

李少英, 张述文, 毛伏平, 等. 2017. 采用不同样本集合同化地面观测对一次飑线过程的影响 [J]. 大气科学, 41 (2): 236–250. Li Shaoying, Zhang Shuwen, Mao Fuping, et al. 2017. Influence of assimilating surface observations on a squall line with different ensembles. [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (2): 236–250, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15298.

采用不同样本集合同化地面观测对一次 飑线过程的影响

李少英¹ 张述文¹ 毛伏平² 李彦霖¹

¹ 兰州大学大气科学学院/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 兰州 730000

² 中国人民解放军 94923 部队, 福建省武夷山 354300

摘 要 针对夏季黄淮地区一次飑线过程, 利用 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式及其 Hybrid ETKF-3DVAR 同化系统, 考察不同生成方案的样本对同化地面观测的影响。集合样本创建方式包括 3 类: 扰动初始背景场的方案 (RCV)、使用不同的物理参数化方案 (PPMP) 以及前两者集成方案 (BLE)。基于增量场分析, 同化地面观测主要调整 850 hPa 以下水平风和水汽混合比的空间结构, 其中 RCV 方案侧重于改变水平风的空间分布, PPMP 方案侧重于改变水汽混合比的空间结构, BLE 方案兼具二者特征。同化地面观测可以间接改善 6 h 降水预报, 其中 PPMP 试验的降水预报最好, 尤其是对降水位置和强度的预报。对比雷达回波观测, RCV 试验和 BLE 试验对弓状回波模拟得较好, BLE 试验的模拟较多体现 RCV 特征。PPMP 试验和 RCV 试验还可改变冷池的位置和强度, 同时影响飑线出现和消亡时间, 相对而言, PPMP 试验影响更大。

关键词 样本生成方案 地面观测 混合同化 中尺度模式 WRF 飑线

文章编号 1006-9895(2017)02-0236-15

中图分类号 P435

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.15298

Influence of Assimilating Surface Observations on a Squall Line with Different Ensembles

LI Shaoying¹, ZHANG Shuwen¹, MAO Fuping², and LI Yanlin¹

¹ Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster of Gansu Province/College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Unit 93868, People's Liberation Army, Wuyishan, Fujian 354300

Abstract The Weather Research and Forecasting (WRF) model with the hybrid ETKF-3DVAR (ensemble transform Kalman filter-three-dimensional variational data assimilation) data assimilation system is used to investigate the impact of different ensemble generation schemes on a squall line forecast in the Huanghe–Huaihe region in the summer by assimilating the surface observations. Ensembles are created in three different ways—by using the different initial ensemble samples (RCV), by using different model physical process schemes (PPMP), and by combining the first two

收稿日期 2015-11-11; **网络预出版日期** 2016-06-20

作者简介 李少英, 女, 1990 年出生, 博士研究生, 从事资料同化和强对流天气数值模拟的研究。E-mail: lishyi2009@lzu.edu.cn

通讯作者 张述文, E-mail: zhangsw@lzu.edu.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430102, 国家自然科学基金项目 41575098, 高等学校博士学科点专项科研基金项目 20120211110019

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB430102), National Natural Science Foundation of China (Grant 41575098), Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant 20120211110019)

ensembles (BLE). Based on the increments of model states, assimilating the surface observations mainly adjusts the spatial structures of wind and water vapor mixing ratio below the level of 850 hPa; the RCV scheme mainly updates the wind distribution, the PPMP scheme updates the water vapor mixing ratio, and the BLE scheme has the characteristics of both RCV and PPMP. Assimilating surface observations can also improve 6-h precipitation forecasts, and the PPMP scheme can give a relatively better performance compared to PPMP and BLE, especially for the prediction of rainfall location and intensity. RCV and BLE schemes present a better simulation for the bow echo, and the performance with BLE is similar to that with RCV. PPMP and RCV schemes can adjust the position and intensity of the cold pool, and also influence the times of appearance and disappearance of the squall line. Generally, PPMP scheme has a greater impact on the squall line than RCV and BLE.

Keywords Ensemble generation scheme, Surface data, Hybrid data assimilation, Mesoscale model WRF, Squall line

1 引言

飑线是指呈带状或线状排列的强对流天气系统。其水平尺度长约几十千米至几百千米、宽约几十千米至一百千米,可以维持几个小时到十几个小时,发生时常伴随大风、雷电、冰雹或龙卷等灾害性天气(李娜等, 2013)。因为飑线内部含有若干小尺度的对流单体,利用常规天气观测资料难于对其内部结构进行诊断分析,因此近年来主要通过借助于高分辨模式输出结果(Parker and Johnson, 2004a, 2004b; 沈杭锋等, 2010; 梁建宇和孙建华, 2012)或雷达等高分辨率观测(潘玉洁等, 2008; Bryan and Parker, 2010; 孙虎林等, 2011)对飑线的发生发展演变机制进行研究。随着同化技术的发展,越来越多的研究是在模式中同化观测资料对飑线进行模拟分析(如,李娜等, 2013; Sun and Wang, 2013; 秦琰琰等, 2014)。雷达资料时空分辨较高,已有大量研究显示同化雷达资料可以明显改善强对流天气的时空演变(如,兰伟仁等, 2010a, 2010b; 曹倩等, 2016),但受地形或雷达仰角影响,低层观测经常缺失,同时在没有降水或强风时,雷达资料的使用也受限,此时用地面站资料可能是一个很好的替代方案(Hacker and Snyder, 2005),因为其包含飑线过境信息,如温度和风场的剧烈变化(Dong et al., 2011; Meng et al., 2013),因此同化地面观测有可能改进低层大气状态,进而改善强对流系统的预报效果。

同化地面观测已有不少研究工作(如, Fujita et al., 2007; Meng and Zhang, 2008; Ancell et al., 2014; Ha and Snyder, 2014; Zhang and Pu, 2014; Sobash and Stensrud, 2015; Zhang et al., 2015),这些研究均有指出同化地面观测可部分改善模拟效果,但以上研究主要采用 3DVAR 和 EnKF 等同化方法,其中,

3DVAR 方法假设背景误差协方差是静态的且空间均匀和各向同性; EnKF 的背景误差协方差是通过集合成员短期预报估计得到,可提供流依赖特征,但对集合样本的选取要求很高。混合同化方案是二者的结合,在原有变分框架下,吸收具有流依赖特征的集合样本误差协方差的信息;当集合成员数很小或模式误差较大时,混合方法的同化效果可能优于其中单一方案(Wang et al., 2007, 2008b)。

混合方法同集合卡曼滤波一样需要给定初始集合样本,尤其是对飑线这类快速发展的中尺度对流系统,空间结构合理且动力协调的初始样本对有效吸收观测信息非常重要。虽然全球尺度的集合样本生成方法较多,如奇异向量法(Molteni et al., 1996)、随机扰动法(Houtekamer and Derome, 1995)、增长繁殖模式(Toth and Kalnay, 1993, 1997)和基于多元正交函数扰动方案(Zheng and Zhu, 2010)等,但这些方法是否适用于中尺度对流系统尚不清楚。此外,像飑线等快速发展并经常伴随雷暴大风的强对流系统,要做出准确预报非常困难,原因一是很难为模式提供精确的、高分辨率的初始场,二是模式中虽然有多种可供选择的物理过程(参数化)方案,但每一种方案都有不完善之处,很难选出一个合适的方案。以往集合同化研究主要关注初始场误差对预报误差的贡献,对物理过程不完善引起的预报误差关注较少(Romine et al., 2014; Schwartz et al., 2014; Schwartz and Liu, 2014)。但是,正如上面分析,模式预报误差不仅来源于初始场的不准确,而且也与物理过程方案不完善有关,尤其是与强对流系统演化直接相关的水热等物理过程。因此,要为混合同化系统背景场提供真实的背景误差协方差阵,不仅要考虑初始场误差的演变,而且还应包括物理过程不完善引起的预报误差,但目前这方面研究工作很少,具体效果值得深

入探究。

基于前面分析,本文从生成背景场误差协方差阵的不同方案出发,分别选用三类样本生成方案来构建背景场误差协方差阵:第一类是先在初始场上添加扰动,再运行一段时间动力协调后得出样本集合;第二类从相同初始场出发但采用不同物理参数化方案来生成样本集合;最后一类为上述两种方案样本的组合。具体将通过同化地面观测对一次飊线天气过程预报的影响,以及对比同化后不同方案的状态增量的空间分布特征,来间接说明不同方案样本间的差异和特点,同时重点考查对降水以及飊线位置和强度预报的影响。

2 个例简介

2.1 天气概况

2009年6月3~5日黄淮地区出现了连续3天的强对流天气,其中,5日安徽、江苏、上海地区出现了自北向南的飊线系统,发生了大风、雷电、雷雨、短时强降水、冰雹等强对流灾害性天气。安徽全省有43个县市、228个乡镇出现八级以上大风,另淮南、怀远分别出现直径为8 mm和10 mm冰雹;江苏全省陆上出现7~11级(淮安市楚州区达 31 m s^{-1})大风,25个台站出现冰雹,最大直径为50 mm(丰县),据自动气象站统计,有2站雨量在50 mm以上,徐州市沛县在16:30(北京时,下同)左右

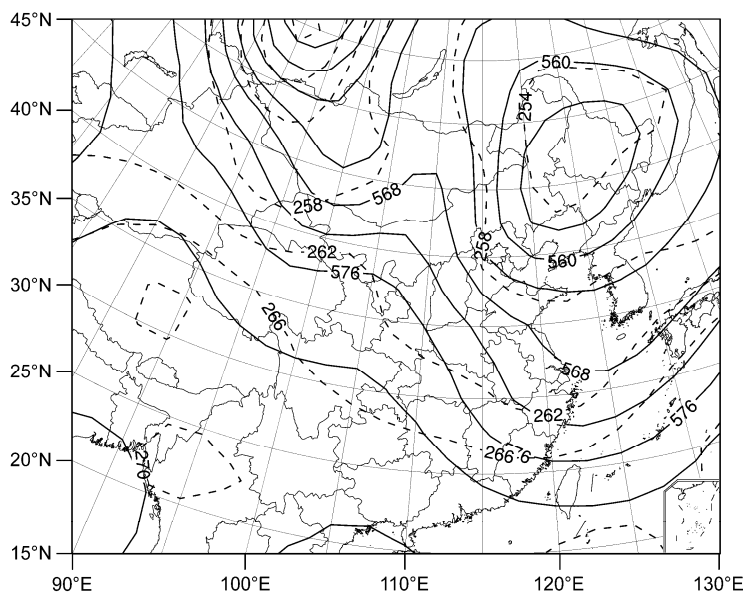
出现了30年未遇的龙卷风,风力高达12级以上;上海市徐家汇出现直径为25~30 mm冰雹(15:35左右),小洋山出现最大为 23.0 m s^{-1} (9级)的大风。此次强对流天气影响严重,出现房屋倒塌,多辆轿车被冰雹砸坏,多人受伤,甚至人员伤亡,给人民的生命财产造成了重大的损失。

