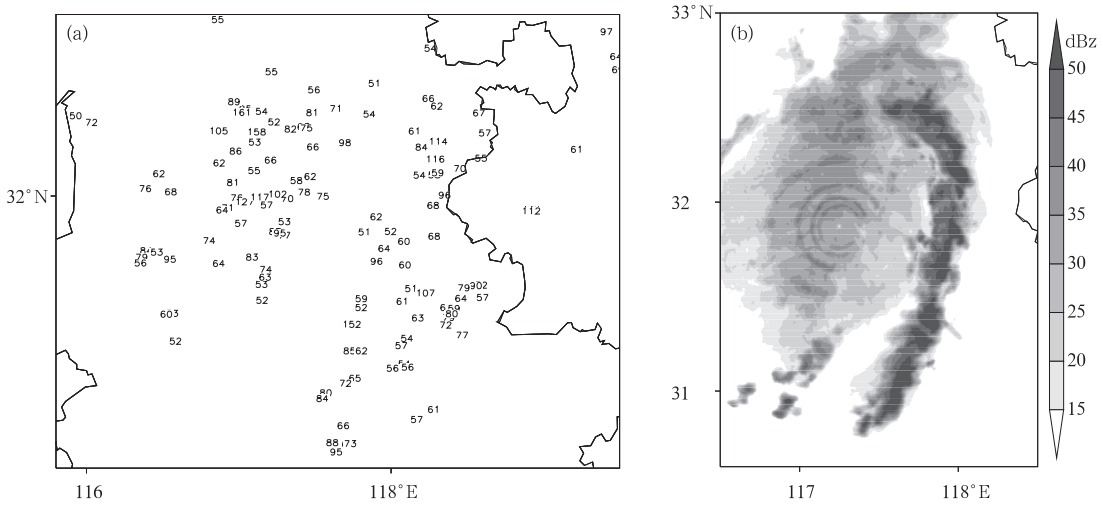

图 1　2014 年 7 月(a)30 日 19 时至 31 日 04 时累计降水量(≥50 mm,单位:mm),
(b)30 日 23 时组合反射率

Fig. 1　(a) Accumulated precipitation from 19:00 BT 30 to 04:00 BT 31 (≥ 50 mm, unit: mm),
(b) composite reflectivity at 23:00 BT 30 July 2014

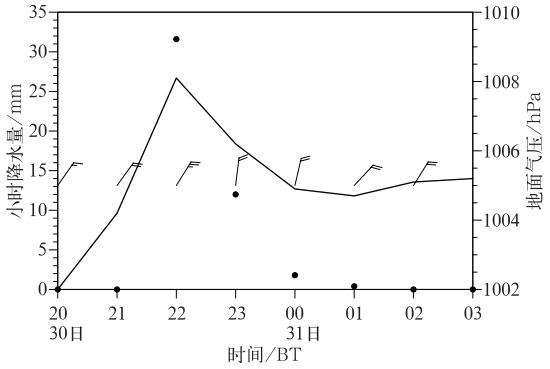

图 2　2014 年 7 月 30 日 20 时至 31 日 04 时
合肥站小时降水量(圆点)、地面气压
(实线)和地面风(风向杆,全风向杆
代表 4 m·s^{-1})

Fig. 2　Temporal variations of hourly
precipitation (dots), surface pressure
(solid line) and surface wind (barb,
the full barb represents 4 m·s^{-1}) at
Hefei Station (58321) from 20:00 BT 30
to 04:00 BT 31 July 2014

用雷达反射率资料对中尺度模式(WRF)初始场湿度廓线进行调整。与 Hu et al (2004)在 ARPS 模式中应用的温度调整方案类似:在有降水云情况下,云区大气是湿绝热的。本文湿度廓线的调整方法是:在有降水云的情况下,云区大气是饱和的。具体的做法是:为了对比湿度调整的不同程度对飑线的影响,采用不同的反射率阈值调整湿度,分别采用 20、30 和 40 dBz 作为阈值,即反射率因子达到相应阈值,将该处大气相对湿度调整为 98%。分别称为 qv20、qv30 和 qv40 试验(表 1),反射率阈值越小,相对湿度增加为 98%的观测点越多,即湿度增加的观测点越多。

在湿度廓线调整之前,先对覆盖本次飑线影响区域的 4 个雷达站(蚌埠、阜阳、合肥和铜陵)的雷达反射率资料进行质量控制和稀疏化。采用 Zhang et al (2009)方法,对体扫模式中的每一层反射率资料首先进行稀疏化处理,将分辨率 1 km×1°(径向分辨率 1 km,切向分辨率 1°)的反射率资料稀疏成 3 km×3°(径向分辨率 3 km,切向分辨率 3°)。稀疏化的方法是,每个稀疏化后的数据是以其为中心的 20 km 径向距离和 5°切向方位角内的数据进行水平平均后的结果,20 km×5°称为一个平均单位,得到分辨率为 3 km×3°反射率值。在平均之前,对平均单位内的数据进行简单的质量控制:剔除平均单位中反射率小于 5 dBz 的值;剔除平均单位中反射率大于 2 倍该平均单位反射率标准差的观测;且经过以上剔除处理后平均单位中的有效观测数必须不少于 10 个,若小于 10 个,则将该平均单位得到的反射率值定为缺测。

预报模式采用 WRFV3.6 版本(Skamarock et al,2005),并采用宾夕法尼亚州立大学开发的集

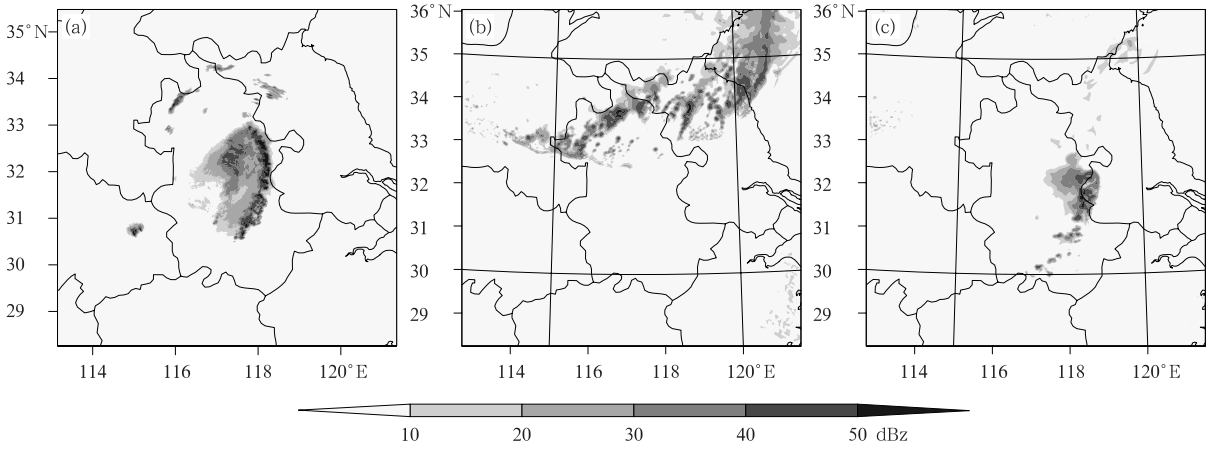

图 3 2014 年 7 月 31 日 00 时(a)实况组合反射率,(b)FNL 试验和
(c)EnKF 试验模拟的最大反射率

Fig. 3 (a) Observed composite radar reflectivity, simulated maximum reflectivities of (b) FNL experiment and (c) EnKF experiment at 00:00 BT 31 July 2014

表 1 数值试验的设置

Table 1 Configurations of numerical experiments

试验名称	试验描述
FNL	采用 NCEP_FNL 作为 WRF 模式初始场
EnKF	对 NCEP_FNL 启动的 WRF 模式初始场,采用 EnKF 方法同化雷达径向风、雷达反演风和 GPS 水汽观测的预报试验
qv20	在 EnKF 试验基础上,将反射率≥20 dBz 的观测点相对湿度调整为 98%
qv30	同 qv20 试验,反射率阈值为 30 dBz
qv40	同 qv20 试验,反射率阈值为 40 dBz

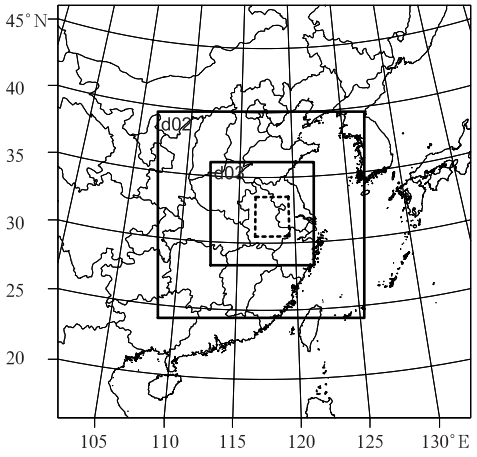

图 4 WRF 模式区域设置
(黑色虚线方框代表飑线发生位置)