2.2 形势场

强对流天气发生之前,2009年6月5日08:00,500 hPa(图1)亚欧大陆中高纬度大气环流形势为“两槽一脊”,两槽分别位于西西伯利亚和我国东北、华北、华东地区,高压脊位于蒙古高原、河套地区,而位于华东的大槽是在东北冷涡的影响下形成的。其中,江苏省、安徽省、上海市等华东北部地区同时处在冷涡底部槽底附近和大槽槽后,由西北气流控制。由图1分析可知等温线与等高线不重合,等温线稍落后于等高线,此种配置有利于槽脊发展。随着东北冷涡加强,不断有干冷空气随西北气流南下,700 hPa华东北部仍受西北气流控制,但850 hPa为暖区控制,这种中高层干冷、低层暖湿的配置为此次飊线系统提供了有利的外部环境。

2.3 雷达观测

从雷达组合反射率因子演变可见,14:00在江苏省中部和山东省出现强回波区,并于15:00首尾相连成弓状,其中包含多个回波强度大于55 dBZ



的单体(图 2a); 此时, 上海市嘉定区也有一个雷暴单体产生, 并降下大冰雹。15:30 强回波区分成南北两部分, 其中北部强回波区向西南移动, 15:48

在盐城和 16:24 (图 2b) 在淮安出现超 60 dBZ 强回波区, 受此影响, 淮安等地出现冰雹和大风; 南部强回波区向东南移动发展, 横扫上海地区, 并于

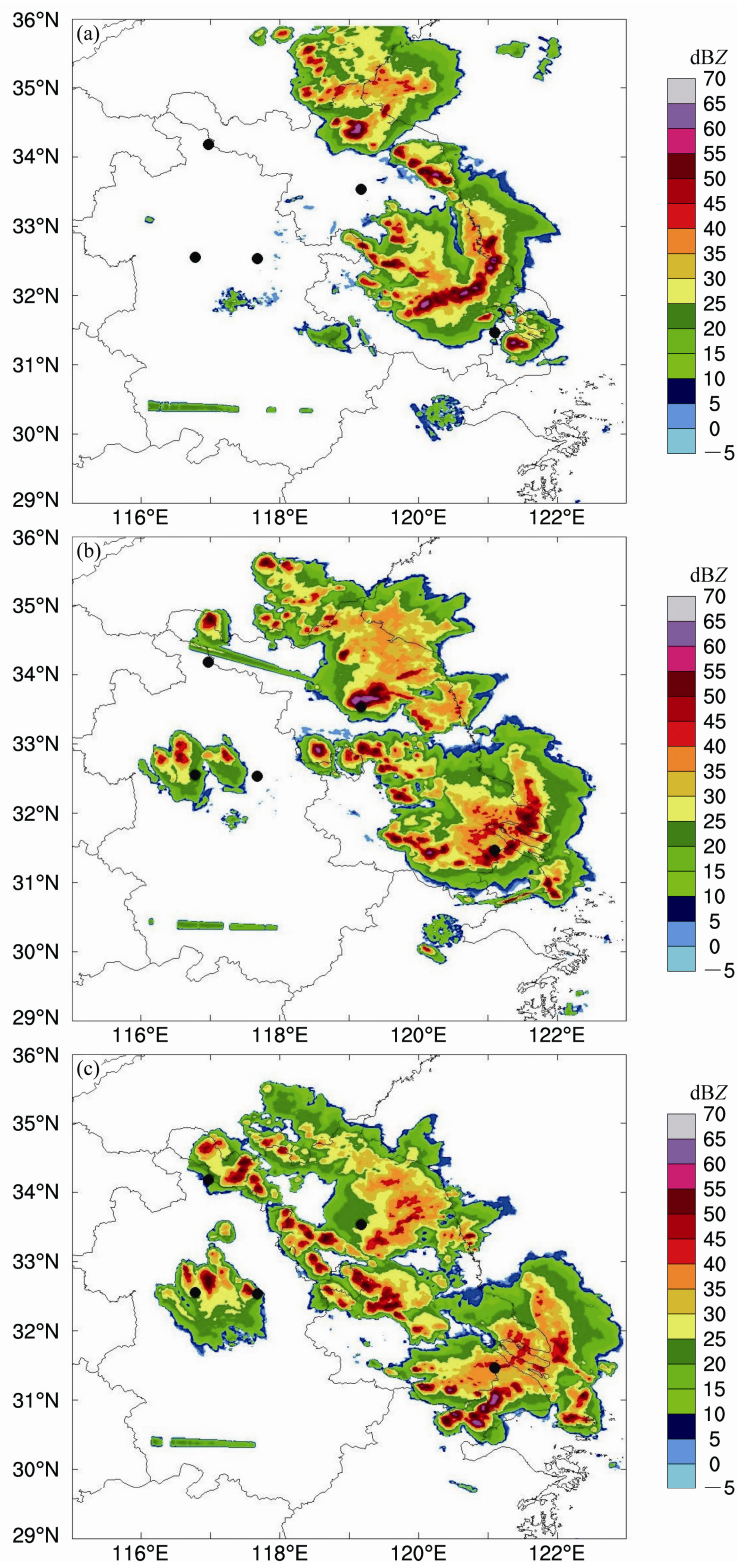


图 2 2009 年 6 月 5 日雷达组合反射率因子: (a) 15:00; (b) 16:24; (c) 17:12

Fig. 2 Radar composite reflectivity factors at (a) 1500 BJT, (b) 1624 BJT, and (c) 1712 BJT on 5 June 2009

17:12 与北部回波区再次相连 (图 2c)。17:18 再次出现多个超 55 dBZ 的单体, 此后南部回波区向东南移动, 北部回波区向西南移动, 到 19:48 强度逐渐减弱。

飊线系统一般会产生大风、冰雹等灾害性天气, 但如此次在上海出现强降雹及其后续强对流天气并不多见 (戴建华等, 2012)。针对此次过程, 郑媛媛等 (2014) 研究了东北冷涡的影响, 袁招洪 (2015) 研究了不同分辨率和微物理方案对阵风锋模拟的影响, 本文将通过同化地面站观测来改进初始场, 提升模拟场的真实性, 然后再进行比较分析。

3 试验方案

3.1 同化系统

本文选用中尺度模式 ARW WRF3.5.1 及其同化系统 Hybrid ETKF-3DVAR3.5 (Wang et al., 2008a, 2008b)。采用 3 重嵌套 (图 3), 水平格点数分别为 91×73 、 73×73 和 115×115 , 对应网格距 60 km、20 km 和 6.7 km, 3 重区域均进行数据同化及模拟

预测。垂直层数为 30, 顶层气压为 50 hPa。物理参数化方案设置如下: 3 重区域微物理过程为 Lin 方案, 短波辐射采用 Dudhia 方案, 长波辐射选择 RRTM 方案, 近地面层选择 Monin-Obukhov 方案, 陆面模式采用 RUC 模式, 边界层为 YSU 方案, 最外两层积云对流参数化方案为 BMJ 方案, 第 3 重关闭。初边界条件由时间间隔为 6 h、分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的 NCEP FNL 分析资料提供。

3.2 样本集合生成方案

第 1 组 40 个初始扰动样本生成方案选自 WRF-3DVAR 同化系统自带的 Random_CV (Baker et al., 2004; Baker, 2005), 扰动样本是由一组均值为 0、标准差为 1 的高斯正态分布的控制变量 (CV) 经 3 次变换 (包括水平向的递归滤波、垂向的经验正交函数 (EOF) 分解以及最后转换成实际物理量) 得来, 近似满足由气候态得出的背景场误差协方差, 而最终的 40 个初始样本是把 40 个扰动样本分别添加到由 NCEP FNL 分析资料提供的初始背景场上得到。初始扰动只对 D1 区域进行, 内层

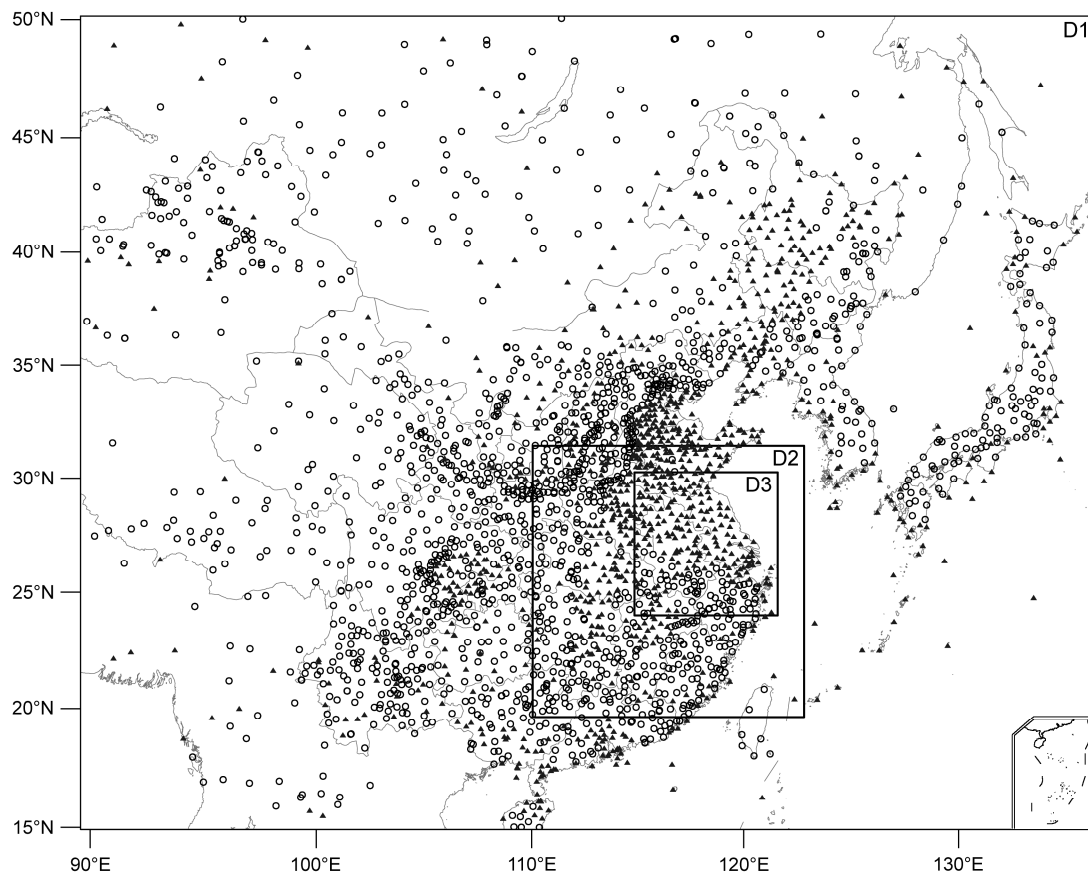


图 3 模拟区域及地面观测站点分布, 空心圆表示剔除站点, 黑色三角形表示被同化站点

Fig. 3 The simulation domain and distribution of surface observation stations, the hollow circles denote rejected stations, the black triangles denote assimilated stations

未进行扰动。在同化前为了使样本与模式间动力协调，要 spin-up 6 小时至同化时刻。采用第 1 类方案进行的同化试验简称 RCV 试验。

第 2 组 40 个集合成员是同一初始场在模式向前积分过程中采用 40 组不同物理参数化方案的组合产生的。采用的物理参数化有常见的积云对流、陆面过程、微物理过程以及边界层参数化方案，组合原则是：分别采用不同组合进行模拟预测，选择预报的降水分布较符合实况且强降水区分布不同的模拟场为集合成员。此种方案初始场也是由 NCEP FNL 分析资料提供，spin-up 6 小时生成同化时刻集合成员。采用第 2 类方案进行的同化试验简称 PPMP 试验。

第 3 组集合则由前 2 组集合成员融合组成，共 80 个成员，采用此方案进行的同化试验简称 BLE 试验。试验发现 40 个样本已足够大，再增加样本数对同化结果几乎无影响，即 40 个样本的同化结果与 80 个样本的无差别，因此本文就将具有不同样本数的三类试验放在一起进行比较，具体特征见表 1。

表 1 不同样本集合同化的比较

Table 1 Comparison among different ensembles

同化试验 名称	样本生成方案	6 月 5 日 14:00 是 否同化地面观测	集合样 本数
RCV 试验	Random_CV 扰动方法	是	40
PPMP 试验	不同物理参数化方案 的组合	是	40
BLE 试验	RCV 试验成员+PPMP 试验成员	是	80

3 组同化试验均在 6 月 5 日 14:00 开始同化地面观测，然后利用同化后的分析场作为该时刻的模式初始场，预报 18 小时，至 6 日 08:00。另外，为了对比同化效果，还有一组控制试验 CTRL，即不进行任何同化，初始场也由 6 月 5 日 14:00 的 NCEP FNL 分析资料提供，同样预报 18 小时。

同化观测数据为常规地面站观测，包括 10 m 风 u 、 v 分量，2 m 温度 T 和露点温度 T_d ，以及地面气压 p 。当观测站点海拔高度与模式最底层高度差异大于 100 m 或状态更新量大于观测误差 5 倍时不同化。

3.3 权重因子和局地化尺度

ETKF-3DVAR 混合同化方案有两个待定参数，一个是反映静态背景误差协方差与基于集合的误差协方差相对重要性的因子 β ，另一个是局地化尺

度因子 S (Wang et al., 2008a)。两个因子的取值是采用经验方法，具体通过判断分析增量场的合理性来确定(Li et al., 2012)。我们分别选取 $1/\beta=1.0、0.8、0.5、0.2、0$ 以及 $S=10\text{ km}、20\text{ km}、40\text{ km}、60\text{ km}$ 和 80 km 进行组合试验，发现当 $1/\beta=0.5$ 和 $S=20\text{ km}$ 时，增量场的分布相对最合理。本文后续试验都采用 $1/\beta=0.5$ 和 $S=20\text{ km}$ 。

4 结果分析

4.1 分析增量

4.1.1 水平分布

图 4 为 3 组同化试验在 D3 区模式最底层的分析增量场（分析场减去背景场）。水汽混合比增量在 D3 区域北部均是正值，南部是负值。具体来说，RCV 试验的空间分布比较均匀，仅在江苏省和山东省交界处有一个弱的正值中心（小于 4 g kg^{-1} ）（图 4a）；而 PPMP 试验的空间分布结构明显，在山东省西南部、河南省东南部和安徽省中东部有 3 个正值中心（均大于 5 g kg^{-1} ），而在浙江省北部有一个负值中心（小于 -4 g kg^{-1} ）（图 4b）；对于 BLE 试验，正分析增量空间结构较 RCV 试验的明显，但弱于 PPMP 试验，在河南省东南部有一个大于 4 g kg^{-1} 的中心值，安徽省天长市和江苏省盐城市附近各出现一个大于 3 g kg^{-1} 弱的正中心值，而负分析增量范围较 RCV 试验的范围更小、强度更弱（图 4c）。

对于水平风场，RCV 试验的结构特征明显，大于 3 m s^{-1} 的分布出现在河南省中东部的商丘，以及由江苏省东北部经盐城到泰州和杭州再到上海的带状区内；PPMP 试验的增量则没有明显的区域特征，只在河南省东南部、上海、杭州附近大于 3 m s^{-1} ；BLE 试验的分布特征与 RCV 试验的相似，但是整体的增量分布范围和强度均弱于 RCV 试验的。浙江省北部和江苏省中南部的水平风速分析增量将会使飑线系统向西北移动增强。

整体来看，RCV 试验对水平风场调整较多，而 PPMP 试验对水汽场的改变非常明显，BLE 试验兼具二者特征。

4.1.2 垂直分布

图 5 是 3 组试验分析增量沿图 4 中黑线的剖面分布。3 组试验的水汽混合比和水平风速增量基本都分布在 840 hPa 以下。RCV 试验（图 5a）和 BLE 试验（图 5c）在 122.2°E 左右均存在风速大于 6 m s^{-1} 的高值中心，RCV 试验还在 119°E 和 121.3°E 存在

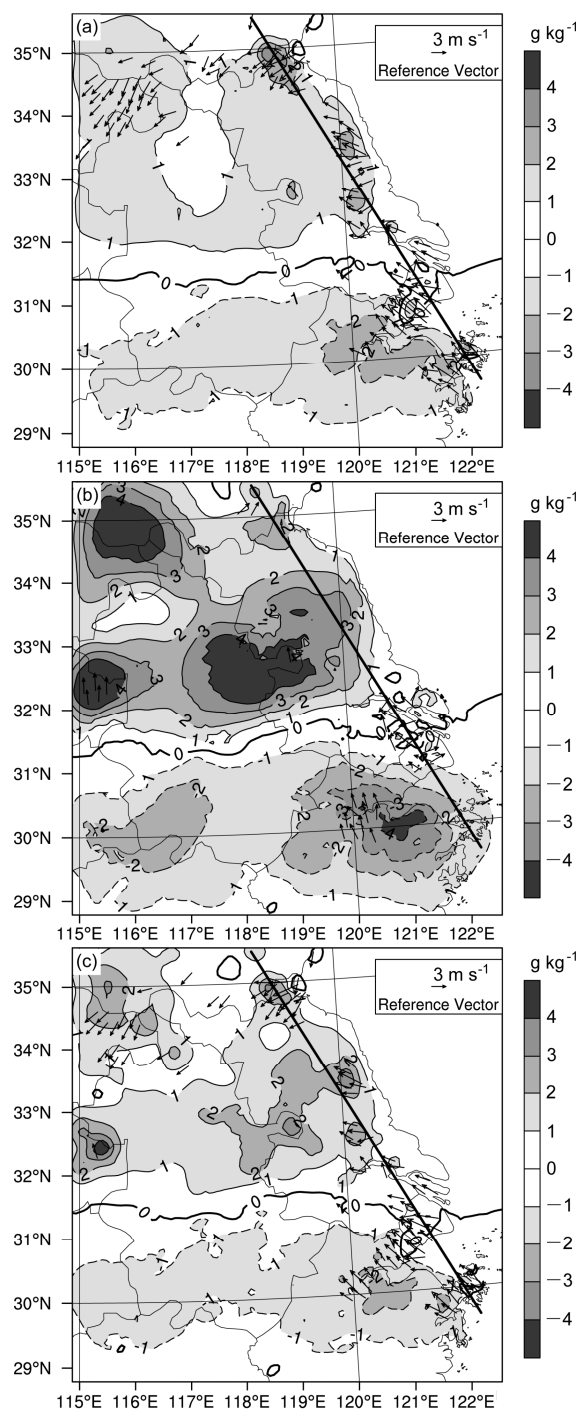


图4 (a) RCV 试验、(b) PPMP 试验、(c) BLE 试验对应的最底层的水汽混合比增量(阴影, 单位: g kg^{-1}) 和不少于 3 m s^{-1} 的水平风速增量(箭头)在 D3 区水平分布。黑线表示图 5 中剖面位置

Fig. 4 Analysis increments of water vapor mixing ratio (shaded, units: g kg^{-1}) in (a) RCV (the different initial ensemble samples) experiment, (b) PPMP (the different model physical process schemes) experiment, and (c) BLE (combining the first two ensembles) experiment at the lowest model level in region D3. Arrows indicate horizontal wind speed increments larger than 3 m s^{-1} , the black line represents the location of cross section in Fig. 5