Fig. 4 The domain setting of WRF model
(Black dashed square represents the location of the squall line)

合卡尔曼滤波系统(PSU-EnKF)(Zhang et al, 2006a;2006b;2009;Meng and Zhang,2007;2008a;2008b)进行资料同化。模式区域为三重嵌套网格(图 4),分辨率分别为 27、9 和 3 km,格点数分别为 129×129、193×193 和 289×289,模式垂直方向为 35 层,模式层顶设置为 50 hPa。EnKF 方法相关设置与邱学兴和 Zhang(2016)的一致:EnKF 系统共有 36 个集合预报成员,首先用 WRFDA 系统(Barker et al,2004)中背景误差协方差选项"cv3"生成 7 月 30 日 08 时区域 1 的初始扰动场,再利用 WRF 模式将初始扰动降尺度至第二和第三重区域。资料同化时间窗为 7 月 30 日 14—20 时,逐小时在所有模式层上同化观测资料。为避免集合预报离散度过小,采用 Zhang et al (2004)的背景误差协方差膨胀方法,权重系数取0.5。同化过程多物理过程参数化方案采用随机组合方法。在 30 日 20 时资料同化结束后,采用 EnKF 集合平均向前进行确定性预报积分至 31 日 02 时(积分 6 h)。所有试验中,积分 6 h 的确定性预报采用相同的参数化方案:微物理过程采用 WSM6 参数化方案(Hong et al, 2004),边界层过程采用 YSU 参数化方案(Noh et al,2003),积云参数化方案采用显示方案。

3　结果分析

3.1　雷达反射率的敏感性试验

采用不同的反射率阈值调整湿度对对流发展的影响不同。各敏感性试验均在 900～600 hPa 的比湿平均增量大(图 5a),在 950 hPa 附近增量达到最大值。qv20 试验比湿增量最大,qv40 试验最小。

从飑线的结构和维持时间看(图 6),qv30 试验与观测最接近。qv20 试验对安徽西北部的对流和江苏中部的对流模拟偏强,且对飑线的移动速度模拟偏快。qv40 试验对飑线模拟偏弱,且消散较快。中低层湿度增加越多,对流范围越大,且持续时间越长。但比湿增加过多易出现虚假对流,且对流移动速度过快。因此,适度调整中低层湿度对成功模拟飑线至关重要。

3.2　湿度调整对飑线的影响

采用 20、30 和 40 dBz 阈值对初始场湿度廓线进行调整,结果表明采用 30 dBz 作为阈值对飑线结构和维持的时间模拟效果较好,本节对比 qv30 试验对 EnKF 试验的改进效果。

分别选取飑线形成、成熟和消亡阶段的代表时刻 30 日 21 时、23 时和 31 日 01 时进行对比,且这三个时刻小时雨强较大。对 EnKF 试验初始场进行湿度调整后,900～600 hPa 的比湿平均增量达到 2 $g \cdot kg^{-1}$ 以上(图 5a),在 950 hPa 达到最大值为 5 $g \cdot kg^{-1}$。850 hPa 比湿增量在回波较强的安徽西北部较大(图 5b)。qv30 试验主要对中低层的湿度调整较大,湿度增加最多的位于 850 hPa(图 5a)。

从反射率预报看,在飑线形成时刻(30 日 21 时,图 $7a_1$,$7b_1$,$7c_1$),EnKF 试验对飑线的强度预报较弱,且位置比实况偏东偏南,qv30 试验对飑线的位置和强度预报相对 EnKF 试验较好,但对飑线西北部和江苏中部的层状云回波预报偏强。飑线成熟时刻(30 日 23 时,图 $7a_2$,$7b_2$,$7c_2$),虽然 EnKF 和 qv30 试验对飑线尺度预报均比实况小,但 EnKF 试验对飑线强度预报偏弱,位置偏南,qv30 试验对飑线强度和位置的预报较好,且 EnKF 试验对飑线西北部的层状云区范围预报偏小,qv30 试验的预报有改善。在飑线消亡时刻(31 日 01 时,图 $7a_3$,$7b_3$,$7c_3$),EnKF 试验对飑线尺度预报明显偏小,qv30 试验预报效果改善明显,比实况反射率略偏小。

从反射率预报看,只同化雷达径向风、反演风和 GPS水汽资料(EnKF试验)基本能模拟出飑线,但对

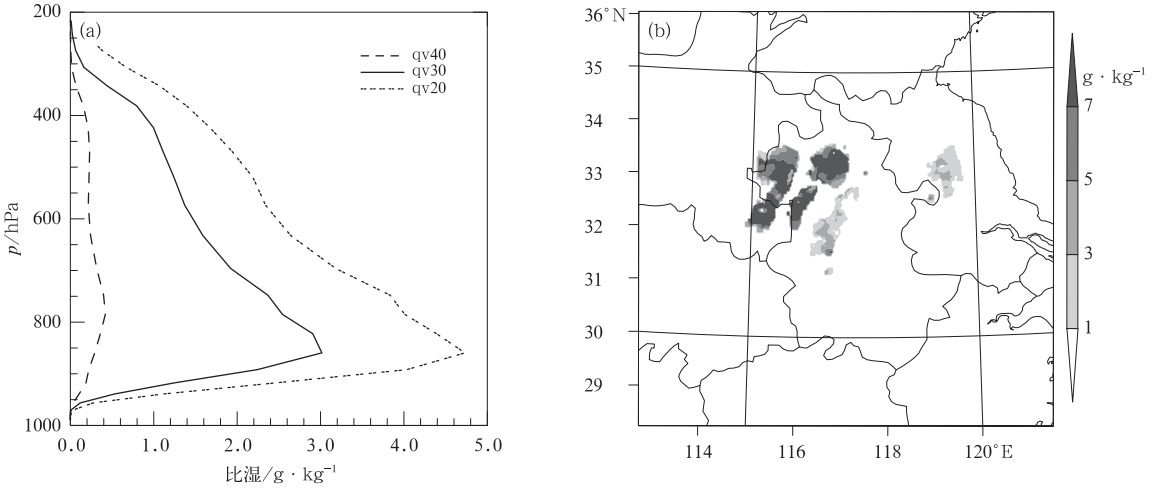

图 5　2014 年 7 月 30 日 20 时(a)qv20、qv30 和 qv40 试验中水平平均的比湿增量廓线,(b)qv30 试验 850 hPa 比湿增量的水平分布

Fig. 5　(a) Profile of horizontal averaged specific humidity increment in qv20, qv30 and qv40 experiments, (b) horizontal distribution of specific humidity increment at 850 hPa in qv30 experiment at 20:00 BT 30 July 2014