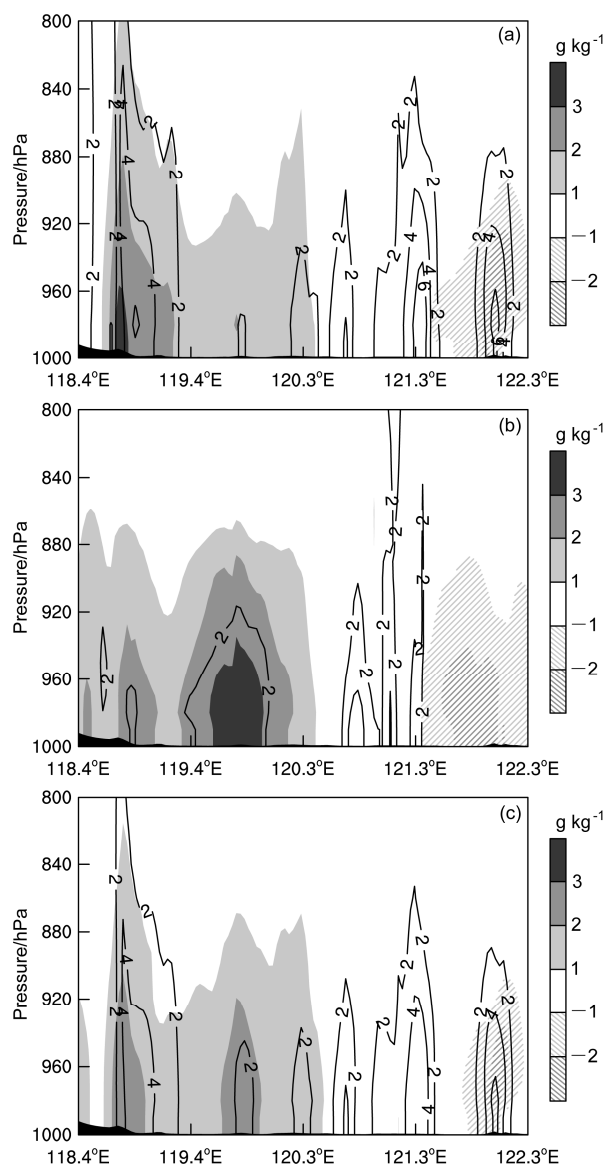


图5 (a) RCV 试验、(b) PPMP 试验、(c) BLE 试验导出的水汽混合比(阴影, 单位: g kg^{-1}) 和水平风速(等值线, 间隔: 2 m s^{-1}) 分析增量沿图 4 黑线的剖面

Fig. 5 Cross sections (along black lines in Fig. 4) of analysis increments of water vapor mixing ratio (shaded, units: g kg^{-1}) and horizontal wind speed (contoured interval 2 m s^{-1}) in (a) RCV experiment, (b) PPMP experiment, and (c) BLE experiment

另两个大于 6 m s^{-1} 的高值中心, 但 BLE 试验在此两处为大于 4 m s^{-1} 的高值中心, 而 PPMP 试验(图 5b)只在 121°E 左右有一个大于 4 m s^{-1} 的风速中心。由于飊线外观呈弓状, 虽然 3 组试验风速增量的高值中心经度位置不同, 但均位于飊线系统之后。针对水平风, BLE 试验与 RCV 试验的增量场相似, 增量值均较 PPMP 试验的大; 针对水汽混合比, 3 组试验的正增量范围总体区别不大, 但大值区的分

布并不重合，负增量的分布范围及中心值均存在差别，其中 PPMP (BLE) 试验的最大(小)。

总之，同化地面观测可以明显调整 850 hPa 左右以下的水平风和水汽混合比的空间分布，具体改善飑线系统后的中低层水平风场和湿度场。

4.2 样本的离散度与其模拟组合反射率的误差

样本离散度是集合成员与样本均值间平均距离的一种度量；当离散度与模式预报误差的量阶一致时，构建的样本比较合理 (Zhang et al., 2011, 2013)。由于不知道气象要素场的真值，下面将通过比较同化前的样本离散度与由样本模拟组合反射率的误差，来间接评估不同生成方案样本间的差异。对比发现，RCV、PPMP 和 BLE 试验对应的雷达组合反射率误差主要分布在江苏省和山东省交界处、安徽省中部、江苏省中西部、浙江省北部地区。此外，RCV 试验和 BLE 试验在江苏省中东部地区也有误差分布 (图略)。

由于分析增量高值区出现在模式底层，所以以模式第一层的离散度为例进行对比分析。首先，对比水汽混合比样本离散度的空间分布，RCV 试验中高值区主要分布在飑线附近 (图 6a)，而 PPMP 试验则几乎覆盖 D3 区 (图 6b)，二者差异明显；BLE 试验与 PPMP 试验相似，也几乎覆盖 D3 区域但离散值较小 (图 6c)。考虑到 RCV 试验中高值区与对应样本均值模拟组合反射率的误差分布较一致，而 PPMP 和 BLE 试验在飑线外出现大片虚假高值区，因此 RCV 试验构建的水汽混合比样本空间结构较合理。其次，分析风速样本离散度 (图略)，RCV 试验在飑线附近以及安徽省北部出现高值区，PPMP 试验的高值主要分布在飑线附近，BLE 试验与 RCV 试验的高值区分布相一致，不过强度较弱。对比样本均值模拟组合反射率的误差空间分布，PPMP 试验的离散度与其分布较一致，因此 PPMP 试验构建的风场样本空间结构较合理。

综上，RCV 试验和 PPMP 试验构建的状态量样本空间分布差异明显，尤其是湿度场。根据同化理论，样本离散度的高值区对应状态量更易“吸收”观测信息，这也解释了 RCV 试验对风场的调整较多，而 PPMP 试验对水汽场的改变很大，BLE 试验介于二者之间。

4.3 降水

采用 Wernli et al. (2008) SAL 方法评价 6 h 降水的预报效果，该方法是从雨带和其内部结构两个

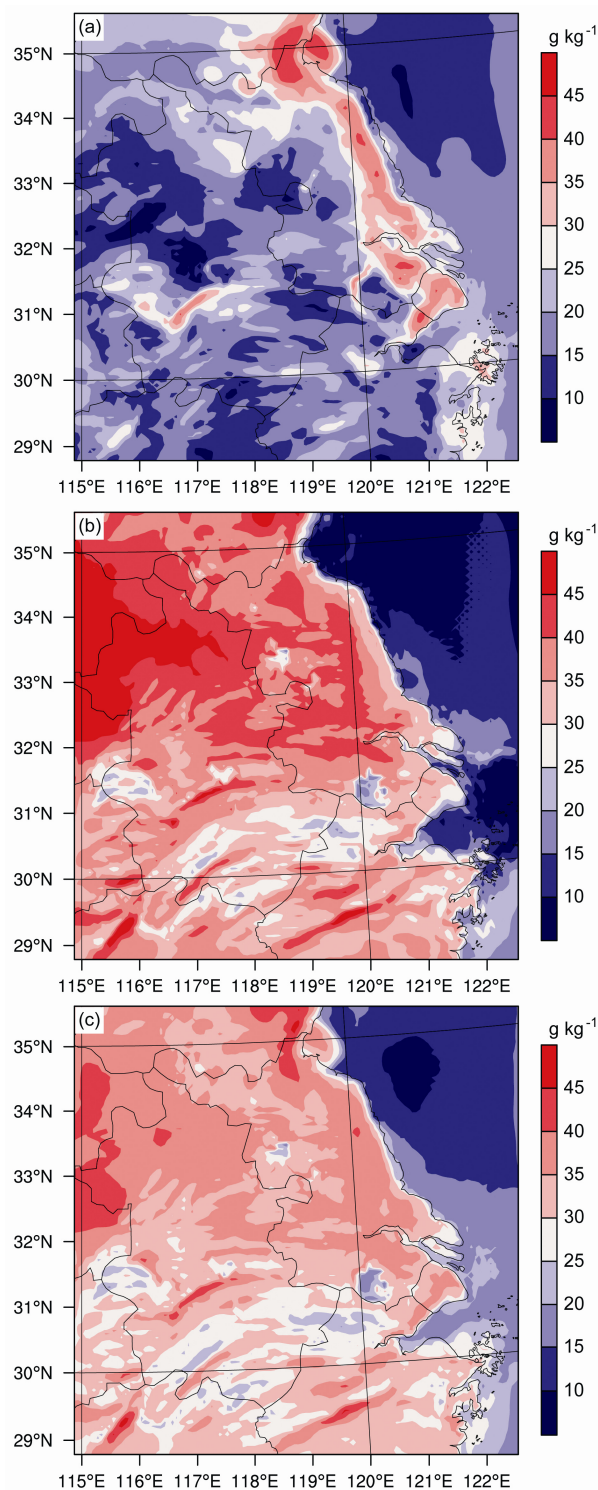


图 6 (a) RCV 试验、(b) PPMP 试验、(c) BLE 试验同化前模式第 1 层水汽混合比样本的离散度 (单位: g kg^{-1}) 在 D3 区分布

Fig. 6 Ensemble spreads for water vapor mixing ratio (units: g kg^{-1}) at the lowest model level in region D3 before data assimilation: (a) RCV experiment; (b) PPMP experiment; (c) BLE experiment

方面对雨带的强度 (amplitude, 简称 A)、位置 (location, 简称 L)、结构 (structure, 简称 S) 分

别检验。A 和 L 的取值范围分别为 $[-2, 2]$ 、 $[0, 2]$ ，其中 $A > 0$ (< 0) 表示预报强度较实况偏强 (弱)，A 值越接近于 0，预报强度越接近于实况。L 值越接近 0，表示预报降水与实况降水位置越接近。S < 0 说明相对实况降水预报范围偏小或降水中心预

报值偏大，或两情况同时存在，反之 $S > 0$ 。

具体比较时，将 6 h 实况和模拟降水统一插值到 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ 的网格点，无实况的降水格点不参与比较。图 7 是 SAL 检验结果。从结构 S 来看，4 组试验结果均小于 0，结合图 8，RCV 试验预报的雨

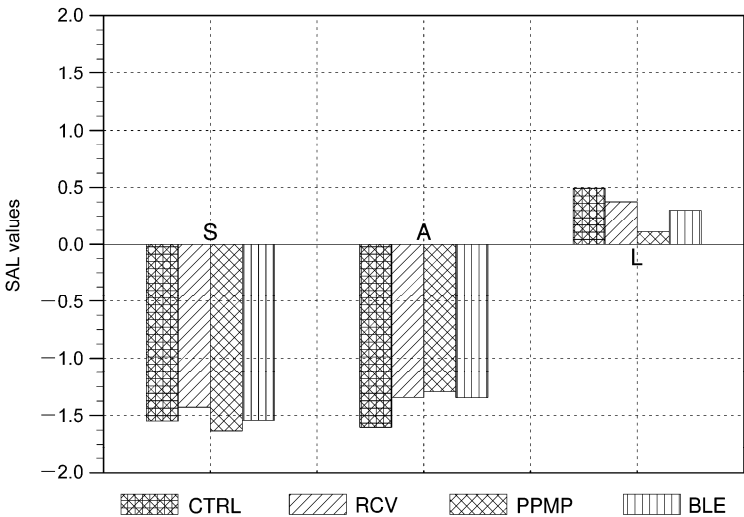


图 7 4 组试验 (CTRL 试验、RCV 试验、PPMP 试验、BLE 试验) 的 SAL 评分
Fig. 7 SAL (structure, amplitude, location) values in CTRL, RCV, PPMP, and BLE experiments

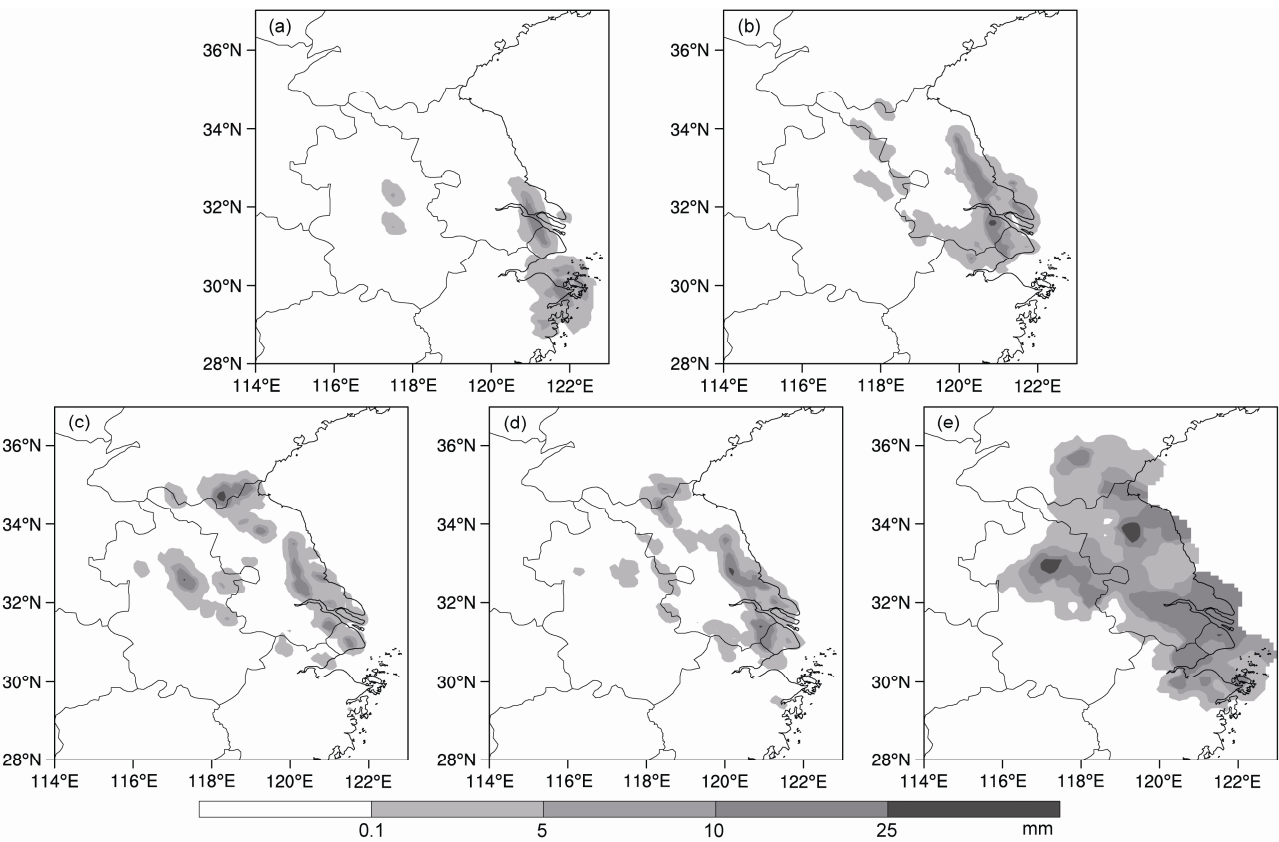


图 8 6 月 5 日 6 h (14:00 至 20:00) 累计降水量 (单位: mm) 比较: (a) CTRL 试验; (b) RCV 试验; (c) PPMP 试验; (d) BLE 试验; (e) 实况
Fig. 8 6-h (1400 BJT to 2000 BJT) accumulated precipitation on 5 June from (a) CTRL experiment, (b) RCV experiment, (c) PPMP experiment, (d) BLE experiment, and (e) observations

带结构与实况最接近，而 PPMP 试验的最差。从强度 A 来看，4 组试验结果均小于 0，甚至小于-1，这说明降水强度预报均较实况明显偏弱；相比而言，PPMP 试验与实况最接近，CTRL 试验最差。从位置 L 来看，PPMP 试验与实况位置最接近，BLE 试验次之，CTRL 试验最差。

下面具体比较 6 月 5 日 14:00 至 20:00 6 h 累计降水量的空间分布（图 8）。4 组试验的降水范围及强度均小于实况，其中 PPMP 试验降水预报效果最好，尤其是雨带位置，CTRL 试验最差，其雨带位置明显偏南。对山东省和江苏省交接处的降水，RCV 试验没有预报出来，PPMP 试验虽预报出来但降水中心偏南，BLE 试验也预报出来，但是降水强度和范围均远小于实况。对安徽省中部的降水，RCV 试验的预报量明显偏小、范围也小，BLE 试验与 RCV 试验类似，而 PPMP 试验预报效果最好。对江苏省北部的降水中心，BLE 试验和 PPMP 试验均预报出，但范围及强度均弱于观测，而 RCV 试验没有预报出。对江苏省南部和上海市的降水，3 组同化试验的降水范围及中心均明显弱于观测，其中 PPMP 试验预报效果最差。由此可知，相对于控制试验，3 组同化试验对降水预报均有所改善，其中 PPMP 试验表现最好，尤其是对降水位置（L）和强度（A）的预报。

4.4 同化地面观测对飑线位置和强度的影响

首先，比较雷达组合反射率因子。控制试验 14:00 至 15:00 模拟的对流尚未发展起来，到 15:30 仅在上海地区上空出现范围极小且中心强度不到 35 dBZ 的回波区（图 9b），但是经过同化地面观测后，3 组同化试验在 15:30 回波范围明显增大，虽然 10~35 dBZ 的分布范围与雷达观测（图 9a）差距还是很大，但是大值中心明显加强，达 50 dBZ 以上，江苏和上海地区反射率高值区分布得到改善。RCV 试验最大值出现在江苏中北部以及上海（图 9c），而 PPMP 试验最大值出现在山东省南部和上海地区（图 9d）。BLE 试验则集合 RCV 和 PPMP 试验特点，但在江苏省中部地区回波较 PPMP（RCV）试验强（弱）（图 9e）。

到 19:30（图 10），所有试验的组合反射率因子分布与观测差别仍很大，尤其是 10~35 dBZ 的分布范围，但是不同同化试验结果与观测间的差别在减小且强回波区在增大。虽然 RCV 试验和 BLE 试验模拟的回波主体位置均偏西南约 1 个纬度，移动

速度也较实况慢约 2 h，但是带状回波分布被模拟出来，而 CTRL 试验则没有。相对而言，PPMP 试验模拟的回波区与观测差别较大，但是安徽省境内的回波区被模拟出来。

从雷达回波的发展演变来看，同化试验对应的江苏省南部弓形回波向东南移动发展，江苏省北部部分回波则向西南移动发展，但 CTRL 试验只在江苏省南部出现回波并向东南移动，没有将北部回波模拟出来。

图 11 为 6 月 5 日 18:00 3 组试验的 925 hPa 水平风场（因 BLE 试验兼具 RCV 试验和 PPMP 试验特征，故未列入）。近地层飑线前方东南风为主、后方西北风为主，两股气流在飑线发生处汇合，而在 800 hPa 以上为西北气流（图略），这说明垂直风切变的存在。表 2 给出 3 组试验在江苏省南部（ $31.5 \pm 0.06^\circ\text{N}$ ， $120.5 \pm 0.06^\circ\text{E}$ ）区域平均垂直风切。在低层，PPMP 试验的垂直风切变最大，RCV 试验与 CTRL 试验差别较小；在中高层，PPMP 试验最弱，RCV 试验次之。低层风切变强和中高层风切变弱的配置有利于飑线系统的发展（Thorpe et al., 1982）。PPMP 试验在安徽省中部及江苏省北部地区也出现垂直风切变低层强、中高层弱的配置（图 11c）；RCV 试验的风切变在江苏省北部出现，但强度比 PPMP 试验的弱，在安徽省中部并未出现；CTRL 试验的风切变在安徽省中部出现且强度也比 PPMP 试验的弱，而在江苏省北部未出现。这说明 RCV 试验对近地层风的调整较 PPMP 试验小，而 PPMP 试验对对流单体位置的调整较 RCV 试验大。

表 2 6 月 5 日 18:00 3 组试验在江苏省南部飑线中心处的垂直风切变

Table 2 Vertical wind shears near the squall line center in southern Jiangsu Province in CTRL, RCV, and PPMP experiments at 1800 BJT 5 June