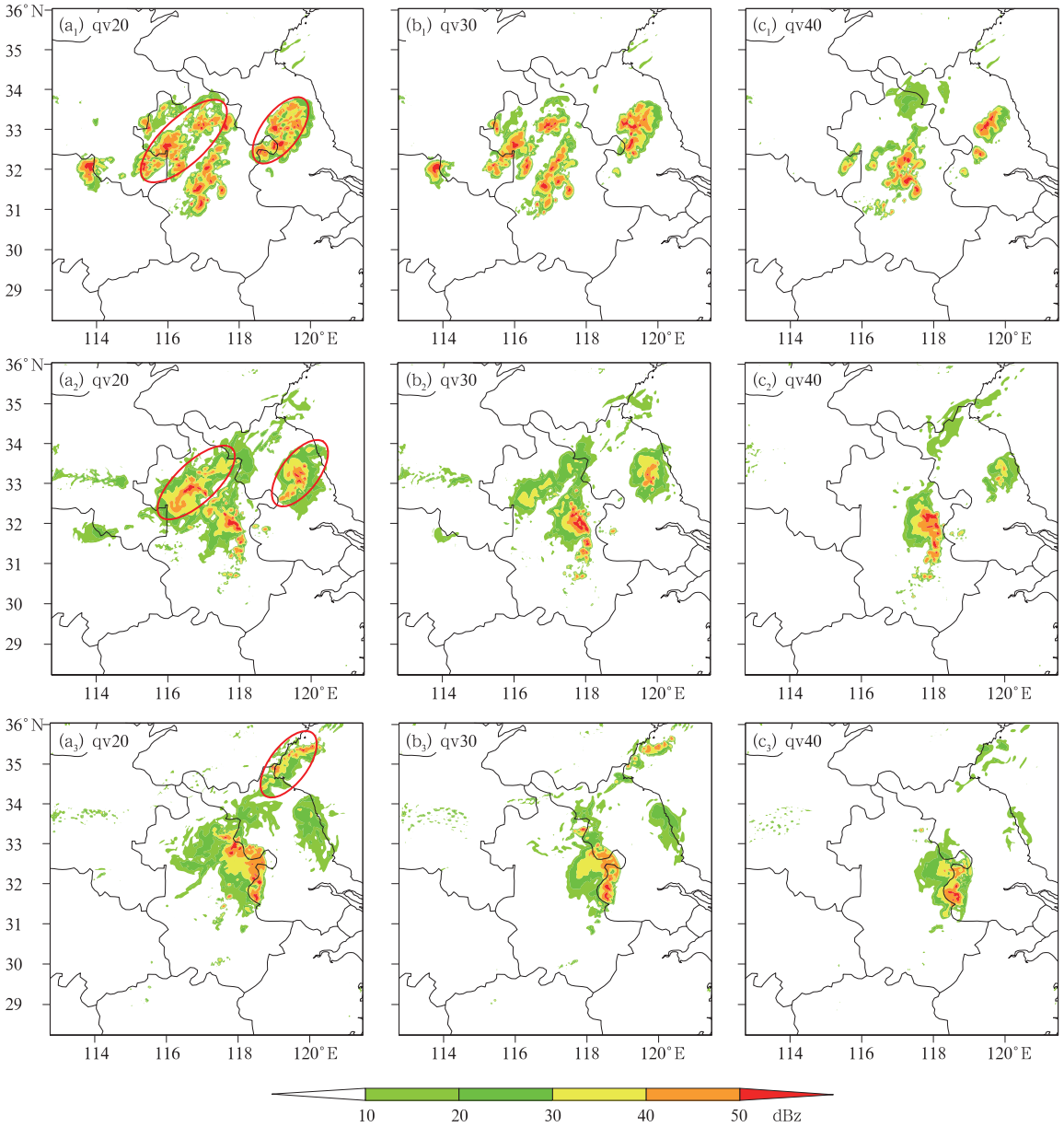

图 6 2014 年 7 月 30 日 21 时(a_1,b_1,c_1),23 时(a_2,b_2,c_2)和 31 日 01 时(a_3,b_3,c_3)qv20 试验(a)、qv30 试验(b)和 qv40 试验(c)的最大反射率

Fig. 6 The maximum reflectivities of qv20 experiment (a), qv30 experiment (b) and qv40 experiment (c) at 21:00 BT 30 July (a_1, b_1, c_1), 23:00 BT 30 July (a_2, b_2, c_2), and 01:00 BT 31 July (a_3, b_3, c_3) 2014

其预报位置偏南、强度偏弱、尺度偏小和持续时间短,且不能预报飑线后部的大范围层状云。在此基础上,采用雷达反射率资料调整初始场的湿度后(主要调整中低层湿度),对飑线位置、强度和持续时间及飑线后部的层状云模拟效果改进明显,但对 0～3 h 时效的层状云预报偏强。

从小时雨强看,在飑线形成阶段(图 8a_1,8b_1,8c_1),EnKF 试验对飑线预报偏弱,造成降水范围预报偏小,另外对飑线后部层状云降水范围预报明显偏弱(图 8b_1)。qv30 试验对飑线部分及飑线后部层状云的降水预报相对于 EnKF 试验较好(图 8c_1),但对层状云的最大降水量预报略偏强。

在飑线成熟阶段(图 8a_2,8b_2,8c_2),观测出现两条降水带,飑线后部的降水带可能是由于飑线移动和新生较快,旧飑线单体还没有完全消散形成的降水带(图 8a_2)。EnKF 和 qv30 试验没有预报出飑线后部降水带,EnKF 试验对飑线降水带位置预报偏东,对飑线北部降水预报偏强(图 8b_2),qv30 试验对降水带位置和强度的预报均较 EnKF 试验好,且对飑线北部层状云降水预报改善明显,但与观测相比,对飑线北部降水预报略偏强,对飑线南部降水预报略偏弱(图 8c_2)。

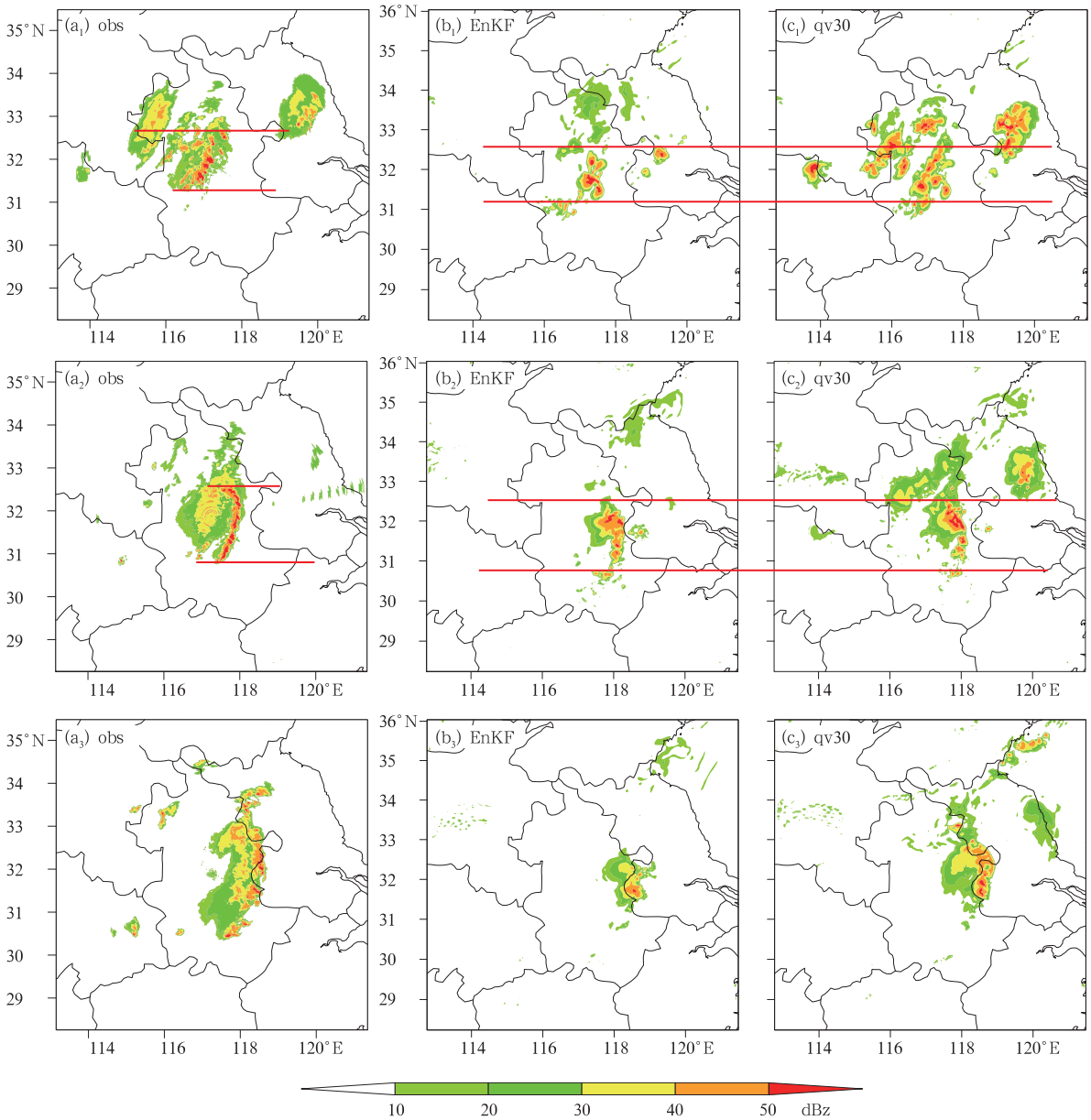

图 7　2014 年 7 月 30 日 21 时(a_1,b_1,c_1),23 时(a_2,b_2,c_2)和 31 日 01 时(a_3,b_3,c_3)的实况组合反射率(a),以及 EnKF 试验(b)和 qv30 试验(c)的最大反射率预报结果

(红色实线代表实况飑线南北点的平行线)

Fig. 7　The observed composite reflectivity (a), maximum reflectivity of EnKF experiment (b) and qv30 experiment (c) at 21:00 BT 30 July (a_1, b_1, c_1), 23:00 BT 30 July (a_2, b_2, c_2) and 01:00 BT 31 July (a_3, b_3, c_3) 2014