气压范围/hPa	垂直风切变/s ⁻¹		
	CTRL 试验	RCV 试验	PPMP 试验
地面~900	0.023	0.021	0.034
850~700	0.008	0.003	0.003
600~350	0.008	0.008	0.006

相当位温 θ 是一个重要的温湿特征参数，从其变化可以看出在飑线演变过程中能量的聚积和释放。图 11 中等值线是 CTRL、RCV 和 PPMP 试验得出的 6 月 5 日 18:00 D3 区模式最底层相当位温，可以发现此次飑线是由几个对流单体组成，小

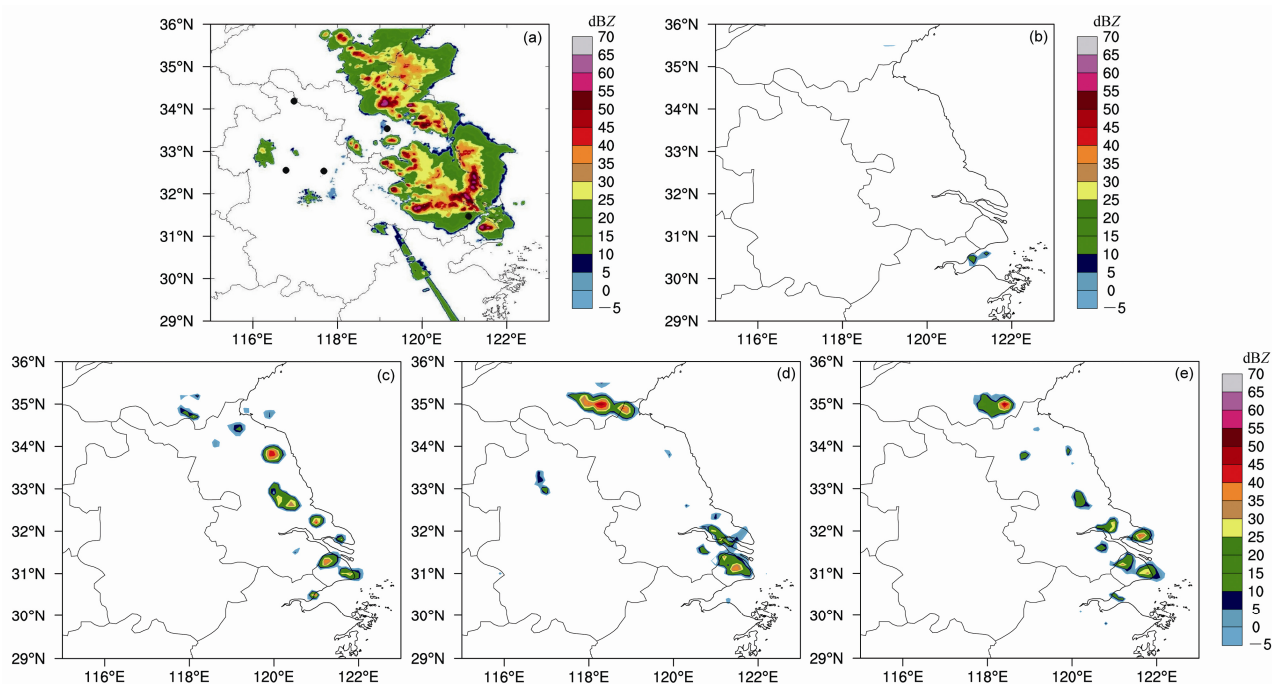


图9 2009年6月5日15:30 (a) 观测以及 (b) CTRL 试验、(c) RCV 试验、(d) PPMP 试验、(e) BLE 试验预报的组合反射率因子

Fig. 9 (a) The observed radar composite reflectivity factor and the reflectivity factor forecasted by (b) CTRL experiment, (c) RCV experiment, (d) PPMP experiment, (e) BLE experiment at 1530 BJT 5 June 2009

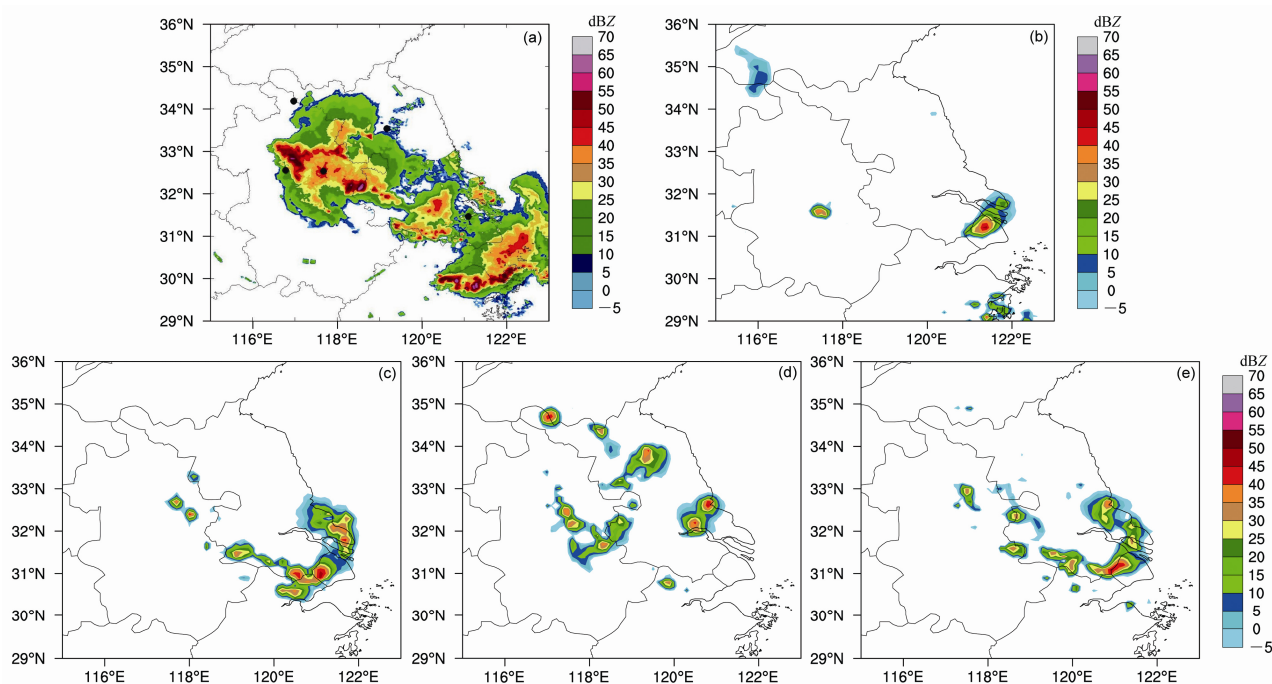


图10 同图9, 但为19:30

Fig. 10 As in Fig. 9, but for 1930 BJT 5 June 2009

范围冷池已在飑线后侧（江苏省中南部）出现；PPMP 和 RCV 试验的冷池中心 θ 值分别为 322 K 和 324 K，明显低于 CTRL 的 328 K；CTRL 和 RCV 试验的 θ 梯度约为 $4 \text{ K} (10 \text{ km})^{-1}$ 和 $5 \text{ K} (10 \text{ km})^{-1}$ ，

而 PPMP 试验高达约 $8 \text{ K} (10 \text{ km})^{-1}$ ；针对 CTRL 试验在江苏省中南部的 328 K 冷池中心，RCV 试验冷池中心位置比其偏西 1 个经度左右，而 PPMP 试验偏北大于 1 个纬度、偏西近 1 个经度；CTRL 试验

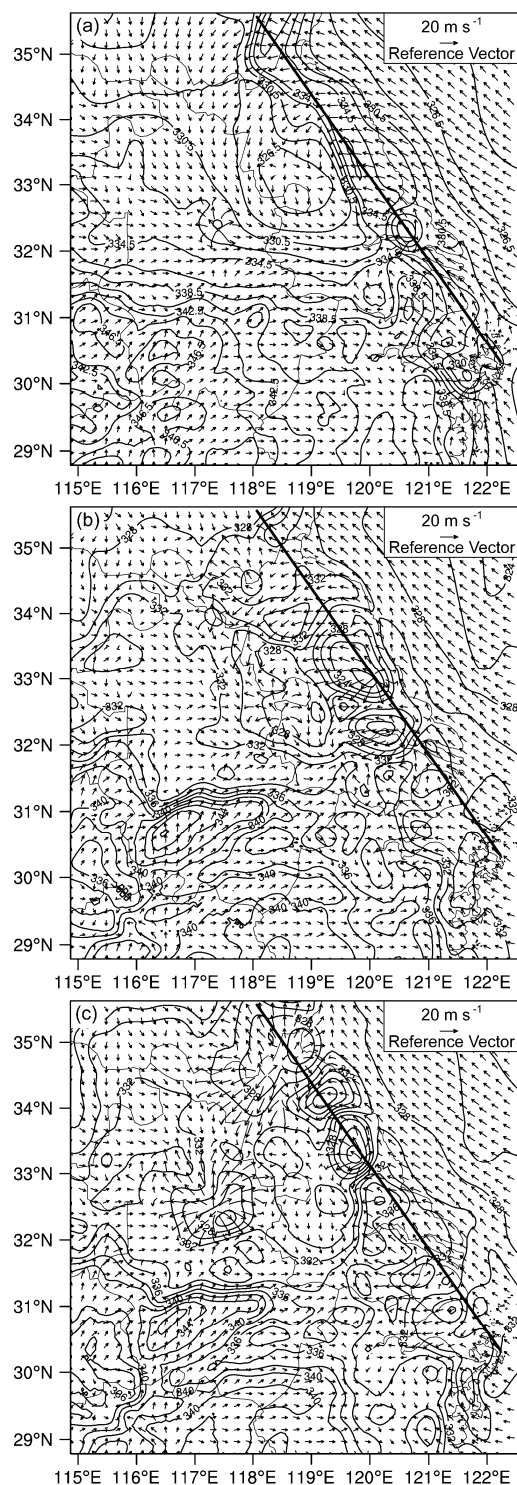


图 11 6 月 5 日 18:00 相当位温 (等值线, 间隔 2 K) 和水平风场 (箭头, 单位: m s^{-1}) 在 D3 区最底层的水平分布: (a) CTRL 试验; (b) RCV 试验; (c) PPMP 试验。黑线为图 12 中剖面位置