(Red solid line represents the parallel lines of the south and north points of the squall line)

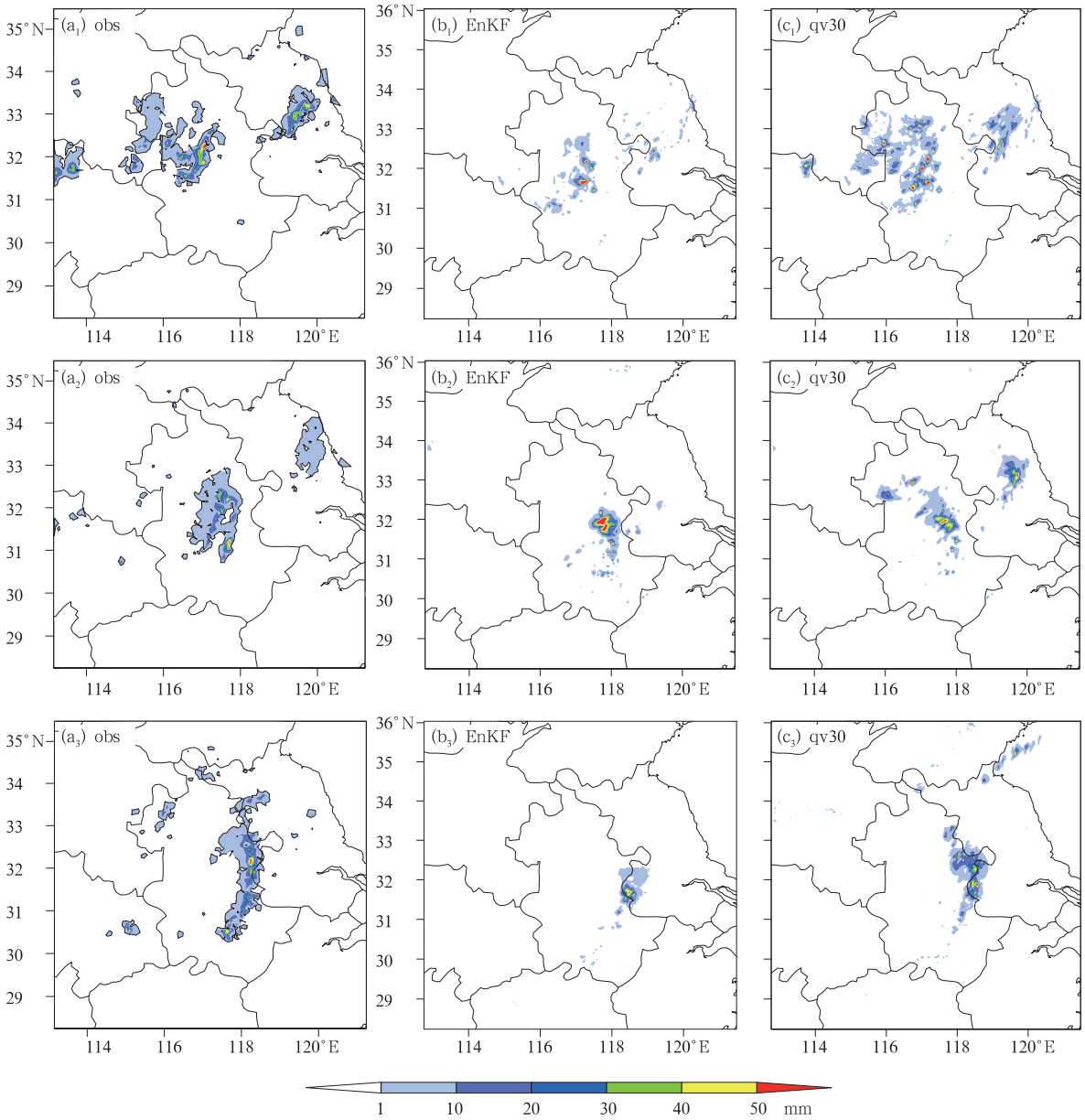

图 8 同图 7,但为小时降水量

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for hourly precipitation

在飑线消亡阶段(图 8a_3,8b_3,8c_3),观测的降水雨带呈近似南北向(图 8a_3),雨带位于安徽省东部,小时降水量普遍达 20 mm 以上,最大雨强位于飑线北部,达 50 mm·h^{-1}以上,后部层状云降水范围较小,强度均在 10 mm·h^{-1}以下。EnKF 试验由于预报的飑线快速消亡,且对飑线位置预报偏南,对 31 日 01 时的小时降水量的降水带范围预报明显偏小,且最大雨强的位置偏南(图 8b_3)。qv30 试验对飑线北部的降水强度和强降水中心位置预报较好,但对层状云降水范围、南部降水强度预报偏弱。

从小时降水量预报看,qv30 试验对飑线中强降水强度和位置预报在 EnKF 基础上改善明显,对层状云降水的预报也有改善,但 qv30 和 EnKF 试验对成熟和消亡阶段飑线南部降水预报均偏弱。

3.3 模拟的地面风场与观测对比

从 30 日 23 时地面经向风和纬向风看(图 9)。观测的飑线前部有西风与东风的辐合区,EnKF 和 qv30 试验均模拟出飑线前部纬向风辐合区,但 EnKF 试验没有模拟出飑线北部的西风区,因此没有模拟

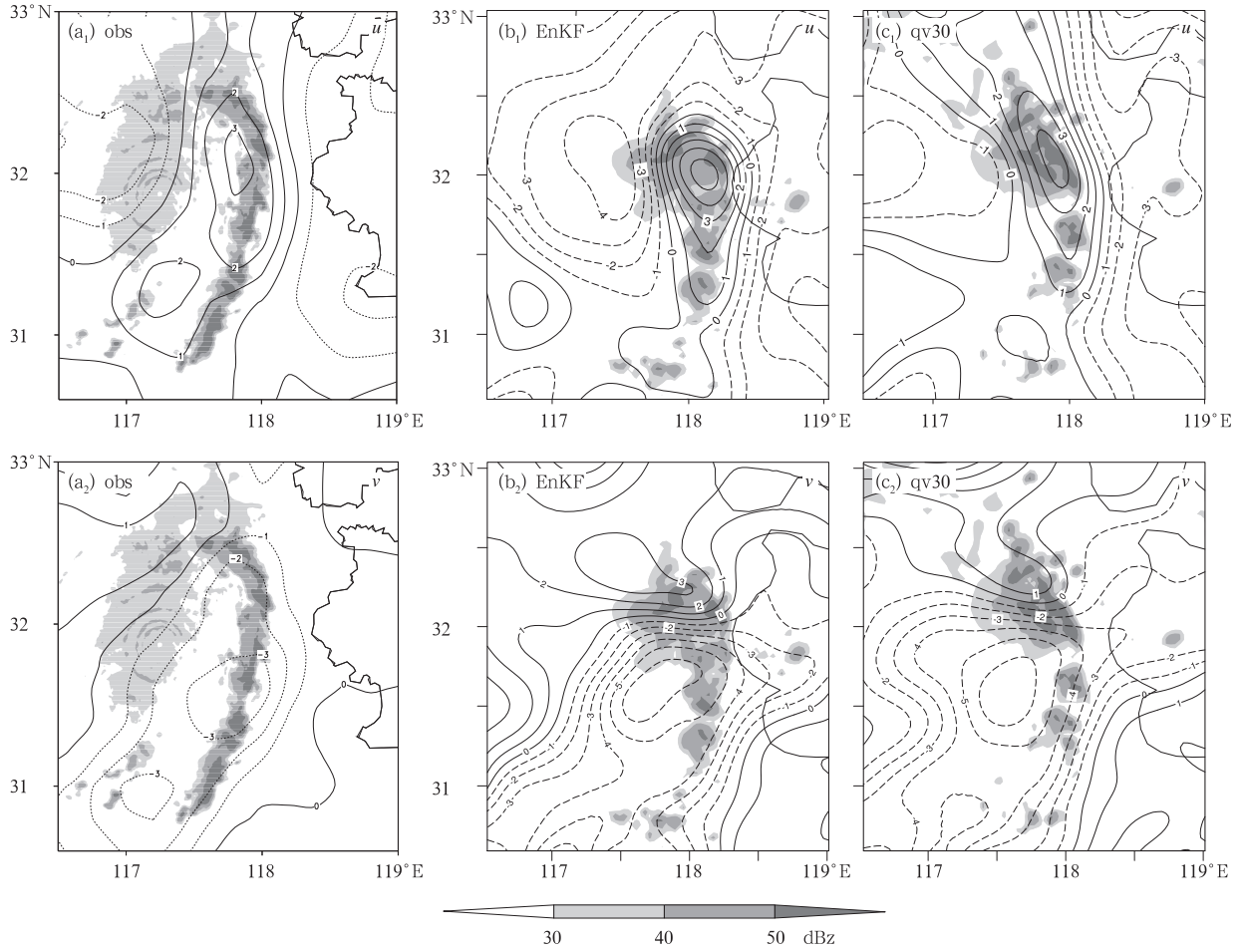

图 9　2014 年 7 月 30 日 23 时 EnKF 试验(b),qv30 试验(c)的地面纬向风(a_1,b_1,c_1)和经向风分量(a_2,b_2,c_2)(等值线,单位:$m \cdot s^{-1}$)、最大反射率(阴影)与观测(a)对比

Fig. 9　Surface zonal (a_1, b_1, c_1), meridional wind (a_2, b_2, c_2) (contour, unit: $m \cdot s^{-1}$) and maximum reflectivity (shaded area) of EnKF experiment (b), qv30 experiment (c) and observations (a) at 23:00 BT 30 July 2014

出飑线北部的辐合,造成对飑线北部强度模拟偏弱、飑线北部向北伸展偏南,导致对整个飑线位置模拟偏南。qv30 试验的纬向风分布基本与观测一致。观测在飑线附近为大范围的北风分量,EnKF 和 qv30 试验没有模拟出飑线北部的北风分量,但 EnKF 试验的北风区域比 qv30 试验偏南,因此模拟的飑线西北部辐散区位置偏南。经向风和纬向风分析结果表明在飑线北部存在西北风和偏东风辐合(图略),qv30 试验模拟的结果是偏东风和偏西风的辐合,而 EnKF 试验在飑线北部全为偏东风,飑线北部没有辐合,因此对飑线北部的强度和向北伸展的范围模拟偏弱。

从单站的地面风速时间变化看,这里选取肥西站(58320)和庐江站(58327)分别代表飑线北部和中部的结果。肥西站 30 日 21 时地面风速突然增强到 11 $m \cdot s^{-1}$(图 10a),22 时时地面风速迅速下降为 2 $m \cdot s^{-1}$,但 qv30 和 EnKF 试验均在 22 时出现地面风速最大值,21 时 qv30 试验地面风速比 EnKF 试验大,且 22 时地面风速比 EnKF 试验小,23 时之后 qv30 试验地面风速与实况接近,EnKF 试验比实际风速大。这表明,在 20 时对初始场的湿度进行调整后,能对积分 1 h 的地面风速预报有所改善,且积分 3 h 后地面风速预报基本与观测一致。

庐江站 22 时地面风速突然增强到 7 $m \cdot s^{-1}$(图 10b),之后风速迅速下降,qv30 试验的预报结果与实况风速吻合较好。EnKF 试验的风速最大出现在 31 日 00 时,比观测晚 2 h,且风速比观测小,31 日 00时之后对风速的预报偏大。30日20时对湿

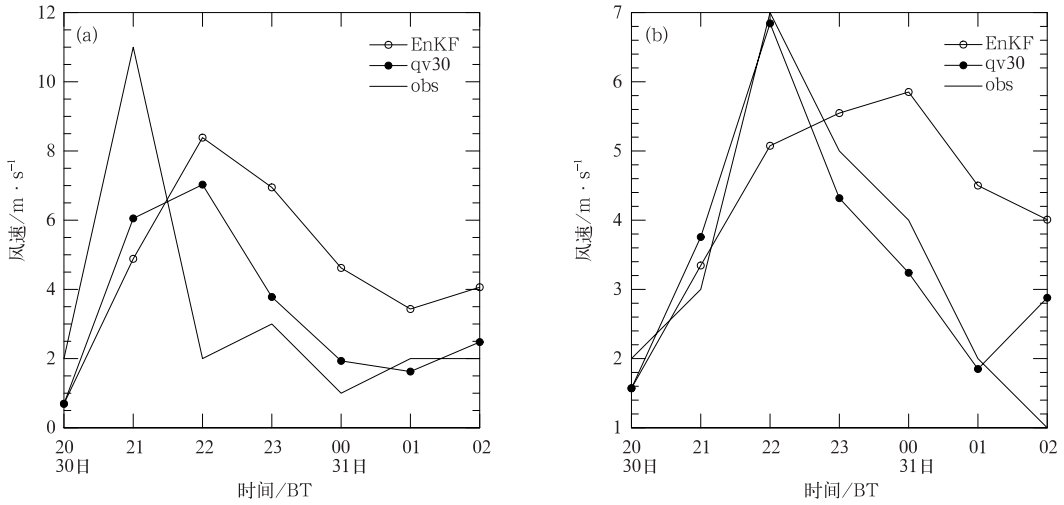

图 10 2014 年 7 月 30 日 20 时至 31 日 02 时肥西站(a)和庐江站(b)EnKF、qv30 试验地面风速与观测对比

Fig. 10 Temporal variation of suface wind speed at (a) Feixi Station (58320) and (b) Lujiang Station (58327) in EnKF, qv30 experiments and observations from 20:00 BT 30 to 02:00 BT 31 July 2014

度场进行调整后(qv30 试验),能准确预报飑线中部的地面风场。

3.4 对飑线维持的影响

31 日 02 时飑线开始消散,对比 EnKF 和 qv30 试验消散前(31 日 00 和 01 时)的地面散度场、温度场特征。从 31 日 00 时地面散度看(图 11),qv30 试验飑线辐合区位于飑线前部,且呈带状分布,EnKF 试验辐合区位于飑线前部,但离飑线较远,辐合区没有连接成带状,且 qv30 试验北边的辐合区比 EnKF 试验强,因此 qv30 试验飑线前部的带状较强的辐合区有利于飑线维持。01 时(图 12),EnKF 试验飑线东部辐合减弱,且有辐散区出现,辐合带位置更加远离飑线。qv30 试验飑线前部的辐合较强且辐合带位于飑线前部。从地面位温场看,低值中心可代表冷池的位置,qv30 试验冷池位于飑线前部,而 EnKF 试验冷池远离飑线,造成其地面辐合位置远离飑线。

EnKF 试验 31 日 01 时时冷池向东偏南方向移动(图 12),北部对流迅速减弱,且冷池更偏离对流区,导致辐合区更加远离对流区。qv30 试验冷池向偏东方向移动,且冷池与对流的移动速度基本一致,对流前部一直有辐合抬升,有助于对流维持。因此。冷池与对流区的配合决定对流维持,冷池远离对流,不利对流维持。

从对应时刻 EnKF 和 qv30 试验的垂直剖面看(图 13),qv30 试验风暴结构与典型对流风暴成熟阶段一致:风暴后部中层有大范围干冷空气夹卷(假相当位温扰动为负),且在对流区下沉,造成对流后部近地面的冷池,冷池前部强上升运动新单体生成且发展高度较高。EnKF 试验风暴后部的干冷空气夹卷较弱,在风暴后部没有形成大范围的干冷空气下沉,只有小部分在对流区下沉到近地面,风暴前部上升气流较弱,新对流单体发展高度低,且 31 日 01 时冷池远离对流区,冷池前部的上升运动远离对流,在对流下部以下沉运动为主,不利于对流维持。

可见中低层大范围干冷空气夹卷对飑线维持有重要作用。中层干空气夹卷对飑线的维持作用在动力方面主要体现在:夹卷使得水平方向上环境入流与系统出流共存并错开有利于飑线维持(张宁等,2017)。本文从动力与热力相互作用方面来分析夹卷的作用。从 31 日 00 时 850 hPa 风场看,相比 EnKF 试验,qv30 试验飑线后部垂直于飑线的水平风速较大,飑线近似南北方向,即飑线后部的偏西风分量较大(图 14),且飑线后部空气更干冷(假相当位温较小,图 14)。这是由于 qv30 试验飑线后部低值系统位置偏北、中心位势高度值较低,因此 qv30 试验低值系统南部的气压梯度大,南部的偏西风较

强造成的。EnKF 试验飑线后部的低值系统弱、范围大且偏南(图 14),因此低值系统南部的气压梯度弱,偏西风弱,南北范围大造成低值系统东南部以西南气流为主,垂直于飑线的风分量较弱,且西南气流带来更多暖湿空气,造成后部入流湿度较大,因此后部低值系统的位置和强度是影响飑线后部入流强度的主要因子。

qv30 试验调整初始场中低层(850～500 hPa)湿度(图 5a),且 850 hPa 上湿度在安徽西北部调整明显(图 5b),造成安徽西北部的对流发展,30 日 21 时观测和 qv30 试验在安徽西北部有对流发展(图 7),由于对流影响,安徽西北部有低压发展,因此飑线后部低压与这一地区湿度增大、大气层结不稳定促进对流发展有关。这一试验结果揭示了湿度