Fig. 11 Equivalent potential temperature θ (contours, interval 2 K) and horizontal wind (arrows, units: m s^{-1}) at 1800 BJT on 5 June from (a) CTRL experiment, (b) RCV experiment, and (c) PPMP experiment at the lowest level in region D3. The black lines represent the location of cross section in Fig. 12

在浙江省宁波有一小范围冷池, 而 RCV 和 PPMP 试验则没有, 这与 CTRL 试验在此处出现强降水而 RCV 和 PPMP 试验未出现相匹配。另外, PPMP 试验在江苏省和山东省交界处以及安徽省中部均有一个范围较大的冷池中心 (中心强度 326 K), 这说明在这些地方上空 PPMP 试验中不稳定能量的聚集大于 CTRL 和 RCV 试验的, 同时还有较明显的垂直风切变, 此种不稳定能量和垂直风切变的配置有利于对流单体的生成 (Moller et al., 1994), 导致 PPMP 试验在此两处出现较大降水, 也更接近于观测值, 而 CTRL 和 RCV 试验则没有。

为研究飊线三维结构, 下面对 6 月 5 日 17:30 一个强对流单体沿图 11 黑线的剖面进行分析 (图 12)。在飊线初生阶段, PPMP 试验中飊线后侧已形成较厚的冷池, 在冷池前沿等位温线密集而陡立, 而 CTRL 试验中等位温线的密集程度明显弱于 PPMP 试验的, RCV 试验强度居中。在 3 组试验的飊线前方和冷池后方、600 hPa 以下区域均为深厚的暖湿层 ($\partial\theta/\partial z < 0$), 600~400 hPa 为冷区 ($\partial\theta/\partial z > 0$), 这种配置有利于不稳定能量的积聚。PPMP 试验的暖湿中心和上层的冷中心均明显强于 CTRL 和 RCV 试验, 这种 θ 层结结构也最不稳定, 容易形成深厚的上升运动。

由垂直速度 w 分布可以看出: 此时已形成深厚的上升运动, PPMP 试验和 RCV 试验的垂直上升速度稍弱于 CTRL 试验, 且正中心位置也高于 CTRL 试验, 但他们的负值范围大于 CTRL 试验, 且中心位置也低于 CTRL 试验。随着时间的推移, 冷池不断南移并发展增强 (图略); 相比 CTRL 试验, PPMP (RCV) 试验飊线位置偏西 (南) 大约 1 (0.5) 个经度 (纬度), 冷池的范围和强度也较大, 明显垂直速度出现的时间晚 (早) 0.5 个小时。此外, RCV 和 CTRL 试验同时出现 w 明显减小, 而 PPMP 试验却早他们约 1 个小时。

综上所述, 同化地面观测后的动力和热力场的配置有利于飊线系统的发展, 其中 PPMP 试验和 RCV 试验中冷池的位置和强度明显改变, 飊线出现和消亡的时间也发生变化, 尤其是 PPMP 试验中对流单体的出现和消亡时间与 CTRL 相差 1 小时、位置相差约 1 个经 (纬) 度。

5 总结

针对 2009 年 6 月 5 日一次飊线过程, 借助 WRF

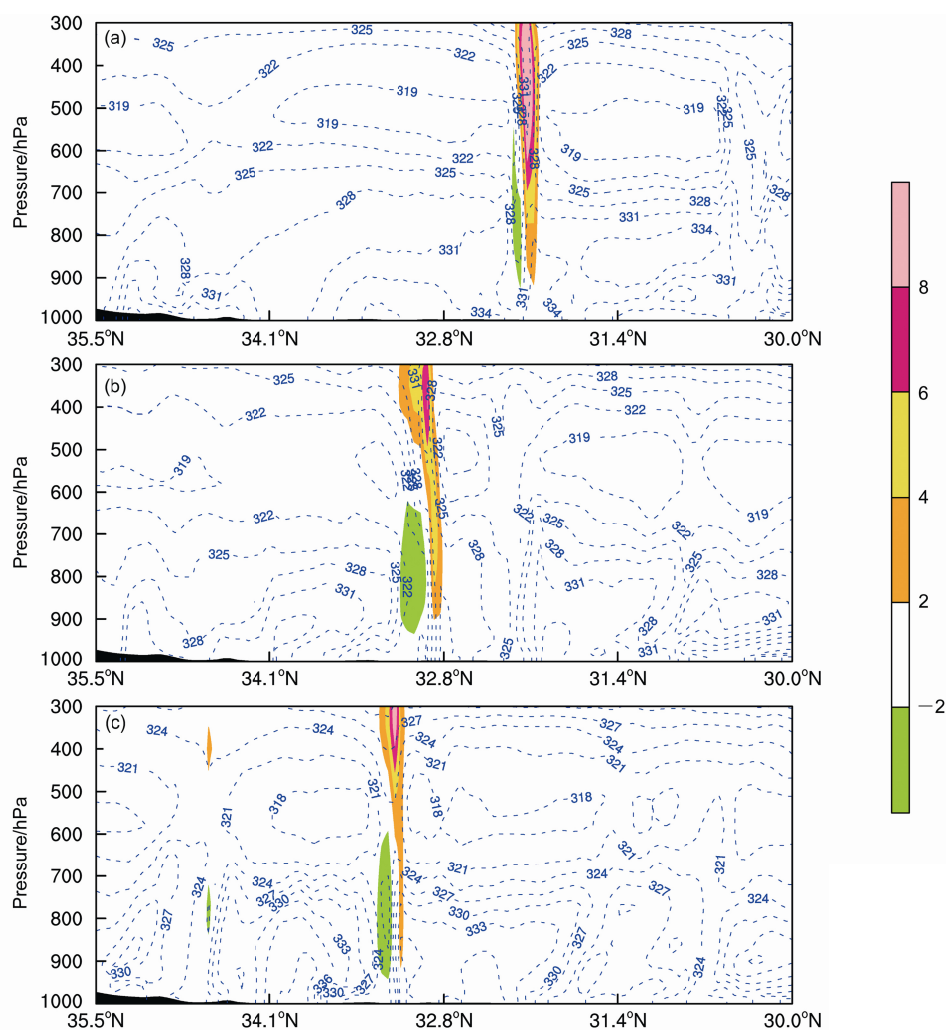


图 12 6 月 5 日 17:30 相当位温 (等值线, 间隔 3 K) 和垂直速度 w (阴影, 单位: m s^{-1}) 沿图 11 中黑线的剖面: (a) CTRL 试验; (b) RCV 试验; (c) PPMP 试验

Fig. 12 Cross sections (along black lines in Fig. 11) of equivalent potential temperature θ (contours, interval 3 K) and w (shaded, units: m s^{-1}) at 1730 BJT 5 June: (a) CTRL experiment; (b) RCV experiment; (c) PPMP experiment

Hybrid ETKF-3DVAR 同化系统考察不同生成方案的集合样本对同化地面观测的影响, 并结合雷达和降水等实况, 对比分析了不同试验的分析增量场、样本离散度、组合反射率、降水以及飚线的位置和强度, 得出以下结果:

(1) 对比同化前的样本离散度和样本均值模拟组合反射率的误差, 发现 RCV 方案构建的湿度场样本空间结构较合理, 而 PPMP 方案构建的风场样本空间结构较合理。同化后, 850 hPa 以下水平风和水汽混合比的空间结构明显调整, 其中 RCV 方案生成的样本侧重于改变水平风的空间分布, 而 PPMP 方案侧重改变水汽混合比的空间结构, BLE 方案兼具 RCV 方案和 PPMP 方案二者特征。

(2) 根据对降水 SAL 评分, 同化间接改善 6 h

降水预报, 其中 PPMP 试验预报得最好, 尤其是对降水位置和强度的预报。同化后, 预报的飚线移动方向与实况较一致, 但比实况慢 2 h 左右; RCV 和 BLE 试验对飚线的弓状回波预报得较好, BLE 试验结果较多表现 RCV 试验的特征; PPMP 和 RCV 方案可以明显改变冷池的位置和强度, 影响飚线的出现和消亡时间, 其中 PPMP 方案影响更显著。

总之, 同化地面站观测确实可以改善飚线的位置、中尺度结构和降水的预报, 但总体改善程度还不显著, 原因主要有两点: 一是本文只同化了一个时次的地面站观测, 并且地面观测的影响高度又有限 (850 hPa 以下); 二是此次飚线系统中尺度结构复杂且发展迅速, 很难准确构建合理的背景误差协方差矩阵, 这也直接影响同化效果。下一步将通过

增加同化频次以及同化多普勒雷达资料来进一步比较三类方案样本的同化效果, 同时更全面评估用混合方法同化地面站资料对改善飑线系统预报的贡献。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所黄永杰博士提供的包含正确中国国界和行政区划的地图数据 (<https://coding.net/u/huangynj/p/NCL-Chinamap/git>)。

参考文献 (References)

- Ancell B C, Mass C F, Cook K, et al. 2014. Comparison of surface wind and temperature analyses from an ensemble Kalman filter and the NWS real-time mesoscale analysis system [J]. *Wea. Forecasting*, 29 (4): 1058–1075, doi:10.1175/WAF-D-13-00139.1.
- 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, doi:10.1175/1520-0493(2004)132<0897:ATVDAS>2.0.CO;2.
- Barker D M. 2005. Southern high-latitude ensemble data assimilation in the Antarctic mesoscale prediction system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133 (12): 3431–3449, doi:10.1175/MWR3042.1.
- Bryan G H, Parker M D. 2010. Observations of a squall line and its near environment using high-frequency rawinsonde launches during VORTEX2 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (11): 4076–4097, doi:10.1175/2010MWR3359.1.
- 曹倩, 张述文, 曹帮军, 等. 2016. 超强不稳定和弱切变环境下一次飑线过程的雷达资料同化与分析 [J]. *热带气象学报*, 32 (5): 645–655.
- Cao Qian, Zhang Shuwen, Cao Bangjun, et al. 2016. The radar data assimilation and analysis of a squall line under ultrastrong instability and weak vertical wind shear [J]. *J. Tropical Meteor.* (in Chinese), 32 (5): 645–655, doi:10.16032/j.issn.1004-4965.2016.05.00.
- 戴建华, 陶岚, 丁杨, 等. 2012. 一次罕见飑前强降雹超级单体风暴特征分析 [J]. *气象学报*, 70 (4): 609–627. Dai Jianhua, Tao Lan, Ding Yang, et al. 2012. Case analysis of a large hail-producing severe supercell ahead of a squall line [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 70 (4): 609–627, doi:10.11676/qxb2012.050.
- Dong J L, Xue M, Droegemeier K. 2011. The analysis and impact of simulated high-resolution surface observations in addition to radar data for convective storms with an ensemble Kalman filter [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 112 (1–2): 41–61, doi:10.1007/s00703-011-0130-3.
- Fujita T, Stensrud D J, Dowell D C. 2007. Surface data assimilation using an ensemble Kalman filter approach with initial condition and model physics uncertainties [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (5): 1846–1868, doi:10.1175/MWR3391.1.
- Hacker J P, Snyder C. 2005. Ensemble Kalman filter assimilation of fixed screen-height observations in a parameterized PBL [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 133 (11): 3260–3275, doi:10.1175/MWR3022.1.
- Ha S Y, Snyder C. 2014. Influence of surface observations in mesoscale data assimilation using an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (4): 1489–1508, doi:10.1175/MWR-D-13-00108.1.
- Houtekamer P L, Derome J. 1995. Methods for ensemble prediction [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 123 (7): 2181–2196, doi:10.1175/1520-0493(1995)123<2181:MFEPP>2.0.CO;2.
- 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 Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010a. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part I: Perfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (3): 640–652, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.03.15.
- 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 Weiren, Zhu Jiang, Xue Ming, et al. 2010b. Storm-scale ensemble Kalman filter data assimilation experiments using simulated Doppler radar data. Part II: Imperfect model tests [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 737–753, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.07.
- 李娜, 冉令坤, 高守亭. 2013. 华东地区一次飑线过程的数值模拟与诊断分析 [J]. *大气科学*, 37 (3): 595–608. Li Na, Ran Lingkun, Gao Shouting. 2013. Numerical simulation and diagnosis study of a squall line in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 595–608, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12007.
- 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) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 140 (11): 3507–3524, doi:10.1175/MWR-D-12-00043.1.
- 梁建宇, 孙建华. 2012. 2009年6月一次飑线过程灾害性大风的形成机制 [J]. *大气科学*, 36 (2): 316–336. Liang Jianyu, Sun Jianhua. 2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (2): 316–336, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11017.
- Meng Z Y, Zhang F Q. 2008. 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, doi:10.1175/2007MWR2106.1.
- Meng Z Y, Yan D C, Zhang Y J. 2013. General features of squall lines in East China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (5): 1629–1647, doi:10.1175/MWR-D-12-00208.1.
- Moller A R, Doswell III C A, Foster M P, et al. 1994. The operational recognition of supercell thunderstorm environments and storm structures [J]. *Wea. Forecasting*, 9 (3): 327–347, doi:10.1175/1520-0434(1994)009<0327:TOROST>2.0.CO;2.
- Molteni F, Buizza R, Palmer T N, et al. 1996. The ECMWF ensemble prediction system: Methodology and validation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122 (529): 73–119, doi:10.1002/qj.49712252905.
- 潘玉洁, 赵坤, 潘益农. 2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单一多普勒雷达分析 [J]. *气象学报*, 66 (4): 621–636. Pan Yujie, Zhao Kun, Pan Yinong. 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (4): 621–636, doi:10.11676/qxb2008.059.
- Parker M D, Johnson R H. 2004a. Simulated convective lines with leading precipitation. Part I: Governing dynamics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (14): 1637–1655, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<1637:SCLWLP>2.0.CO;2.

- Parker M D, Johnson R H. 2004b. Simulated convective lines with leading precipitation. Part II: Evolution and maintenance [J]. *J. Atmos. Sci.*, 61 (14): 1656–1673, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<1656:SCLWLP>2.0.CO;2.
- 秦琰琰, 龚建东, 李泽椿, 等. 2014. 集合方根滤波同化多普勒雷达资料在一次飑线过程中的应用研究 [J]. *气象学报*, 72 (1): 133–151. Qin Yanyan, Gong Jiandong, Li Zechun, et al. 2014. Assimilation of Doppler radar observations with an ensemble square root filter: A squall line case study [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 72 (1): 133–151, doi:10.11676/qxxb2014.012.
- Romine G S, Schwartz C S, Berner J, et al. 2014. Representing forecast error in a convection-permitting ensemble system [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (12): 4519–4541, doi:10.1175/MWR-D-14-00100.1.
- Schwartz C S, Liu Z Q. 2014. Convection-permitting forecasts initialized with continuously cycling limited-area 3DVAR, ensemble Kalman filter, and “hybrid” variational–ensemble data assimilation systems [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (2): 716–738, doi:10.1175/MWR-D-13-00100.1.
- Schwartz C S, Romine G S, Smith K R, et al. 2014. Characterizing and optimizing precipitation forecasts from a convection-permitting ensemble initialized by a mesoscale ensemble Kalman filter [J]. *Wea. Forecasting*, 29 (6): 1295–1318, doi:10.1175/WAF-D-13-00145.1.
- 沈杭锋, 翟国庆, 朱补全, 等. 2010. 浙江沿海中尺度辐合线对飑线发展影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 34 (6): 1127–1140. Shen Hangfeng, Zhai Guoqing, Zhu Buquan, et al. 2010. A model study of impact of coastal mesoscale convergence line on development of squall line over Zhejiang Province [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (6): 1127–1140, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.06.08.
- Sobash R A, Stensrud D J. 2015. Assimilating surface mesonet observations with the EnKF to improve ensemble forecasts of convection initiation on 29 May 2012 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143 (9): 3700–3725, doi:10.1175/MWR-D-14-00126.1.
- 孙虎林, 罗亚丽, 张人禾, 等. 2011. 2009 年 6 月 3~4 日黄淮地区强飑线成熟阶段特征分析 [J]. *大气科学*, 35 (1): 105–120. Sun Hulin, Luo Yali, Zhang Renhe, et al. 2011. Analysis on the mature-stage features of the severe squall line occurring over the Yellow River and Huaihe River basins during 3–4 June 2009 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 35 (1): 105–120, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.09.
- Sun J Z, Wang H L. 2013. Radar data assimilation with WRF 4D-Var. Part II: Comparison with 3D-Var for a squall line over the U.S. Great Plains [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 141 (7): 2245–2264, doi:10.1175/MWR-D-12-00169.1.
- Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. 1982. Two-dimensional convection in non-constant shear: A model of mid-latitude squall lines [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 108 (458): 739–762, doi:10.1002/qj.49710845802.
- Toth Z, Kalnay E. 1993. Ensemble forecasting at NMC: The generation of perturbations [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 74 (12): 2317–2330, doi:10.1175/1520-0477(1993)074<2317:EFANTG>2.0.CO;2.
- Toth Z, Kalnay E. 1997. Ensemble forecasting at NCEP and the breeding method [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125 (12): 3297–3319, doi:10.1175/1520-0493(1997)125<3297:EFANAT>2.0.CO;2.
- Wang X G, Hamill T M, Whitaker J S, et al. 2007. A comparison of hybrid ensemble transform Kalman filter-optimum interpolation and ensemble square root filter analysis schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 135 (3): 1055–1076, doi:10.1175/MWR3307.1.
- Wang X G, Barker D M, Snyder C, et al. 2008a. A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part I: Observing system simulation experiment [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (12): 5116–5131, doi:10.1175/2008MWR2444.1.
- Wang X G, Barker D M, Snyder C, et al. 2008b. A hybrid ETKF–3DVAR data assimilation scheme for the WRF model. Part II: Real observation experiments [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (12): 5132–5147, doi:10.1175/2008MWR2445.1.
- Wernli H, Paulat M, Hagen M, et al. 2008. SAL—A novel quality measure for the verification of quantitative precipitation forecasts [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (11): 4470–4487, doi:10.1175/2008MWR2415.1.
- 袁招洪. 2015. 不同分辨率和微物理方案对飑线阵风锋模拟的影响 [J]. *气象学报*, 73 (4): 648–666. Yuan Zhaohong. 2015. Study of the influence of the different horizontal resolutions and microphysical setups on the idealized simulation of a squall line [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 73 (4): 648–666, doi:10.11676/qxxb2015.049.
- Zhang F M, Yang Y, Wang C H. 2015. The effects of assimilating conventional and ATOVS data on forecasted near-surface wind with WRF-3DVAR [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 143 (1): 153–164, doi:10.1175/MWR-D-14-00038.1.
- Zhang H L, Pu Z X. 2014. Influence of assimilating surface observations on numerical prediction of landfalls of hurricane Katrina (2005) with an ensemble Kalman filter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (8): 2915–2934, doi:10.1175/MWR-D-14-00014.1.
- Zhang S W, Li D Q, Qiu C J. 2011. A multimodel ensemble-based Kalman filter for the retrieval of soil moisture profiles [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 28 (1): 195–206, doi:10.1007/s00376-010-9200-6.
- Zhang S W, Liu Y H, Zhang W D. 2013. Ensemble square root filter assimilation of near-surface soil moisture and reference-level observations into a coupled land surface-boundary layer model [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 27 (4): 541–555, doi:10.1007/s13351-013-0402-6.
- Zheng F, Zhu J. 2010. A multivariate empirical orthogonal function-based scheme for the balanced initial ensemble generation of an ensemble Kalman filter [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 3 (3): 165–169.
- 郑媛媛, 张雪晨, 朱红芳, 等. 2014. 东北冷涡对江淮飑线生成的影响研究 [J]. *高原气象*, 33 (1): 261–269. Zheng Yuanyuan, Zhang Xuechen, Zhu Hongfang, et al. 2014. Study of squall line genesis with Northeast cold vortex [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 33 (1): 261–269, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00005.