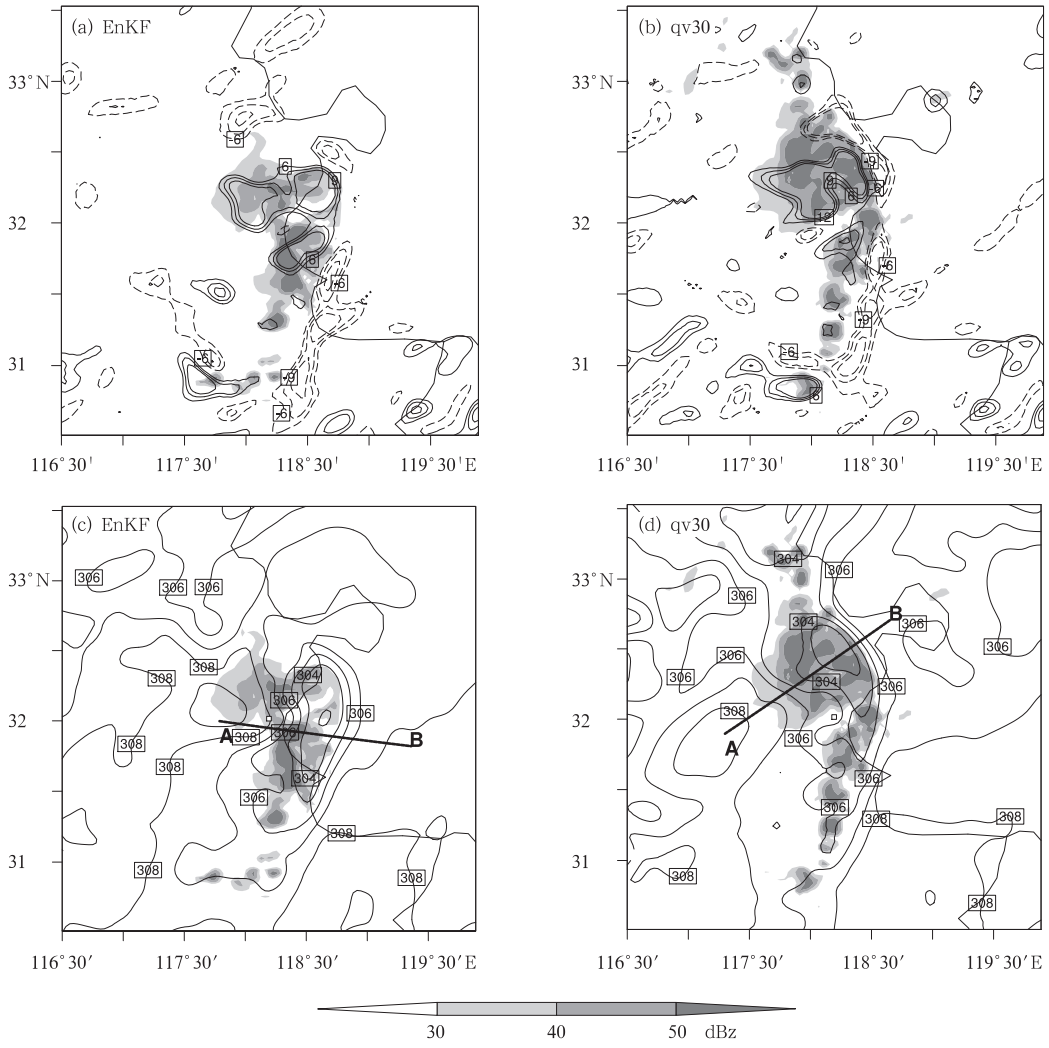

图 11　2014 年 7 月 31 日 00 时(a,c)EnKF 试验和(b,d)qv30 试验的(a,b)散度场
(等值线:单位:10^5 s^{-1},实线为正代表辐散区,虚线为负代表辐合区)
和最大反射率(阴影),(c,d)假相当位温(等值线,单位:K)和最大反射率(阴影)
(图中 AB 实线代表图 11 的剖面位置)

Fig. 11　(a, b) The divergence (contour, unit: 10^5 s^{-1}, solid line represents divergence and dashed line represents convergence) and maximum reflectiviy (shaded area), (c, d) pseudo-equivalent potential temperature (contour, unit: K) and maximum reflectivity (shaded area) in EnKF experiment (a, c) and qv30 experiment (b, d) at 00:00 BT 31 July 2014
(AB solid line represents the location of cross section in Fig. 11)

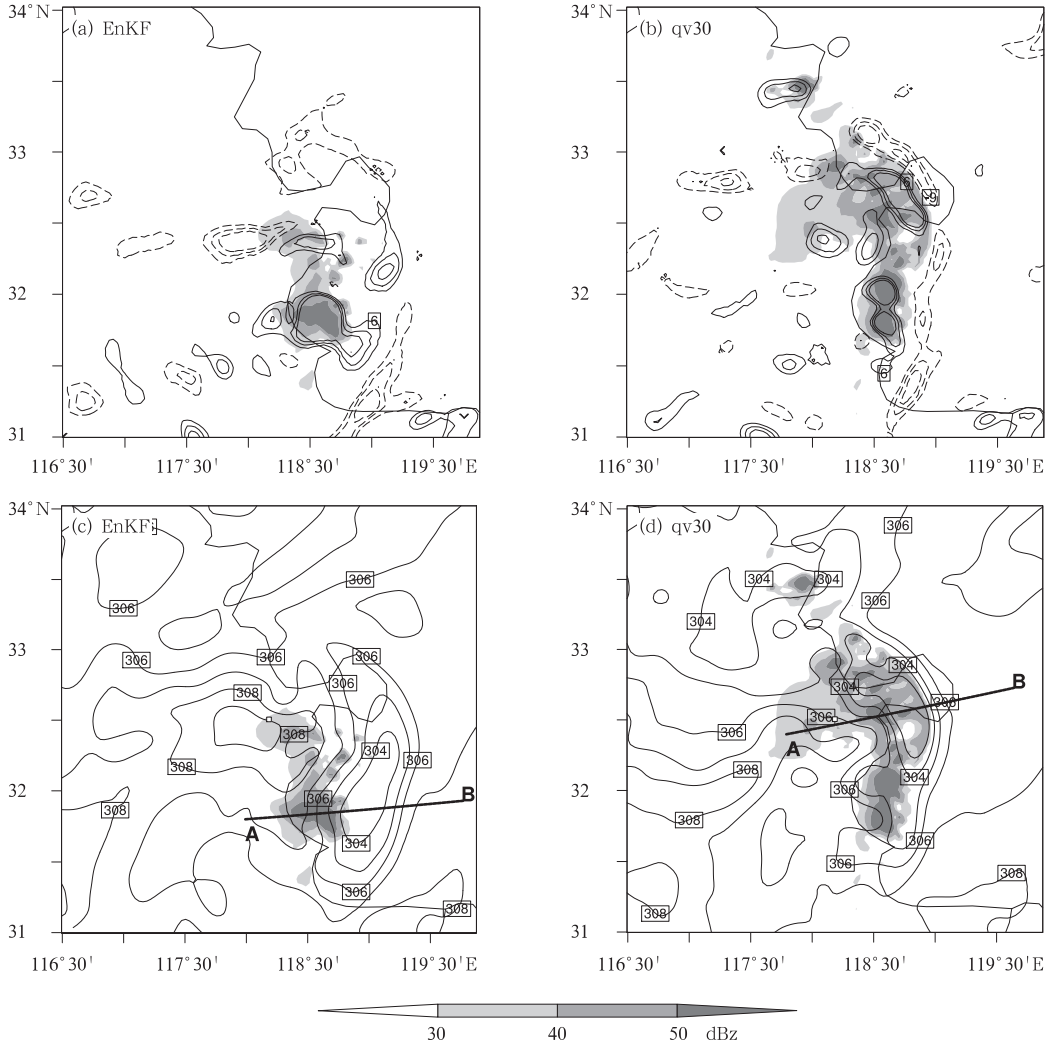

图 12 同图 11,但为 31 日 01 时

Fig. 12 Same as Fig. 11, but at 01:00 BT 31 July 2014

调整影响大气层结不稳定性,造成对流发展导致大气动力场的改变对下游对流的影响不可忽视。采用雷达反射率资料对大气湿度廓线进行调整引起大气层结的改变,从而改变大气的动力场特征,对对流的发展和组织有重要作用。

4 结论和讨论

在采用 EnKF 方法同化雷达径向风、雷达反演风和 GPS 水汽资料的基础上,对 2014 年 7 月 30 日安徽中东部的一次飑线过程采用雷达反射率资料对初始场水汽进行调整,增加了中低层(900～600 hPa)湿度。调整湿度场后的模拟结果改进如下:

(1) 对飑线位置、强度和持续时间及飑线后部的层状云范围模拟效果改进明显,但对 0～3 h 时效的层状云预报偏强。

(2) 从小时降水量预报看,对飑线中强降水强度和位置预报改善明显,对层状云降水预报也有改善,但对成熟和消亡阶段飑线南部降水预报均偏弱。这可能是由于 EnKF 和 qv30 试验对飑线南部动力和热力特征的描述不准确,飑线南部的动力触发特征没有北部明显,模拟难度较大。

(3) 对飑线中部和北部地面风场的模拟接近观测,对飑线南部的风场模拟较差,这也是造成对飑线南部对流模拟较差的原因。

(4) 对飑线维持模拟改善明显。其原因是增加中低层的湿度,大气不稳定性增强,对流发展调整低

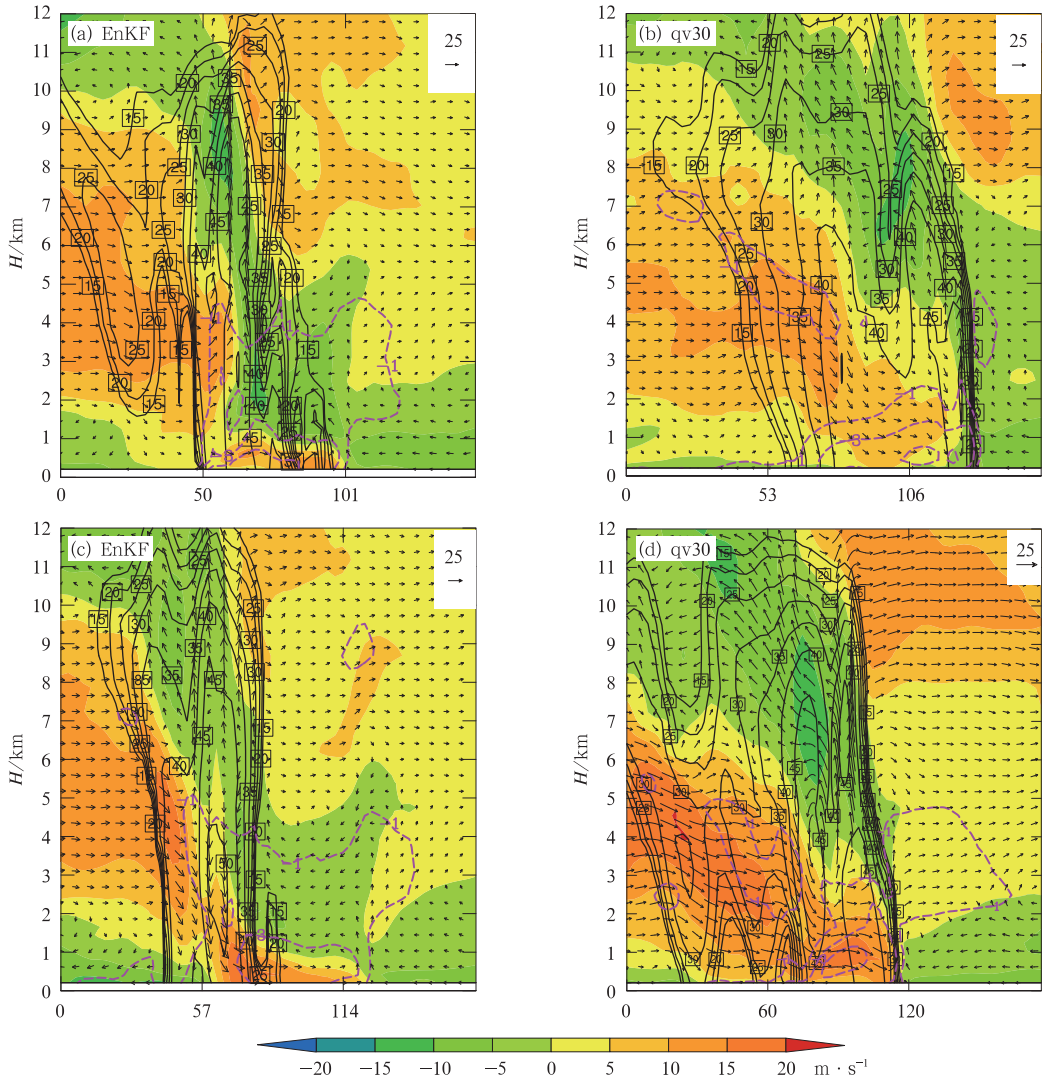

图 13　2014 年 7 月 31 日 00 时(a,b)和 01 时(c,d)对应图 10 和图 11 中 AB 剖面的反射率(黑色等值线,单位:dBz)、假相当位温负扰动(紫色虚线,单位:K)、水平风速(阴影)和风场矢量(箭头,单位:m·s^{-1},风速矢量的垂直分量放大 10 倍)
(a,c)EnKF 试验,(b,d)qv30 试验

Fig. 13　Reflectivity (black contour, unit: dBz), pseudo-equivalent potential temperature negative pertubation (purple dashed line, unit: K), horizontal wind speed (shaded area) and wind vector (arrow, unit: m·s^{-1}, vertical wind speed amplified 10 times) at AB cross section in Fig. 10 and Fig. 11 in EnKF experiment (a, c) and qv30 experiment (b, d) at 00:00 BT (a, b) and 01:00 BT (c, d) 31 July 2014

值系统的强度和位置:低值系统强度增强、位置与对流区对应,在本个例中低值系统位置更加偏北,这样其南部的偏西风增强,造成飑线后部垂直于飑线的风分量增大,且空气较干,因此中低层飑线后部干冷空气夹卷增强,有利于冷池的增强,造成飑线持续时间长。

(5) 反射率阈值的敏感性试验揭示了适度调整大气湿度廓线对飑线模拟至关重要。

本试验揭示了调整大气湿度廓线,影响大气稳定性,从而影响对流发展造成大气动力场改变,冷池强度增强,这一热力与动力场相互作用的过程对飑线强度和持续时间的重要影响。

但是由于大气层结稳定性对湿度较敏感,因此湿度廓线的改变对对流影响较大,特别对0～3 h模

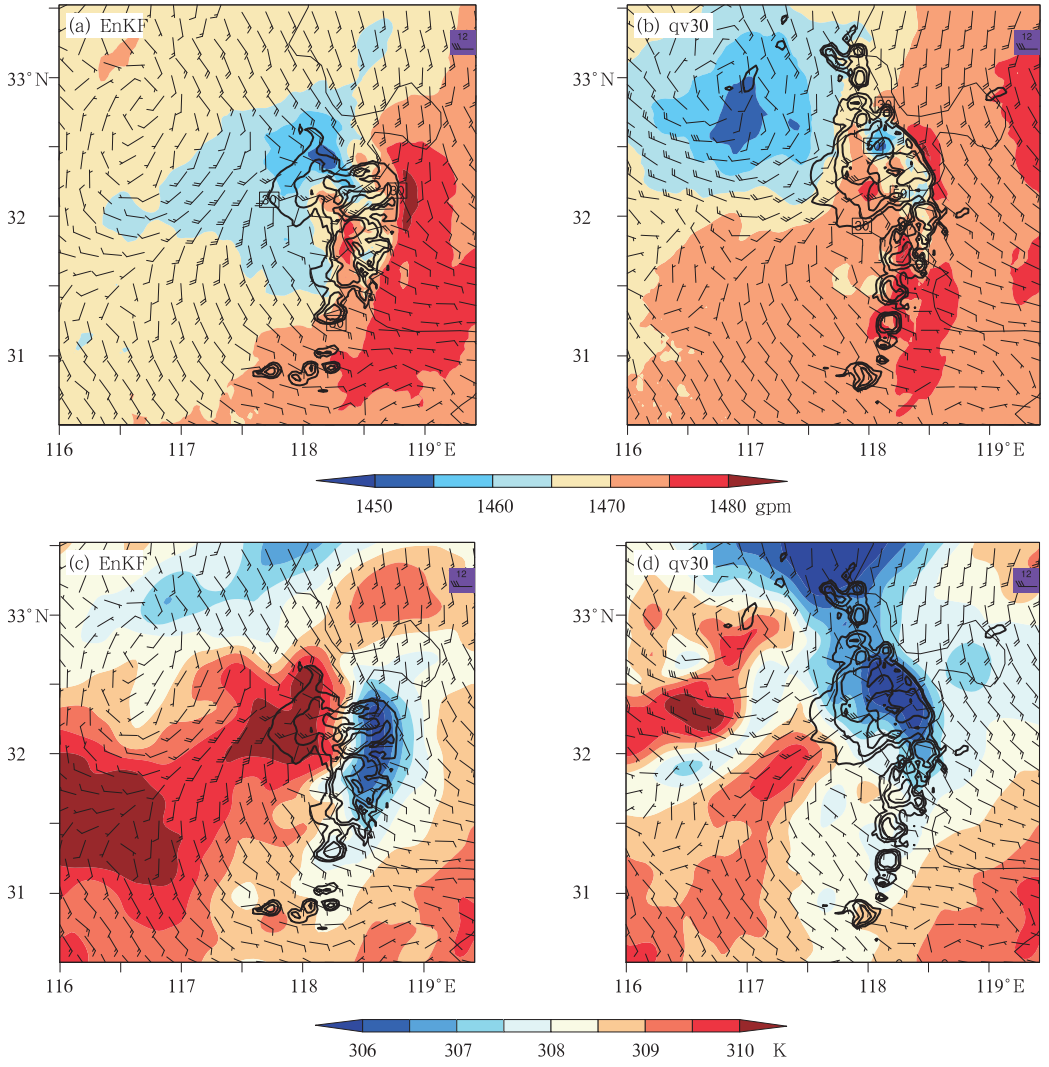

图 14 2014 年 7 月 31 日 01 时 850 hPa(a,b)水平风场(风向杆,单位:m·s^{-1})、反射率(等值线,单位 dBz)和位势高度(阴影);(c,d)水平风场(风向杆,单位:m·s^{-1})、反射率(等值线,单位:dBz)和假相当位温(阴影)
(a,c)EnKF 试验,(b,d)qv30 试验

Fig. 14 (a, b) Horizontal wind vector (barb, unit: m·s^{-1}), reflecrivity (contour, unit: dBz) and geopotential height (shaded area); (c, d) horizontal wind vector (barb, unit: m·s^{-1}), reflecrivity (contour, unit: dBz) and equivalent potential temperature (shaded area) at 850 hPa in EnKF experiment (a, c) and qv30 experiment (b, d) at 01:00 BT 30 July 2014

拟时效对流影响最大,怎样采取合理的调整标准是模拟成功与否的关键。本文采用的反射率阈值以及相对湿度和反射率因子之间的关系没有采用本地的观测统计关系,今后可统计本地区反射率与大气湿度关系,采用统计结果调整湿度更加科学与合理。

参考文献

高拴柱,2005. 集合 Kalman 滤波资料同化技术及研究现状[J]. 气象,31(6):3-8. Gao S Z,2005. Review on ensemble Kalman filter data assimilation[J]. Meteor Mon,31(6):3-8(in Chinese).

兰伟仁,朱江,Xue Ming,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[J]. 大气科学,34(3):640-652. Lan W R,Zhu J,Xue M,et al,2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: perfect model tests[J]. Chinese J Atmo Sci,34(3):640-652(in Chinese).

兰伟仁,朱江,Xue Ming,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[J]. 大气科学,34(4):737-753. Lan W R,Zhu J,Xue M,et al,

2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data Part II:imperfect model tests[J]. Chinese J Atmos Sci,34(4):737-753(in Chinese).

李昕,王元,明杰,等,2016.雷达径向风和反演风联合同化在台风灿都(2010)数值预报中的研究[J].气象,42(6):649-663. Li X, Wang Y,Ming J,et al,2016. A combined radar data assimilation strategy of radial velocity and retrieved wind and its impact on the forecasting of tropical cyclone Chanthu (2010)[J]. Meteor Mon,42(6):649-663(in Chinese).

闵锦忠,陈杰,王世璋,等,2011. WRF-EnSRF 同化系统的效果检验及其应用[J].气象科学,31(2):135-144. Min J Z,Chen J,Wang S Z,et al,2011. The tests of WRF-EnSRF data assimilation system and its applications in storm scale events[J]. J Meteor Sci, 31(2):135-144(in Chinese).

邱学兴,Zhang Fuqing,2016. EnKF 同化雷达资料对一次极端局地强降水事件预报影响及其可预报性分析[J].中国科学:地球科学,46(1):27-42. Qiu X X,Zhang F Q,2016. Prediction and predictability of a catastrophic local extreme precipitation event through cloud-resolving ensemble analysis and forecasting with Doppler radar observations[J]. Sci China:Earth Sci,46(1):27-42(in Chinese).

曲晓波,张建忠,2009. 2009 年中国主要灾害性天气事件概述[C]// 2009 第六届全国灾害性天气预报技术研讨会. 北京. Qu X B, Zhang J Z,2009. Summary of major disastrous weather events in China in 2009[C]// 2009 Sixth National Seminar on Disastrous Weather Forecasting Technology. Beijing(in Chinese).

孙建华,郑淋淋,赵思雄,2014.水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J].大气科学,38(4):742-755. Sun J H,Zheng L L,Zhao S X,2014. Impact of moisture on the organizational mode and intensity of squall lines determined through numerical experiments[J]. Chinese J Atmos Sci,38(4):742-755(in Chinese).

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 X Y,Liu L P, Zheng G G, 2006. Numerical experiment of assimilation of Doppler radar data with an ensemble Kalman filter[J]. Chinese J Atmos Sci,30(4):712-728(in Chinese).

张宁,苏爱芳,史一丛,2017. 2014 年一次飑线的发展维持原因分析[J].气象,43(11):1383-1392. Zhang N,Su A F,Shi Y C,2017. Causation analysis of evolution of a squall line in 2014[J]. Meteor Mon,43(11):1383-1392(in Chinese).

Aksoy A,Dowell D C,Snyder C,2009. A multicase comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part I:storm-scale analyses[J]. Mon Wea Rev,137(6):1805-1824.

Aksoy A,Dowell D C,Snyder C,2010. A multicase comparative assessment of the ensemble Kalman filter for assimilation of radar observations. Part II: short-range ensemble forecasts[J]. Mon Wea Rev,138(4):1273-1292.

Barker D M,Huang W,Guo Y R,et al,2004. A three-dimensional variational data assimilation system for MM5: implementation and initial results[J]. Mon Wea Rev,132(4):897-914.

Hong S Y,Dudhia J,Chen S H,2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation[J]. Mon Wea Rev,132(1):103-120.

Hu M,Xue M,Brewster K,2004. 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):699-721.

Meng Z Y,Zhang F Q,2007. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part II:imperfect model experiments[J]. Mon Wea Rev,135(4):1403-1423.

Meng Z Y,Zhang F Q,2008a. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part III:comparison with 3DVAR in a real-data case study[J]. Mon Wea Rev, 136(2):522-540.

Meng Z Y,Zhang F Q,2008b. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part IV:comparison with 3DVAR in a month-long experiment[J]. Mon Wea Rev,136(10):3671-3682.

Noh Y,Cheon W G,Hong S Y,2003. Improvement of the K-profile model for the planetary boundary layer based on large eddy simulation data[J]. Bound Layer Meteor,107:401-427.

Skamarock W C,Klemp J B,Dudhia J,et al,2005. A description of the advanced research WRF version 2[Z]. NCAR Tech Note NCAR/TN-4681STR:19.

Takemi T,2006. Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions[J]. Atmos Res,82(1/2):37-54.

Takemi T,2007a. A sensitivity of squall-line intensity to environmental static stability under various shear and moisture conditions[J]. Atmos Res,84(4):374-389.

Takemi T,2007b. Environmental stability control of the intensity of squall lines under low-level shear conditions[J]. J Geophys Res, 112(D24):D24110.

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

Zhang F Q,Meng Z Y,Aksoy A,2006a. Tests of an ensemble Kalman filter for mesoscale and regional-scale data assimilation. Part I:perfect model experiments[J]. Mon Wea Rev,134(2): 722-736.

Zhang F Q,Odins A M,Nielsen-Gammon J W,2006b. Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event[J]. Wea Forecasting,21(2):149-166.

Zhang F Q,Snyder C,Sun J Z,2004. Impacts of initial estimate and observation availability on convective-scale data assimilation with an ensemble Kalman filter[J]. Mon Wea Rev,132(5): 1238-1253.

Zhang F Q,Weng Y H,Sippel J A,et al,2009. Cloud-resolving hurricane initialization and prediction through assimilation of doppler radar observations with an ensemble Kalman filter[J]. Mon Wea Rev,137(7):2105-2125.

Zheng L L,Sun J H,Zhang X L,et al,2013. Organizational modes of mesoscale convective systems over Central East China[J]. Wea Forecasting,28(5):1081-1098.